

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

WYLLYANY COSTA SANTOS

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF) A PARTIR
DE ETANOL DA CANA-DE-AÇÚCAR PELA ROTA ATJ-SPK: DESAFIOS E
OPORTUNIDADES**

RIO LARGO-AL

2026

WYLLYANY COSTA SANTOS

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF) A PARTIR
DE ETANOL DA CANA-DE-AÇÚCAR PELA ROTA ATJ-SPK: DESAFIOS E
OPORTUNIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Energia da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito à obtenção do
título de Bacharelado em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares
Neto

RIO LARGO-AL

2026

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S237p Santos, Wyllyany Costa.

Produção de combustível sustentável de aviação (SAF) a partir de etanol da cana-de-açúcar pela rota ATJ-SPK: desafios e oportunidades. / Wyllyany Costa Santos. – 2026.

78 f.: il.

Orientador: Júlio Inácio Holanda Tavares Neto.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) –
Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias,
Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2026.

Inclui bibliografia

1. Querosene verde. 2. Biojet. 3. Biocombustível de Aviação. 4. BioQAV. 5. Sintético de Mistura. I. Título.

CDU: 662.756.3:633.61



Folha de Aprovação

WYLLYANY COSTA SANTOS

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF) A PARTIR DE ETANOL DA
CANA-DE-AÇÚCAR PELA ROTA ATJ-SPK: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

Rio Largo, 01 de junho de 2026

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIO INACIO HOLANDA TAVARES NETO
Data: 01/06/2026 19:46:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador - Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto, UFAL – CECA

Documento assinado digitalmente
gov.br AMANDA SANTANA PEITER
Data: 02/06/2026 11:48:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1º Avaliador - Prof. Dra. Amanda Santana Peiter, UFAL – CECA

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR
Data: 01/06/2026 21:32:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2º Avaliador - Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Junior, UFAL – CECA

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo constante e confiança depositada em mim ao longo de toda esta trajetória acadêmica.

Ao meu orientador, manifesto meus sinceros agradecimentos pela orientação, dedicação, paciência e valiosas contribuições, que foram fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Alagoas e a todos os professores que fizeram parte da minha formação, compartilhando conhecimentos, experiências e ensinamentos que contribuíram significativamente para minha jornada acadêmica e profissional.

Somos feitos de poeira estelar. Somos uma
maneira de o cosmos conhecer a si mesmo.
(Carl Sagan)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sobre a produção de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) a partir do etanol de cana-de-açúcar pela rota Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK), com foco nos desafios e oportunidades associados ao contexto brasileiro. Inicialmente, são discutidos os aspectos técnicos do querosene de aviação convencional, seus impactos ambientais e a necessidade de alternativas mais sustentáveis diante das metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa. Em seguida, são abordadas as principais rotas tecnológicas para produção de SAF, com destaque para o processo ATJ-SPK, detalhando suas etapas, matérias-primas e nível de maturidade tecnológica. O estudo também analisa o cenário brasileiro, incluindo políticas públicas, disponibilidade de etanol e potencial produtivo. Por fim, são discutidas as principais barreiras econômicas e tecnológicas, como os elevados custos de produção e a necessidade de investimentos em infraestrutura. Conclui-se que o Brasil possui vantagens competitivas relevantes para a produção de SAF via ATJ-SPK, mas ainda enfrenta desafios significativos para sua consolidação em larga escala.

Palavras-chave: Querosene verde, Biojet, Biocombustível de Aviação, BioQAV, Componente Sintético de Mistura.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the production of Sustainable Aviation Fuel (SAF) from sugarcane ethanol via the Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK) pathway, focusing on the challenges and opportunities associated with the Brazilian context. Initially, the technical aspects of conventional aviation kerosene, its environmental impacts, and the need for more sustainable alternatives in light of global greenhouse gas emission reduction targets are discussed. Next, the main technological pathways for SAF production are addressed, with emphasis on the ATJ-SPK process, detailing its stages, feedstocks, and level of technological maturity. The study also examines the Brazilian scenario, including public policies, ethanol availability, and production potential. Finally, the main economic and technological barriers are discussed, such as high production costs and the need for infrastructure investments. It is concluded that Brazil has significant competitive advantages for SAF production via ATJ-SPK, but still faces considerable challenges for its large-scale implementation.

Keywords: Green kerosene, Biojet, Aviation biofuel, BioQAV, Synthetic Blending Component.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de produção de querosene de aviação.....	22
Figura 2 - Emissões setoriais de GEE na UE e trajetória da meta de redução de 95%.....	23
Figura 3 - Diagrama do ciclo de vida do carbono para combustível de aviação fóssil (esquerda) e biocombustível sustentável (direita).....	28
Figura 4 - Estágios genéricos de produção de PtL.....	29
Figura 5 - Processo simplificado de produção de SAF via rota ATJ-SPK.....	43
Figura 6 - Fluxograma do Processo SPK-ATJ em Três Etapas.....	53
Figura 7 - Fluxograma do Processo SPK-ATJ em Quatro Etapas.....	53
Figura 8 - Etapa de Desidratação Intramolecular do Etanol.....	54
Figura 9 - Etapa de Oligomerização.....	56
Figura 10 - Etapa de Hidrogenação do Oligômero.....	57
Figura 11 - Distribuição de carbono do combustível de aviação.....	58
Figura 12 - Fluxograma simplificado da produção de etanol 1G, açúcar e eletricidade.....	62
Figura 13 - Processo industrial simplificado de produção de etanol 1G e 2G.....	63
Figura 14 - Produção brasileira anual de QAV convencional em mil m ³	68
Figura 15 - Produção de QAV convencional no Brasil (1º tri./2026, mil m ³).....	70
Figura 16 - Rotas Tecnológicas & Matéria-Prima: custos de produção de SAF.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Agentes econômicos que comercializam QAV no Brasil.....	18
Quadro 2 - Progressos notáveis para reduzir as emissões de CO2 na aviação.....	25
Quadro 3 - Elementos de implementação do CORSIA.....	35
Quadro 4 - Certificações de sustentabilidade reconhecidas pela CORSIA.....	39
Quadro 5 - Critérios de sustentabilidade CORSIA.....	39
Quadro 6 - Metas e projeções determinadas na Lei 14.993/2024.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de conversão aprovados pela ASTM.....	29
Tabela 2 - Requisitos detalhados para combustíveis de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados - Parte 1: Requisitos Básicos.....	45
Tabela 3 - Requisitos detalhados para combustíveis de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados - Parte 2: Requisitos ampliados.....	48
Tabela 4 - Requisitos detalhados do lote; Álcool para Jato (ATJ-SPK).....	50
Tabela 5 - Outros Requisitos Detalhados; Álcool para Jato (ATJ-SPK).....	52
Tabela 6 - Características industriais do processo de desidratação de etanol a etileno.....	55
Tabela 7 - TRL das Principais Rotas de Bioquerosene de Aviação.....	59
Tabela 8 - Lista de empresas/projetos baseados em tecnologias de conversão de álcool em combustível de aviação (lista não exaustiva) (com base em informações da Argus Media)....	67
Tabela 9 - Produção brasileira detalhada de QAV convencional no 1º trim. de 2026.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
ATAG	<i>Air Transport Action Group</i> (Grupo de Ação do Transporte Aéreo)
ATJ-SKA	<i>Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics</i> (Querosene Parafínico Sintético com Aromáticos)
ATJ-SPK	<i>Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene</i> (Querosene parafínico sintético de álcool para jato)
BPD	Barris por dia
CHJ	<i>Catalytic hydrothermolysis jet fuel</i> (Combustível de aviação por hidrotermólise catalítica)
CORSIA	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i> (Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FT	<i>Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene</i> (Querosene Parafínico Sintético Hidroprocessado Fischer-Tropsch)
FT-SKA	<i>Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources</i> (Querosene sintetizado com aromáticos derivados por alquilação de aromáticos leves de fontes não petrolíferas)
GEE	Gases de Efeito Estufa
HC-HEFA-SPK	<i>Synthesized paraffinic kerosene from hydrocarbon - hydroprocessed esters and fatty acids</i> (Querosene parafínico sintetizado a partir de hidrocarbonetos — ésteres e ácidos graxos hidroprocessados)
HEFA	<i>Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids</i> (Querosene Parafínico Sintetizado a partir de Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados)
IATA	<i>International Air Transport Association</i> (Associação Internacional de Transporte Aéreo)
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> (Organização da Aviação Civil Internacional)

IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Renovável)
LCAF	<i>Lower Carbon Aviation Fuels</i> (Combustíveis de aviação com baixo teor de carbono)
LTAG	<i>Long-term global aspirational goal for international aviation</i> (Meta aspiracional global de longo prazo para a aviação internacional)
MFSP	Preço mínimo de venda do combustível
MME	Ministério de Minas e Energia
MtCO ₂	Milhões de toneladas de dióxido de carbono
ONU	Organização das Nações Unidas
PNNL	<i>Pacific Northwest National Laboratory</i> (Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico)
PtL	<i>Power-to-Liquids</i> (Energia-para-Líquidos)
QAV	Querosene de Aviação
RTK	<i>Revenue Tonne-Kilometres</i> (Receita em toneladas-quilômetro)
SAF	<i>Sustainable Aviation Fuel</i> (Combustível Sustentável de Aviação)
SAFUG	<i>Sustainable Aviation Fuel User Group</i> (Grupo de Usuários de Combustível Sustentável de Aviação)
SIP	<i>Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars</i> (Iso-parafinas sintetizadas a partir de açúcares fermentados hidroprocessados)
SUN-TO-LIQUID	<i>Sol-para-líquido</i>
SYNGAS	<i>Synthesis gas</i> (Gás de síntese)
TRIM.	Trimestre
UE	União Europeia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
3. METODOLOGIA.....	16
4. QUEROSENE DE AVIAÇÃO (QAV).....	17
4.1. História do QAV.....	17
4.2. Definição e composição do QAV.....	17
4.3. Requisitos de qualidade do QAV.....	19
4.3.1. Escoamento a baixa temperatura.....	20
4.3.2. Estabilidade térmica.....	20
4.3.3. Combustão.....	20
4.3.4. Corrosividade e dissolução de elastômeros.....	21
4.3.5. Presença de água.....	21
4.3.6. Segurança.....	21
4.4. Produção convencional de QAV.....	21
4.5. Impacto ambiental do QAV convencional.....	22
5. COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF).....	27
5.1. Definição do SAF.....	27
5.2. Tipos de SAF.....	27
5.2.1. Biocombustíveis.....	27
5.2.2. Combustíveis sintéticos.....	28
5.3. Tecnologias aprovadas pela ASTM para produzir SAF.....	29
5.4. Tecnologias aprovadas no Brasil para produzir SAF.....	31
5.4.1. Querosene parafinico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT)....	31
5.4.2. Querosene parafinico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA).....	32
5.4.3. Querosene parafinico sintetizado com aromáticos (SPK/A).....	32
5.4.4. Querosene parafinico sintetizado por álcool (SPK-ATJ).....	32
5.4.5. Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP).....	33
5.4.6. Querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ).....	33
5.4.7. Querosene parafinico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPKHCHEFA).....	33
6. OS QUATRO PILARES DA ESTRUTURA GLOBAL DA ICAO PARA SAF, LCAF E OUTRAS ENERGIAS MAIS LIMPAS PARA A AVIAÇÃO.....	34
6.1. Política e planejamento.....	36
6.2. Estrutura regulatória.....	38
6.3. Suporte à implementação.....	40
6.4. Financiamento.....	41
7. ROTA TECNOLÓGICA DO QUEROSENE PARAFÍNICO SINTÉTICO DE ÁLCOOL PARA JATO (ATJ-SPK).....	42
7.1. Origem da rota ATJ-SPK.....	42
7.2. Aprovação da rota ATJ-SPK na ASTM International.....	43

7.3. Processo de produção de SAF via rota ATJ-SPK.....	52
7.3.1. Desidratação.....	53
7.3.2. Oligomerização.....	55
7.3.3. Hidrogenação.....	56
7.3.4. Fracionamento.....	57
7.3.5. Maturidade da rota tecnológica ATJ-SPK.....	58
8. POTENCIAL E DESAFIOS DA PRODUÇÃO DE SAF VIA ROTA ATJ-SPK A PARTIR DO ETANOL NO BRASIL E EM ALAGOAS.....	60
8.1. Produção de etanol da cana-de-açúcar em alagoas.....	60
8.2. Métodos empregados na fabricação do etanol da cana-de-açúcar.....	61
8.2.1. Etanol de primeira geração (E1G).....	61
8.2.2. Etanol de segunda geração (E2G).....	62
8.3. Políticas públicas brasileiras de incentivo à pesquisa, produção e uso de SAF.....	63
8.4. Produção de SAF via rota ATJ-SPK no Brasil.....	66
8.5. Desafios de custo na produção de SAF.....	70
9. CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

A aviação civil desempenha um papel fundamental na integração global, conectando pessoas, mercados e culturas. No entanto, esse setor também representa um desafio significativo no contexto das mudanças climáticas, sendo responsável por uma parcela relevante das emissões de gases de efeito estufa.

Em 2019, as emissões provenientes da combustão de querosene de aviação atingiram um recorde histórico de 1.027 MtCO₂. A aviação é considerada um dos setores mais difíceis de descarbonizar, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico. (IEA, 2022 ; ATAG, 2022 ; Searle et al., 2019 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Diante das metas internacionais de redução de carbono, como as estabelecidas no Acordo de Paris, torna-se essencial desenvolver alternativas sustentáveis ao querosene de aviação convencional.

Nesse cenário, o Combustível Sustentável de Aviação (SAF) surge como uma das principais soluções para a descarbonização do setor aéreo, especialmente por sua capacidade de ser utilizado em motores existentes sem necessidade de grandes modificações. Entre as diversas rotas tecnológicas disponíveis, destaca-se a rota Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK), que permite a conversão de álcoois, como o etanol, em combustível para aviação. O Brasil apresenta condições particularmente favoráveis para o desenvolvimento desta tecnologia, devido à sua consolidada cadeia produtiva de etanol a partir da cana-de-açúcar, além de políticas públicas recentes voltadas à transição energética.

O estado de Alagoas tem elevado potencial na produção de etanol e cana-de-açúcar. Em 2025, o estado foi o maior produtor de etanol da região Nordeste, com 416,4 milhões de litros, correspondentes a 21% do total regional, que atingiu 1,9 bilhão de litros (Nealdo, 2025). Com base nesses dados, o etanol foi selecionado como matéria-prima para a rota ATJ-SPK. Essa escolha também se justifica pelo fato de a rota estar entre as aprovadas pela ANP e pela ASTM International, consolidando-se como uma alternativa viável para a produção de combustível sustentável de aviação.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral: Apresentar um estudo que indique os desafios e oportunidades para produzir SAF via rota ATJ-SPK no Brasil utilizando o etanol oriundo da cana-de-açúcar.

Objetivos específicos:

- Descrever o processo de obtenção de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) a partir do etanol por meio da rota ATJ-SPK.
- Avaliar o potencial de utilização do SAF produzido pela rota ATJ-SPK no Brasil, utilizando o etanol como matéria-prima.
- Analisar as barreiras tecnológicas e econômicas associadas à produção de SAF pela rota ATJ-SPK a partir do etanol.

3. METODOLOGIA

A revisão de literatura consiste em um estudo que reúne, examina e discute trabalhos previamente publicados acerca de um tema específico. Na literatura científica, podem ser encontrados diversos modelos de revisão, os quais se distinguem pelas metodologias empregadas nas diferentes fases de elaboração e desenvolvimento desses estudos (Galvão & Ricarte, 2020).

Este trabalho consiste em uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-exploratório, com o objetivo de analisar os desafios e as oportunidades da produção de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) a partir do etanol de cana-de-açúcar pela rota Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK) no contexto brasileiro.

As revisões narrativas são estudos amplos que descrevem e discutem a evolução do conhecimento ou o estado atual de um tema sob diferentes perspectivas. Sua principal contribuição é facilitar a atualização de conhecimentos de forma rápida e acessível. Geralmente, são estruturadas em introdução, desenvolvimento, comentários e referências, sendo o desenvolvimento organizado em tópicos definidos pelo autor (Rother, 2007).

A pesquisa foi realizada por meio da consulta a artigos científicos, livros, relatórios técnicos, normas, legislações e documentos institucionais obtidos em bases de dados como Google Scholar, ScienceDirect, Scopus e Web of Science, além de publicações de instituições nacionais e internacionais de referência, entre elas ANP, EPE, IEA, ICAO, IATA e ASTM International.

Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês relacionadas ao tema, incluindo “SAF”, “Alcohol-to-Jet”, “ATJ-SPK”, “etanol de cana-de-açúcar”, “bioquerosene”, “Sustainable Aviation Fuel”, “ethanol-to-jet” e “aviation decarbonization”. Priorizaram-se publicações entre 2016 e 2026, sem excluir referências anteriores consideradas fundamentais para a compreensão dos aspectos tecnológicos, regulatórios e conceituais envolvidos.

Após a seleção do material, as informações foram organizadas e analisadas em categorias temáticas que abrangeram o querosene de aviação convencional, os combustíveis sustentáveis de aviação, as rotas tecnológicas de produção de SAF, o etanol de primeira e segunda geração, a rota ATJ-SPK, as políticas de descarbonização da aviação e os desafios técnicos, econômicos e regulatórios para sua implementação no Brasil. Por fim, realizou-se uma análise crítica para avaliar o potencial da rota ATJ-SPK na produção de SAF no Brasil, identificando os fatores que favorecem ou limitam sua adoção comercial e suas perspectivas para a transição energética e a sustentabilidade da aviação.

4. QUEROSENE DE AVIAÇÃO (QAV)

4.1. História do QAV

O querosene é um líquido inflamável composto por hidrocarbonetos, amplamente utilizado como combustível. Apresenta coloração incolor ou levemente amarelada e possui odor característico. Descoberto pelo médico canadense Abraham Gesner, no final da década de 1840, o querosene era inicialmente produzido a partir de alcatrão de hulha e óleos de xisto. Após a perfuração do primeiro poço de petróleo na Pensilvânia, em 1859, o petróleo passou a ser a principal matéria-prima para sua obtenção. Durante várias décadas, o querosene destacou-se como o principal produto das refinarias, devido ao uso em lâmpadas, até perder espaço com a difusão da iluminação elétrica. Posteriormente, sua produção diminuiu ainda mais com a consolidação da gasolina como combustível predominante dos automóveis. Na aviação, o querosene permanece como o combustível padrão para turbinas aeronáuticas (Britannica, 2025).

O querosene é amplamente utilizado como combustível para turbinas aeronáuticas e como óleo de aquecimento. Em diversos países e contextos, também serve para iluminação e cocção, especialmente onde há limitações de acesso à eletricidade, como em comunidades na Nigéria, Índia e entre os Amish. No Japão e na Inglaterra, é empregado no aquecimento residencial, enquanto na aviação é valorizado por sua resistência ao congelamento e combustão controlada em altas temperaturas (Crown Oil, 2025).

Cada tipo de querosene possui uma finalidade específica. Não é possível utilizar o querosene destinado a cocção em turbinas aeronáuticas, e vice-versa. As características de cada tipo são regulamentadas por órgãos competentes de cada país, como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) no Brasil, a ASTM International nos Estados Unidos e a British Standards Institution no Reino Unido.

4.2. Definição e composição do QAV

O Querosene de Aviação (QAV) é um combustível utilizado em turbinas aeronáuticas, podendo ser produzido a partir de fontes renováveis ou não renováveis. O querosene de aviação derivado do petróleo é obtido por destilação direta, na faixa de temperatura entre 150 °C a 300 °C, composto predominantemente por hidrocarbonetos parafínicos contendo de 9 a 15 átomos de carbono. Para que apresente desempenho adequado na geração de energia em

turbinas aeronáuticas, sua produção deve atender a diversos requisitos físico-químicos, que envolvem desde a fluidez (facilidade de escoamento) e a estabilidade durante o armazenamento até a eficiência da combustão nestes sistemas. No Brasil, a ANP é o órgão regulador responsável pela especificação dos querosenes de aviação para uso na aviação civil, são eles: JET A, JET A-1 (antigo QAV-1) e JET C (Petrobras, 2024; Cabrera & de Sousa, 2022).

A Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021, estabelece as especificações do querosene de aviação JET A e JET A-1, dos querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C (JET C), bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional (BRASIL, 2021a). O Quadro 1 descreve os agentes econômicos e suas funções.

Quadro 1 - Agentes econômicos que comercializam QAV no Brasil

Agente Econômico	Funções	Empresa
Distribuidor	Pessoa jurídica autorizada para o exercício da atividade de distribuição de combustíveis de aviação, considerada de utilidade pública, que compreende aquisição, armazenamento, transporte, comercialização, controle da qualidade, assistência técnica e abastecimento de aeronaves.	Raízen, Vibra Energia, Air bp.
Importador	Pessoa jurídica que realiza atividade de comércio exterior na modalidade de importação de produto, cuja nomenclatura comum do Mercosul (NCM) está sujeita à anuência prévia da ANP.	Raízen, Vibra Energia, Air bp.
Produtor	Pessoa jurídica autorizada pela ANP a produzir, armazenar e comercializar combustíveis de aviação.	Petrobras, Acelen.
Revendedor	Pessoa jurídica autorizada para o exercício da atividade de revenda de combustíveis de aviação, considerada de utilidade pública, que compreende aquisição, armazenamento, transporte, comercialização a varejo e controle da qualidade desses produtos, assistência técnica ao consumidor e abastecimento de aeronaves.	Air bp, Raízen.

Fonte: Elaboração própria - Adaptado de BRASIL (2021a)

O JET A tem ponto de congelamento máximo de -40°C, já o JET A-1 tem ponto de congelamento máximo de -47°C, ambos são querosenes de origem fóssil e destinados exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves. O JET C é composto pela mistura de um único tipo de JET alternativo com o JET A ou com o JET A-1 (BRASIL, 2021a; Petrobras, 2024). O JET alternativo é um combustível derivado de fontes alternativas, como biomassa, óleos vegetais, gordura animal, gases residuais, resíduos sólidos, carvão e gás

natural, produzido pelos processos que atendam ao estabelecido na Resolução da ANP N° 856/2021 (Petrobras, 2024).

Os querosenes de aviação alternativos abrangidos pela Resolução da ANP N° 856/2021 são: I- o querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT); II- o querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA); III- o querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A); IV- o querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ); V- as isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP); VI- o querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ); e VII- o querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HC-HEFA) (BRASIL, 2021a).

Outro tipo de querosene de aviação é o de alto ponto de fulgor para uso militar pela Marinha do Brasil, especificado pela Resolução ANP N° 895/2022. A diferença básica entre os combustíveis para uso civil (JET A e JET A-1) e uso militar está na maior restrição com relação à presença de compostos leves no de uso militar, de forma a garantir a segurança no manuseio e na estocagem do produto em embarcações (Petrobras, 2024).

4.3. Requisitos de qualidade do QAV

De acordo com a PETROBRAS (2024), as exigências de qualidade do combustível para uso em turbinas aeronáuticas são: Proporcionar máxima autonomia de voo; Proporcionar queima limpa e completa com mínimo de formação de resíduos; Proporcionar partidas fáceis, seguras e com facilidade de reacendimento; Escoar em baixas temperaturas; Ser estável química e termicamente; Não ser corrosivo aos materiais da turbina; Apresentar mínima tendência a solubilização de água; Ter aspecto límpido indicando ausência de sedimentos; Não apresentar água livre para evitar o desenvolvimento de microrganismos e formação de depósitos que possam obstruir filtros; Oferecer segurança no manuseio e estocagem.

As propriedades físico-químicas fundamentais para o desempenho do querosene de aviação em motores aeronáuticos são determinadas por ensaios laboratoriais, cujos limites são estabelecidos pela ANP e organizados, de forma geral, considerando: escoamento a baixa temperatura; estabilidade térmica; combustão; corrosividade e dissolução de elastômeros; presença de água; segurança (Petrobras, 2024).

4.3.1. Escoamento a baixa temperatura

Essa propriedade é determinada pelos ensaios de ponto de congelamento e de viscosidade, cuja finalidade é assegurar que o combustível possa ser bombeado de forma eficiente e apresentar escoamento contínuo durante o voo em altas altitudes, onde a temperatura externa pode atingir valores próximos de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, além de garantir sua adequada dispersão na câmara de combustão. O ponto de congelamento corresponde à temperatura em que os cristais de hidrocarbonetos, formados durante o resfriamento da amostra, desaparecem quando esta é reaquecida sob agitação constante. Já a viscosidade representa a medida da resistência do fluido ao escoamento (Petrobras, 2024).

4.3.2. Estabilidade térmica

Nas aeronaves, o querosene de aviação desempenha não apenas a função de combustível, mas também atua como fluido lubrificante, hidráulico e de arrefecimento. Devido às trocas térmicas envolvidas, sua temperatura pode alcançar até $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, ao retornar ao tanque de armazenamento, pode induzir à degradação térmica do combustível, favorecendo a formação de depósitos. Esses resíduos podem comprometer o fluxo de combustível, reduzir a eficiência da transferência de calor nos trocadores e prejudicar a combustão por meio da obstrução dos injetores. A análise da Estabilidade Térmica consiste em uma técnica laboratorial acelerada, capaz de simular as condições de pressão e temperatura às quais o combustível é exposto na aeronave, assegurando, assim, sua adequada estabilidade térmica (Petrobras, 2024).

4.3.3. Combustão

A qualidade de combustão é verificada por meio das propriedades de poder calorífico, massa específica, ponto de fuligem e teor de aromáticos. O poder calorífico e massa específica garantem que o combustível utilizado produza energia necessária para uma determinada autonomia de voo. Já o ponto de fuligem e teor de aromáticos permitem a geração de uma chama que não ocasione formação significativa de fuligem e de depósitos, preservando a vida útil da câmara de combustão (Petrobras, 2024).

4.3.4. Corrosividade e dissolução de elastômeros

Essas características precisam ser analisadas no querosene de aviação a fim de prevenir danos aos metais do sistema de abastecimento de combustível e aos elastômeros empregados na vedação das conexões. Para esse propósito, realiza-se o ensaio de corrosividade ao cobre, que permite identificar a presença de H_2S (sulfeto de hidrogênio) e de enxofre elementar (S^0) capazes de agredir os metais. Já a suscetibilidade de degradação dos elastômeros é verificada por meio da determinação do teor de enxofre mercaptídico (Petrobras, 2024).

4.3.5. Presença de água

A presença de água no combustível pode gerar diferentes inconvenientes, como a cristalização em temperaturas reduzidas, o favorecimento do desenvolvimento de microrganismos durante o armazenamento e a formação de H_2SO_4 (ácido sulfúrico), responsável por processos corrosivos nos equipamentos (Petrobras, 2024).

4.3.6. Segurança

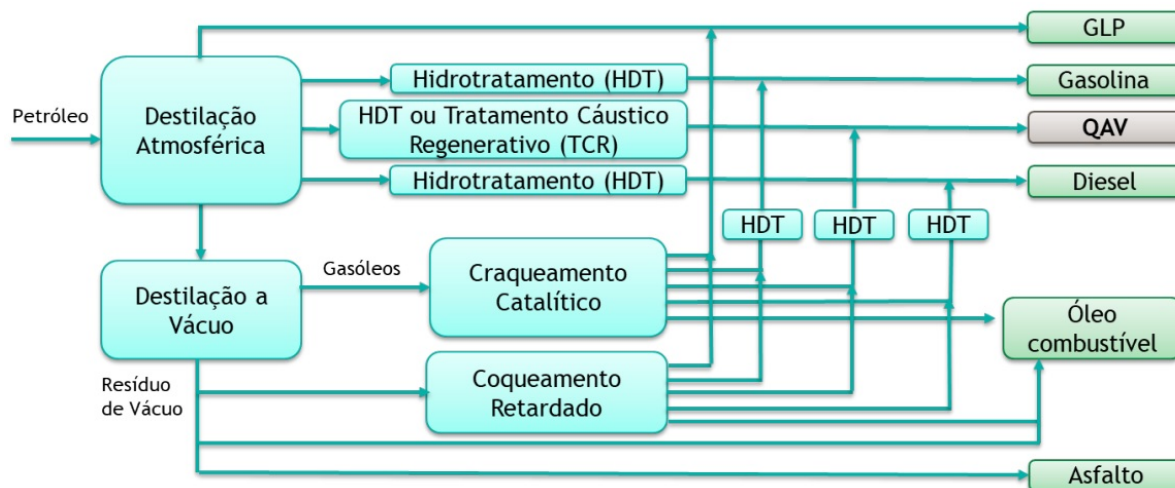
Assim como ocorre com qualquer combustível líquido inflamável, o querosene de aviação requer a adoção de práticas básicas de segurança, tais como o aterramento dos equipamentos durante o bombeamento (a fim de evitar a formação de cargas estáticas), a operação em ambientes ventilados (para reduzir a concentração de vapores combustíveis) e a utilização em locais isentos de fontes de ignição (como faíscas e chamas abertas). Uma análise de laboratório que especifica o limite de risco de inflamabilidade do combustível (teor de compostos leves) é o ponto de fulgor, que assegura o manuseio e estocagem do produto (Petrobras, 2024).

4.4. Produção convencional de QAV

O querosene de aviação derivado do petróleo é feito usando como processo de refino a destilação atmosférica seguida de tratamento de acabamento (hidrotratamento ou cáustico regenerativo). Também pode adotar correntes provenientes do craqueamento catalítico e do

coqueamento retardado, após passar por um hidrotratamento (Petrobras, 2024). A Figura 1 ilustra esse processo.

Figura 1 - Esquema de produção de querosene de aviação



Fonte: PETROBRAS (2024)

4.5. Impacto ambiental do QAV convencional

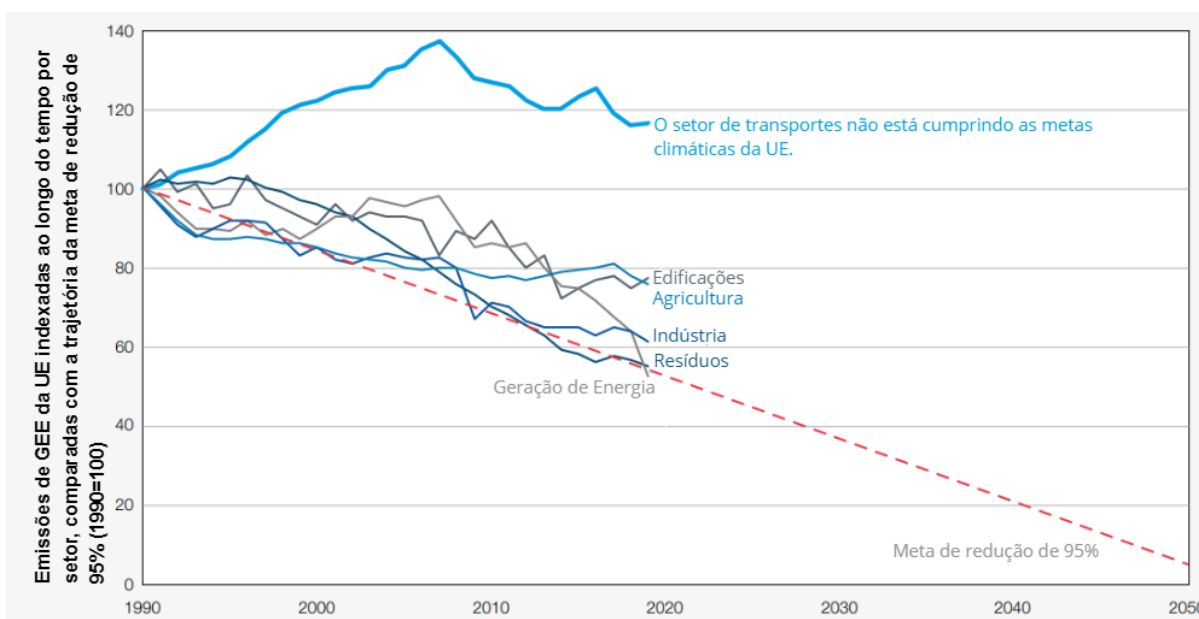
A atividade humana tem contribuído para a elevação da temperatura média do planeta. Em razão disso, o efeito estufa, que antes desempenhava um papel importante na manutenção das condições de vida na Terra, passou a representar uma ameaça à sobrevivência humana. Entre as principais consequências desse fenômeno, destacam-se o alagamento de cidades costeiras, a transformação de áreas férteis em regiões áridas, o derretimento de geleiras e o aumento na frequência e intensidade de furacões destrutivos (Iberdrola, 2026).

Segundo o sanitarista Franco Netto (2025), a mudança do clima resulta do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e na superfície terrestre, o que provoca o aumento da temperatura global. O principal fator responsável por esse processo é o uso excessivo de combustíveis fósseis para geração de energia, a fim de atender às demandas das sociedades atuais e seus padrões de consumo. Estudos indicam que cerca de 3,6 bilhões de pessoas já vivem em áreas altamente vulneráveis às mudanças climáticas. Além disso, entre 2030 e 2050, estima-se que esses impactos possam causar aproximadamente 250 mil mortes adicionais por ano, associadas a problemas como desnutrição, malária, diarreia e estresse térmico.

A aviação ocupa uma posição delicada no grande esquema da luta contra as mudanças climáticas. Dados de 2018 indicam que o setor é responsável por cerca de 2,5% das emissões globais de dióxido de carbono e 3,5% do aquecimento global se as contribuições não-CO₂ também forem contabilizadas (Ritchie, 2024 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Em 2019, as emissões da combustão de querosene de jato atingiram um novo recorde histórico de 1027 MtCO₂ e embora esses números representem apenas 12% das emissões de CO₂ para a indústria de transporte combinado, a aviação é amplamente vista como o setor mais difícil de descarbonizar seja visto de um ponto de vista tecnológico ou econômico (IEA, 2022 ; ATAG, 2022 ; Searle et al., 2019 apud Cabrera & de Sousa, 2022).

O Acordo de Paris, resultante da Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas de 2015 (COP 21), estabeleceu a meta de limitar o aumento da temperatura média global a “bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais” e almejar 1,5 °C (ONU, 2015 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Desde então, os governos aumentaram os esforços no desenvolvimento de seus próprios planos para contribuir para o objetivo comum, enquanto a maioria das metas atuais geralmente não está sendo cumprida, o transporte ainda está mais atrasado quando comparado a outros setores que estão progredindo em um ritmo mais rápido em seus esforços de descarbonização, com números da União Europeia mostrando que está especialmente fora do curso para atingir as metas climáticas propostas, como mostra a Figura 2 (World Economic Forum, 2020 apud Cabrera & de Sousa, 2022).

Figura 2 - Emissões setoriais de GEE na UE e trajetória da meta de redução de 95%



Fonte: Adaptado de World Economic Forum (2020) apud Cabrera & de Sousa (2022)

Os estados-membros da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) adotaram o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) e a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) aprovou uma resolução na qual suas companhias aéreas associadas se comprometem a trabalhar para emissões líquidas zero de carbono até 2050 (ICAO, 2019 ; IATA, 2022a apud Cabrera & de Sousa, 2022).

Estudos mostram que o SAF pode diminuir as emissões de carbono do ciclo de vida em até 80%, ao mesmo tempo em que reduz as emissões de outros poluentes, como fuligem, óxidos de enxofre e partículas ultrafinas, além de mitigar o impacto climático das esteiras de condensação. No entanto, as taxas de mistura para vias certificadas permitem apenas entre 5 e 50% de mistura, dependendo do processo de conversão. Isso se deve ao uso de anéis de vedação de nitrila, que exigem um mínimo de 8% no nível de conteúdo aromático no combustível para funcionar corretamente, um nível que o SAF puro inicial não atendia. Melhorias recentes, tanto nos processos de conversão de SAF quanto nos novos anéis de vedação feitos de fluorcarbonos que não requerem o mesmo conteúdo aromático no combustível, podem levar a mudanças na regulamentação em um futuro próximo (Air bp, 2022; Gaspar & Souza, 2016; BAAQMD, 2020; Narciso & de Souza, 2021; Chevron, 2006; Button, 2021 apud Cabrera & de Sousa, 2022).

Em 2008, o Grupo de Usuários de Combustível de Aviação Sustentável (SAFUG) foi formado, e o primeiro voo de teste usando uma mistura de combustível convencional e biocombustível foi realizado pela Virgin Atlantic (Climate Solutions, 2015 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Desde então, os primeiros SAFs foram aprovados para uso comercial e, até 2019, mais de um quarto de milhão de voos SAF foram realizados por mais de 45 companhias aéreas comerciais, embora o uso atual ainda represente menos de 0,1% do consumo de querosene de jato (IATA, 2022b; IEA, 2022 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Em dezembro de 2021, a United Airlines realizou um voo de demonstração bem-sucedido usando 100% de SAF em um de seus motores (General Electric, 2021 apud Cabrera & de Sousa, 2022). A IEA (2025) destacou avanços significativos rumo ao alinhamento da aviação com as metas de redução de CO₂, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Progressos notáveis para reduzir as emissões de CO₂ na aviação

País / Organização	Avanço	Ano
Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO)	Os 193 estados membros da ICAO adotaram, em 2022 a LTAG de emissões líquidas zero de carbono na aviação internacional até 2050.	2022
Estados Unidos	Em 2022, os Estados Unidos anunciaram importantes créditos fiscais e um programa competitivo de subsídios no âmbito da Lei de Redução da Inflação (IRA), concedendo até US\$ 1,75 por galão de SAF produzido, com o objetivo de atingir as metas de 3 e 35 bilhões de galões por ano até 2030 e 2050, respectivamente. Até 2024, US\$ 245 milhões em subsídios haviam sido anunciados por meio da IRA, e o Departamento de Energia emitiu quase US\$ 3 bilhões em garantias de empréstimo para ampliar a produção de SAF.	2022
União Europeia	Em 2023, a União Europeia adotou o ReFuelEU Aviation, que exige percentagens mínimas de mistura de combustível de aviação sustentável (SAF) até 2050, com metas específicas para combustíveis sintéticos.	2023
Brasil	Em 2024, o Brasil adotou a lei Combustível do Futuro, que exige que as empresas de combustíveis reduzam as emissões de gases de efeito estufa de voos domésticos em 1% em 2027, aumentando para 10% em 2037, por meio do uso de combustíveis sustentáveis.	2024

Fonte: Elaboração própria - Adaptado de IEA (2025)

Existem várias áreas de foco diferentes que permitem reduzir a produção de GEE da indústria, mas cada uma tem diferentes níveis de potencial. Otimizar rotas de voo para emissões mínimas em vez de custos, melhorar cronogramas de manutenção e outras medidas operacionais, bem como introduzir mais avanços em materiais de redução de peso e tecnologias relacionadas (IEA, 2025; Timperley, 2021 apud Cabrera & de Sousa, 2022), trazem contribuições importantes para diminuir as emissões e não devem ser negligenciadas, mas são claramente insuficientes. Os ganhos em eficiência de combustível representam a melhoria mais significativa nas últimas décadas, com a geração atual de aeronaves sendo 20% mais eficiente do que a geração anterior e 85% a mais do que as da década de 1960 (IEA, 2022 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Portanto, é claro que, para atingir os resultados necessários, torna-se essencial reduzir e, eventualmente, acabar com a dependência da aviação comercial em combustíveis fósseis (Cabrera & de Sousa, 2022).

Aeronaves movidas a hidrogênio e bateria, como alternativas, são sustentadas por eventuais avanços que podem superar as barreiras tecnológicas atuais, mas mesmo ignorando que essas opções exigiriam grandes mudanças de projeto nas aeronaves, e dados os lentos ciclos de renovação da frota (Scheelhaase et al., 2019 apud Cabrera & de Sousa, 2022), o

nível de implementação de curto prazo necessário seria muito caro para as empresas. Portanto, essas tecnologias são viáveis apenas como soluções de longo prazo (Cabrera & de Sousa, 2022). Alternativas drop-in — que são bio-hidrocarbonetos idênticos aos seus equivalentes fósseis, em termos de estrutura química (IEA Bioenergy, 2019). Então não há necessidade de qualquer mudança nos motores — ao querosene de jato convencional surgem como a melhor escolha de curto e médio prazo, com diferentes caminhos para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação já sendo certificados para uso comercial até níveis de mistura específicos. Atualmente, as matérias-primas biogênicas são as mais utilizadas, mas a sustentabilidade representa um grande obstáculo para aplicações em larga escala e, portanto, as opções de Energia-para-Líquidos (PtL) podem se apresentar como uma solução melhor. No entanto, as últimas são atualmente muito caras em comparação com as primeiras, e outros métodos, como o uso de energia solar, ainda estão nas fases iniciais de desenvolvimento (Cabrera & de Sousa, 2022).

5. COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF)

5.1. Definição do SAF

Embora não haja uma definição universalmente aceita de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), é mais comumente usada para descrever uma ampla gama de alternativas de querosene drop-in que podem ser produzidas a partir de uma variedade de matérias-primas (Berger, 2020 apud Cabrera & de Sousa, 2022), embora a ICAO apresente uma definição mais geral para SAF como combustíveis de aviação alternativos que atendem a critérios de sustentabilidade definidos (ICAO, 2025a). Cabrera & de Souza (2022), classificam SAF em duas categorias, são elas: Biocombustíveis e Combustíveis sintéticos.

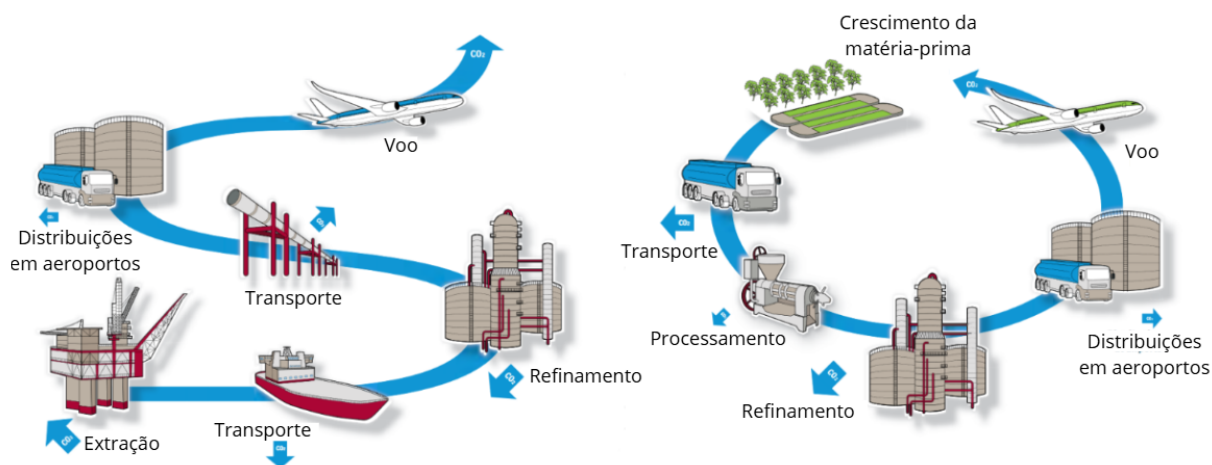
5.2. Tipos de SAF

5.2.1. Biocombustíveis

Biocombustíveis são combustíveis alternativos que podem ser produzidos a partir de qualquer material renovável ou matéria-prima à base de carbono. Como as plantas são as fontes mais comuns para a produção de biocombustíveis, as emissões associadas ao ciclo de vida do carbono podem ser significativamente reduzidas, pois parte do CO₂ será reabsorvida pela próxima geração de culturas (ATAG, 2011 apud Cabrera & de Sousa, 2022). A Figura 3 mostra uma comparação das emissões do ciclo de vida do carbono entre o combustível de aviação fóssil e o bio SAF.

Matérias-primas adequadas para SAF proveniente de biocombustíveis podem ser agrupadas em quatro categorias: óleo, açúcar, amido e matérias-primas lignocelulósicas (ICAO, 2017 apud Cabrera & de Sousa, 2022). Cada categoria requer diferentes tipos de rotas de pré-tratamento e tipos de processos de conversão. Às vezes, resíduos de atividades antropogênicas, especialmente subprodutos industriais, também podem ser considerados como uma categoria de matéria-prima (CAAFI, 2022a apud Cabrera & de Sousa, 2022).

Figura 3 - Diagrama do ciclo de vida do carbono para combustível de aviação fóssil (esquerda) e biocombustível sustentável (direita).



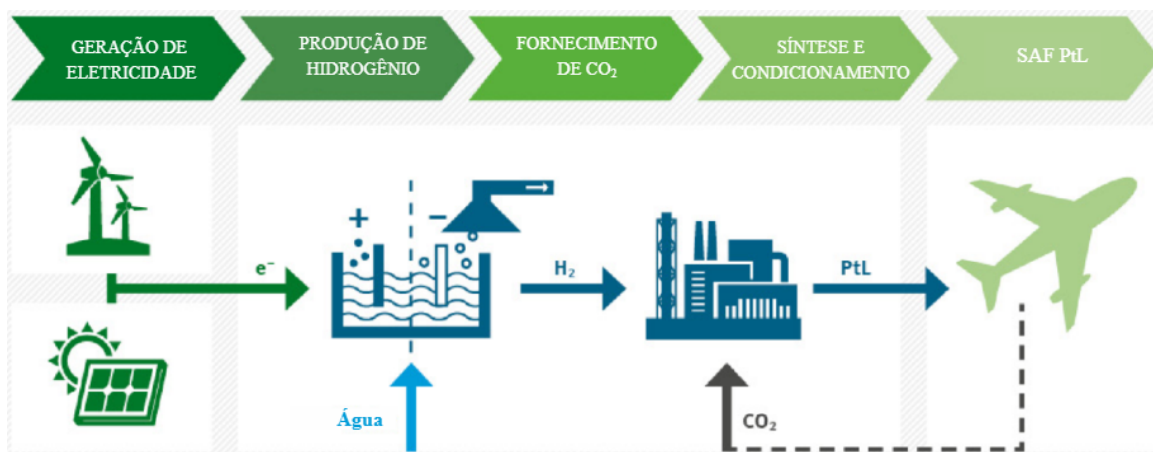
Fonte: Adaptado de ATAG (2017) apud Cabrera & de Sousa (2022)

5.2.2. Combustíveis sintéticos

Ao contrário dos biocombustíveis, os combustíveis sintéticos ou e-fuels não dependem de biomassa para produzir hidrocarbonetos líquidos. Isso significa que questões de sustentabilidade adjacentes à produção em larga escala de bio-matérias-primas renováveis, como disputas de uso da terra ou problemas éticos e econômicos de alimentos-rações-combustíveis seriam significativamente evitadas (Searle et al., 2019 apud Cabrera & de Souza, 2022), o que por sua vez implica que, embora a pesquisa não esteja tão avançada quanto o caso dos bio SAFs, os e-fuels podem se tornar a melhor escolha para esforços de descarbonização de curto e médio prazo (Cabrera & de Souza, 2022).

De acordo com Cabrera & de Souza (2022), a produção de e-fuels baseia-se no processo de obtenção de gás de síntese (syngas) por meio da combinação de hidrogênio verde com CO₂ capturado de fontes concentradas ou diretamente do ar. O processo PtL (Figura 4) depende da eletrólise da água com “eletricidade verde” para a produção de hidrogênio e é o que está mais próximo de estar pronto para aplicações mais amplas na distribuição de e-fuels. No entanto, avanços recentes na tecnologia termoquímica solar levaram ao desenvolvimento de uma rota alternativa — o processo sun-to-liquid —, que ainda se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento.

Figura 4 - Estágios genéricos de produção de PtL.



Fonte: Adaptado de German Environment Agency (2016) apud Cabrera & de Sousa (2022)

5.3. Tecnologias aprovadas pela ASTM para produzir SAF

A ASTM International é uma organização líder mundial na criação de normas técnicas voluntárias, com mais de 12.500 normas aplicadas globalmente para melhorar a qualidade, segurança e confiança dos consumidores. Sua atuação conta com mais de 30 mil especialistas de 140 países, que colaboram em um processo aberto e transparente para desenvolver métodos, especificações e guias que apoiam indústrias e governos em todo o mundo. Sua sede fica no distrito de West Conshohocken, Pensilvânia, Estados Unidos (ASTM International, 2025).

Em julho de 2023, a ASTM International reconheceu 11 tecnologias de conversão aprovadas para a produção de SAF, cada uma associada a matérias-primas específicas e limites máximos de mistura estabelecidos (ICAO, 2025b). A Tabela 1 apresenta um panorama geral desses processos e suas respectivas matérias-primas.

Tabela 1 - Processos de conversão aprovados pela ASTM

(continua)

Referência ASTM	Processo de conversão	Abreviação	Possíveis matérias-primas	Proporção Máxima de Mistura
ASTM D7566 Annex A1	Querosene Parafínico Sintético Hidroprocessado Fischer-Tropsch	FT	Carvão, gás natural, biomassa	50%

Tabela 1 - Processos de conversão aprovados pela ASTM

(continua)

Referência ASTM	Processo de conversão	Abreviação	Possíveis matérias-primas	Proporção Máxima de Mistura
ASTM D7566 Annex A2	Querosene Parafínico Sintetizado a partir de Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados	HEFA	Óleos vegetais, gorduras animais, óleos de cozinha usados	50%
ASTM D7566 Annex A3	Iso-parafinas sintetizadas a partir de açúcares fermentados hidroprocessados	SIP	Biomassa utilizada para produção de açúcar	10%
ASTM D7566 Annex A4	Querosene sintetizado com aromáticos derivados por alquilação de aromáticos leves de fontes não petrolíferas	FT-SKA	Carvão, gás natural, biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A5	Querosene parafínico sintético de álcool para jato	ATJ-SPK	Etanol, isobutanol e isobuteno de biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A6	Combustível de aviação por hidrotermólise catalítica	CHJ	Óleos vegetais, gorduras animais, óleos de cozinha usados	50%
ASTM D7566 Annex A7	Querosene parafínico sintetizado a partir de hidrocarbonetos — ésteres e ácidos graxos hidroprocessados	HC-HEFA-SPK	Algas	10%
ASTM D7566 Annex A8	Querosene Parafínico Sintético com Aromáticos	ATJ-SKA	Álcoois C2-C5 de biomassa	-
ASTM D1655 Annex A1	Co-hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos em uma refinaria de petróleo convencional	-	Óleos vegetais, gorduras animais, óleos de cozinha usados provenientes de biomassa processada com petróleo	5%

Tabela 1 - Processos de conversão aprovados pela ASTM

(conclusão)

Referência ASTM	Processo de conversão	Abreviação	Possíveis matérias-primas	Proporção Máxima de Mistura
ASTM D1655 Annex A1	Co-hidroprocessamento de hidrocarbonetos de Fischer-Tropsch em uma refinaria de petróleo convencional	-	Hidrocarbonetos Fischer-Tropsch coprocessados com petróleo	5%
ASTM D1655 Annex A1	Co-processamento de HEFA	-	Ésteres/ácidos graxos hidroprocessados de biomassa	10%

Fonte: Adaptado de ICAO (2025b)

5.4. Tecnologias aprovadas no Brasil para produzir SAF

No Brasil a Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021, estabelece as especificações dos querosenes de aviação alternativos. Ela aprovou 7 tecnologias de conversão para a produção de SAF (BRASIL, 2021a).

5.4.1. Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT)

O processo consiste em uma reação termoquímica catalisada na qual uma mistura gasosa purificada de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) — conhecida como “gás de síntese” ou “syngas” — é convertida em uma combinação líquida e gasosa de cadeias de hidrocarbonetos de diferentes comprimentos, usando um reator com catalisador de cobalto ou ferro. Em seguida, ocorre um estágio de refinamento, onde o produto enfrenta hidrocrackeamento e isomerização, antes da destilação ocorrer, com um dos produtos finais sendo um querosene parafínico sintetizado (SPK) com características semelhantes ao combustível de aviação comercial (Cabrera & de Sousa, 2022).

5.4.2. Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA)

O HEFA transforma óleo de lipídios em hidrocarbonetos por um processo de quatro estágios. O primeiro estágio consiste na purificação do material biogênico. Em seguida, o óleo passa por um estágio de desoxigenação, por meio de uma reação química usando hidrogênio e catalisadores (hidrodesoxigenação). Outras moléculas menos desejáveis também são removidas neste estágio. Os hidrocarbonetos resultantes são então craqueados e isomerizados, até que comprimentos de cadeia que produzem as especificações desejadas sejam alcançados. Finalmente, ocorre a destilação, e os produtos finais são separados, com o combustível de jato obtido sendo designado por HEFA-SPK (Cabrera & de Sousa, 2022).

5.4.3. Querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A)

Usa o mesmo processo de síntese FT, mas também inclui a alquilação de aromáticos leves, principalmente benzeno, o que resulta em que o hidrocarboneto do produto final tem um conteúdo aromático, tornando-o mais compatível com os motores atuais em relação à prevenção de vazamento de combustível. Embora atualmente esse processo também possa ser usado apenas em misturas de até 50%, ele tem o maior potencial de ter esse valor aumentado no futuro, com probabilidade de eventualmente ser certificado para substituição de combustível convencional de 100% (Berger, 2020; CAAFI, 2022b; International PtX Hub, 2022; SKYNRG, 2022; IATA, 2020 apud Cabrera & de Sousa, 2022).

5.4.4. Querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ)

Após a conclusão dos procedimentos de pré-tratamento de matéria-prima necessários, as moléculas de álcool passam por uma sequência de processos, começando com a desidratação (eliminação de água), seguida pela oligomerização (criação de moléculas mais complexas) e hidrogenação (adição de hidrogênio). A destilação é a etapa final, produzindo um combustível de hidrocarboneto para jato, entre outros subprodutos, como o diesel (Cabrera & de Sousa, 2022).

5.4.5. Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP)

Essa via metabólica depende de uma conversão bioquímica, na qual uma plataforma biológica (leveduras ou microrganismos modificados) é utilizada para converter açúcares em hidrocarbonetos, especificamente um alceno C15 com quatro ligações duplas chamado farneseno, por meio de fermentação. Em seguida, o hidroprocessamento o converte no respectivo alceno, o farnesano, que é posteriormente destilado para obtenção de combustível de aviação. Outros produtos, como traços de farneseno residual e olefinas (farneseno parcialmente hidrogenado), também podem estar presentes no produto final (Cabrera & de Sousa, 2022).

5.4.6. Querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ)

A primeira etapa desse processo de conversão é uma hidrotermólise catalítica, que nomeia toda a via. Aqui, ésteres de ácidos graxos e ácidos graxos livres são combinados com água de alimentação pré-aquecida e, em seguida, passados para o reator CH onde, em condições de alta temperatura e pressão, o óleo é convertido em n-parafinas, iso-parafinas, cicloparafinas e compostos aromáticos. Após um hidrotratamento subsequente para saturar olefinas residuais e remover oxigenados residuais, o material é destilado e fracionado nos produtos finais, que incluem querosene (Cabrera & de Sousa, 2022).

5.4.7. Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPKHCEFA).

Funciona de forma semelhante ao processo HEFA, começando com hidrodessoxigenação, seguido por craqueamento e isomerização. A diferença está em que, diferentemente dos ácidos graxos ou ésteres de ácidos graxos encontrados na produção de HEFA, esta adição descreve o hidroprocessamento de hidrocarbonetos bioderivados obtidos de óleos encontrados em uma alga específica (*Botryococcus braunii*), a única fonte de matéria-prima para este processo de conversão (CAAFI, 2022b; PtX Hub, 2022; SKYNRG, 2022; IATA, 2020; Green Car Congress, 2020 apud Cabrera & de Sousa, 2022).

6. OS QUATRO PILARES DA ESTRUTURA GLOBAL DA ICAO PARA SAF, LCAF E OUTRAS ENERGIAS MAIS LIMPAS PARA A AVIAÇÃO

A Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), uma agência da Organização das Nações Unidas (ONU), promove a cooperação entre 193 nações para o uso compartilhado e benéfico do espaço aéreo. Desde 1944, sua atuação diplomática e técnica foi fundamental para criar uma rede aérea global ágil e segura. Esta rede conecta pessoas, culturas e negócios mundialmente, impulsionando o desenvolvimento sustentável e a prosperidade socioeconômica em todas as regiões alcançadas pelo transporte aéreo (ICAO, 2025c).

A ICAO e seus Estados-membros são incentivados a cooperar na busca por uma meta aspiracional global de longo prazo para a aviação internacional (LTAG) de emissões líquidas zero de carbono até 2050. Este objetivo está alinhado com o Acordo de Paris. É reconhecido, porém, que a capacidade de cada país de contribuir dentro de seu próprio cronograma nacional dependerá de suas circunstâncias individuais, como seu nível de desenvolvimento, maturidade do mercado de aviação, necessidade de crescimento sustentável e prioridades nacionais (ICAO, 2023).

Os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) e outras energias limpas são considerados a principal solução para descarbonizar o setor aéreo até 2050. No entanto, embora os esforços para desenvolvê-los estejam aumentando, a produção atual é mínima, representando apenas 0,2% do total de combustível consumido. Diante disso, é crucial uma ação global imediata para acelerar massivamente a produção e adoção dessas alternativas (ICAO, 2023).

Atualmente, a produção de SAF e outras energias limpas está concentrada em poucos países. O objetivo da estrutura global é destacar as vantagens de descentralizar essa produção, distribuindo-a de forma mais equilibrada entre todas as nações e regiões. Isso garantirá que todos tenham uma oportunidade justa e equitativa de participar de toda a cadeia de valor, desde o fornecimento da matéria-prima até a produção e o consumo do combustível. Como nenhuma única fonte de energia será suficiente para atingir a meta de emissões zero de longo prazo, a estrutura precisa ser flexível e inclusiva, aceitando qualquer fonte, rota tecnológica, matéria-prima ou tecnologia que cumpra os critérios de sustentabilidade definidos pelo CORSIA (ICAO, 2023).

O Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) é o primeiro esquema global baseado no mercado aplicável a um setor. Ele complementa outros esforços de redução de emissões no setor da aviação, como inovações

tecnológicas, melhorias operacionais e combustíveis de aviação sustentáveis, para atingir a meta ambiciosa da ICAO de crescimento neutro em carbono (ICAO, 2025d). O CORSIA será implementado em três fases: uma fase piloto (2021-2023), uma primeira fase (2024-2026) e uma segunda fase (2027-2035). Nas duas primeiras fases (2021-2026), a participação é voluntária. A partir de 2027, a participação será determinada com base nos dados do RTK (Receita Toneladas-Quilômetros) de 2018 (ICAO, 2025e).

Os cinco Elementos de Implementação do CORSIA listados no Quadro 3 estão refletidos em 14 documentos da ICAO, eles são essenciais para a implementação do CORSIA (ICAO, 2025f).

Quadro 3 - Elementos de implementação do CORSIA

(continua)

Elementos de implementação do CORSIA da ICAO	Documentos da ICAO
1. Estados CORSIA para pares de estados do Capítulo 3	1. Estados CORSIA para pares de estados do Capítulo 3
2. Ferramenta de Estimativa e Relatório de CO ₂ CORSIA da ICAO (CERT)	2. Ferramenta de estimativa e relatório de CO ₂ CORSIA da ICAO
3. Combustíveis elegíveis para CORSIA	3. Estrutura de Elegibilidade CORSIA e Requisitos para Esquemas de Certificação de Sustentabilidade 4. Esquemas de Certificação de Sustentabilidade Aprovados CORSIA 5. Critérios de Sustentabilidade CORSIA para Combustíveis Elegíveis CORSIA 6. Valores Padrão de Emissões do Ciclo de Vida CORSIA para Combustíveis Elegíveis CORSIA 7. Metodologia CORSIA para Cálculo de Valores Reais de Emissões do Ciclo de Vida
4. Unidades de emissões elegíveis para CORSIA	8. Unidades de Emissões Elegíveis para CORSIA 9. Critérios de Elegibilidade para Unidades de Emissões CORSIA

Quadro 3 - Elementos de implementação do CORSIA

(conclusão)

Elementos de implementação do CORSIA da ICAO	Documentos da ICAO
5. Registro Central do CORSIA (CCR)	10. Registro Central do CORSIA: Informações e Dados para a Implementação do CORSIA 11. Atribuições do Operador de Aeronaves do CORSIA para o Estado 12. Emissões do CORSIA 2020 13. Fator de Crescimento Setorial Anual (SGF) do CORSIA 14. Registro Central do CORSIA (CCR): Informações e Dados para Transparência

Fonte: Elaboração própria - Adaptado de ICAO (2025f)

A ICAO está trabalhando para facilitar o desenvolvimento e a implantação de SAF por meio dos quatro blocos de construção da Estrutura Global da ICAO para SAF, LCAF e outras Energias Mais Limpas da Aviação, são eles: 1- Política e Planejamento, 2- Quadros Regulatórios, 3- Apoio à Implementação e 4- Financiamento. Esses blocos são interconectados e precisam avançar em conjunto para cumprir sua finalidade (ICAO, 2025a). A implementação do quadro global deve ser continuamente monitorada e periodicamente revisada por meio do inventário anual da ICAO e da convocação da CAAF/4 (Conferência sobre Aviação e Combustíveis Alternativos) até 2028 (ICAO, 2023).

6.1. Política e planejamento

De acordo com ICAO (2023), para apoiar o alcance da LTAG, a ICAO e seus Estados-membros buscam atingir uma Visão aspiracional global coletiva de reduzir as emissões de CO₂ da aviação internacional em 5% até 2030, por meio do uso de SAF, LCAF e outras energias limpas. A Visão é um esforço colaborativo que requer ações de diferentes partes interessadas. Os Estados devem incentivar que os atores relevantes (operadores de aeronaves, aeroportos, fabricantes de aeronaves e motores, produtores de combustíveis, esquemas de certificação de sustentabilidade aprovados pela ICAO e organismos de padronização de combustíveis) planejem, desenvolvam e implementem suas próprias ações para ajudar a alcançar a Visão, conforme apropriado, incluindo:

Operadores de aeronaves:

- Priorizar a negociação, cooperação e compra comercial de SAF, LCAF e outras energias limpas para aviação;
- Facilitar o acesso de passageiros, transportadores de carga aérea e empresas que desejem voluntariamente reduzir sua pegada de viagem aérea por meio da compra de SAF, LCAF e outros combustíveis limpos;
- Implementar medidas para aumentar a compatibilidade de suas frotas com o uso de SAF.

Aeroportos:

- Planejar e executar mudanças na infraestrutura aeroportuária necessárias para garantir o fornecimento eficiente e o acesso a combustíveis drop-in;
- Em colaboração com operadores aéreos, produtores de combustíveis e outras partes interessadas, explorar formas inovadoras de compartilhar os custos dessas mudanças de infraestrutura ao longo da cadeia de valor.

Fabricantes de aeronaves, motores e produtores de combustíveis:

- Acelerar os trabalhos para garantir que a compatibilidade com 100% de SAF seja viável em novas aeronaves, aeronaves em produção e existentes, assim que for considerado seguro fazê-lo e em consonância com seus compromissos anunciados;
- Inovar para compreender e maximizar as oportunidades oferecidas por outras fontes de energia mais limpas no longo prazo.

Produtores de combustíveis:

- Promover inovação e investimento em SAF, LCAF e outras energias limpas para a aviação;
- Demonstrar prontidão tecnológica, escalabilidade e sustentabilidade desses combustíveis em conformidade com os requisitos do CORSIA.

Esquemas de certificação de sustentabilidade aprovados pela ICAO:

- Acelerar a certificação de sustentabilidade dos SAF, LCAF e outras energias limpas qualificadas, em conformidade com os requisitos do CORSIA.

Organismos de padronização de combustíveis, em especial a ASTM:

- Trabalhar com todas as partes interessadas para acelerar a qualificação e a aprovação de rotas adicionais de produção de combustíveis.

6.2. Estrutura regulatória

Com o objetivo de proporcionar transparência, segurança, estabilidade regulatória e garantias de integridade ambiental para produtores de matérias-primas, produtores de combustíveis e instituições financeiras, os critérios de sustentabilidade do CORSIA, a certificação de sustentabilidade e a metodologia de avaliação de emissões no ciclo de vida usados para os “combustíveis elegíveis ao CORSIA” devem ser adotados como a base aceita para determinar a elegibilidade de SAF, LCAF e outras energias limpas utilizadas na aviação internacional (ICAO, 2023).

Operadores de aeronaves que desejam declarar reduções de emissões com o uso de combustíveis elegíveis pelo CORSIA podem usar valores reais ou padrão de emissões no ciclo de vida. Para usar valores reais, é necessário comprovar a metodologia usada por meio de um fornecedor de combustível e um esquema de certificação de sustentabilidade aprovado pela ICAO. O esquema garante que os dados sobre emissões de gases de efeito estufa sejam corretamente calculados e registrados. O resultado final é medido em gramas de CO₂ equivalente por megajoule de combustível (gCO₂e/MJ). O documento “Metodologia CORSIA para Cálculo de Valores Reais de Emissões do Ciclo de Vida” da ICAO detalha esse processo (CORSIA, 2025g).

Os seguintes Esquemas de Certificação de Sustentabilidade, demonstrados no Quadro 4, são aprovados pelo Conselho da ICAO por atenderem aos requisitos incluídos no documento da ICAO “Estrutura de Elegibilidade CORSIA e Requisitos para Esquemas de Certificação de Sustentabilidade” e são elegíveis para certificar operadores econômicos de combustível elegíveis para o CORSIA quanto à conformidade com o documento da ICAO “Critérios de Sustentabilidade CORSIA para combustíveis elegíveis para o CORSIA” e para garantir que a metodologia definida no documento da ICAO “Metodologia CORSIA para Cálculo de Valores Reais de Emissões do Ciclo de Vida” tenha sido aplicada corretamente (CORSIA, 2024).

O Quadro 5 elucida os critérios de sustentabilidade CORSIA aplicáveis a lotes de combustível de aviação sustentável CORSIA produzidos por um produtor de combustível certificado em ou após 1 de janeiro de 2024.

Quadro 4 - Certificações de sustentabilidade reconhecidas pela CORSIA.

Nome do Esquema de Certificação de Sustentabilidade	Data de aprovação	Âmbito de aprovação
International Sustainability and Carbon Certification (ISCC) ¹	16 jun. 2023	Certificação de Combustíveis Sustentáveis para Aviação CORSIA operadores econômicos abrangidos pelos Capítulos 1 e 2 do documento da ICAO “Critérios de Sustentabilidade CORSIA para combustíveis elegíveis CORSIA”
Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) ²	16 jun. 2023	Certificação de Combustíveis Sustentáveis para Aviação CORSIA operadores econômicos abrangidos pelos Capítulos 1 e 2 do documento da ICAO “Critérios de Sustentabilidade CORSIA para combustíveis elegíveis CORSIA”
ClassNK SCS ³	28 out. 2024	Certificação de Combustíveis Sustentáveis para Aviação CORSIA operadores econômicos abrangidos pelo Capítulo 2 do documento da ICAO “Critérios de Sustentabilidade CORSIA para combustíveis elegíveis CORSIA”

Fonte: Adaptado de ICAO (2025d)

Quadro 5 - Critérios de sustentabilidade CORSIA

(continua)

Tema	Princípio
Gases de efeito estufa (GEE)	O CORSIA SAF deve gerar menores emissões de carbono ao longo do ciclo de vida.
Estoque de carbono	O CORSIA SAF não deve ser feito de biomassa obtida de sistemas terrestres/aquáticos com alto estoque de carbono biogênico.
Permanência na redução das emissões de gases de efeito estufa	As reduções de emissões atribuídas ao CORSIA SAF devem ser permanentes.
Água	A produção de CORSIA SAF deve manter ou melhorar a qualidade e a disponibilidade da água.
Solo	A produção de CORSIA SAF deve manter ou melhorar a saúde do solo.
Ar	A produção do CORSIA SAF deve minimizar os efeitos negativos na qualidade do ar.

¹ <https://iscc-system.org/>

² <https://rsb.org/>

³ <https://www.classnk.or.jp/hp/en/>

Quadro 5 - Critérios de sustentabilidade CORSIA

(conclusão)

Tema	Princípio
Conservação	A produção de CORSIA SAF deve manter a biodiversidade, o valor de conservação e os serviços ecossistêmicos.
Resíduos e produtos químicos	A produção do CORSIA SAF deve promover a gestão responsável de resíduos e o uso de produtos químicos.
Impactos sísmicos e vibracionais	A produção do CORSIA SAF deve minimizar os impactos sísmicos, acústicos e vibracionais do CCS (Captura e Armazenamento de Carbono).
Direitos humanos e trabalhistas	A produção do CORSIA SAF deve respeitar os direitos humanos e trabalhistas.
Direitos de uso da terra e uso da terra	A produção do CORSIA SAF deve respeitar os direitos à terra e os direitos de uso da terra, incluindo direitos indígenas e/ou consuetudinários.
Direitos de uso da água	A produção do CORSIA SAF deve respeitar os direitos formais ou consuetudinários anteriores de uso da água.
Desenvolvimento local e social	A produção do CORSIA SAF deve contribuir para o desenvolvimento social e econômico em regiões de pobreza.
Segurança alimentar	A produção de CORSIA SAF deve promover a segurança alimentar em regiões com insegurança alimentar.

Fonte: Adaptado de ICAO (2025h)

6.3. Suporte à implementação

O Programa ICAO ACT-SAF⁴ está apoiando os Estados no desenvolvimento de todo o seu potencial em SAF, por meio de atividades de treinamento específicas, elaboração de estudos de viabilidade e outras iniciativas de apoio à implementação. A Série de Eventos ICAO ACT-SAF⁵ está oferecendo treinamento abrangente aos Parceiros do ACT-SAF sobre uma variedade de temas importantes relacionados aos SAFs, abrangendo desde sustentabilidade, políticas, economia/financiamento, certificação e logística. Todas as

⁴ <https://www.icao.int/ACT-SAF>

⁵ <https://www.icao.int/environmental-protection/ACT-SAF-Series>

apresentações estão disponíveis para download; os treinamentos podem ser assistidos na ICAO.TV⁶ e no YouTube⁷ (ICAO, 2025a).

6.4. Financiamento

O ICAO Finvest Hub⁸ facilita o acesso ampliado a capacidades de investimento públicas e privadas, bem como a financiamentos de instituições financeiras, com foco em países em desenvolvimento e Estados com necessidades específicas. O objetivo inicial dessa iniciativa é apoiar projetos que contribuam para a descarbonização da aviação internacional, incentivando a captação de recursos novos e adicionais para esse fim (ICAO, 2025a).

⁶ <https://www.icao.tv/act-saf-series>

⁷ https://www.youtube.com/playlist?list=PLHhua9kvazPpXv09_bhbL3W_VzdZbbgph

⁸ <https://www.icao.int/finvest>

7. ROTA TECNOLÓGICA DO QUEROSENE PARAFÍNICO SINTÉTICO DE ÁLCOOL PARA JATO (ATJ-SPK)

7.1. Origem da rota ATJ-SPK

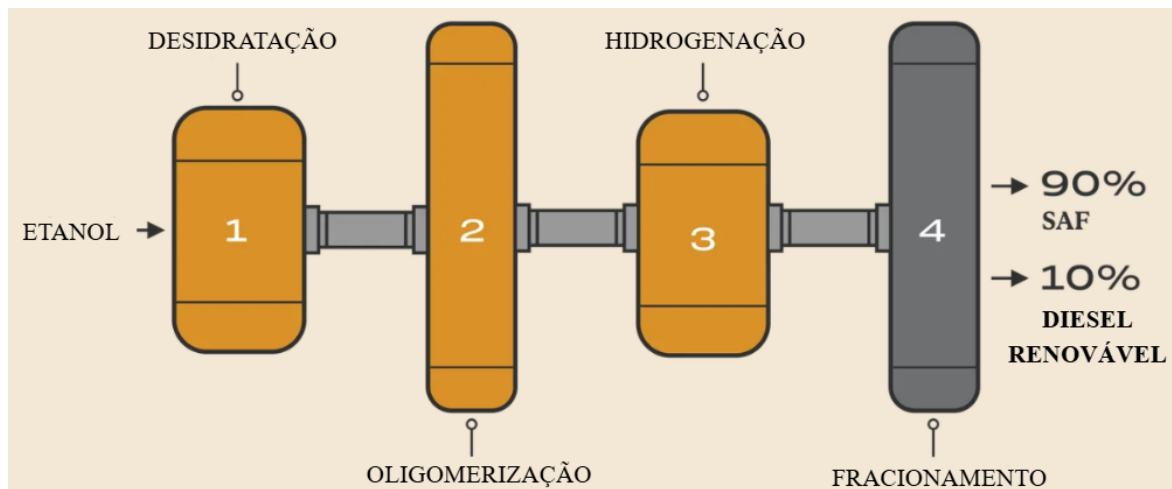
A rota ATJ-SPK não possui um único criador, mas resulta do desenvolvimento conjunto entre instituições de pesquisa, empresas privadas e organismos de padronização. Trata-se de uma tecnologia que converte álcoois, como etanol e isobutanol, em querosene de aviação sintético, sendo posteriormente incorporada à especificação ASTM International D7566, que regula combustíveis sustentáveis para aviação.

Um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento científico da rota ATJ foi o Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico (PNNL). Pesquisadores do laboratório desenvolveram um processo termocatalítico exclusivo para a conversão de etanol em ATJ-SPK. O processo pode utilizar etanol de qualquer fonte, incluindo o etanol produzido pelo processo patenteado de conversão de gás em etanol da LanzaTech. O PNNL trabalhou com a LanzaTech para ampliar a produção do catalisador (Myer, 2018).

Em 2020, a empresa LanzaTech criou a LanzaJet para comercializar o processo de conversão de álcool em querosene de aviação, desenvolvido em parceria com o Departamento de Energia dos EUA e o PNNL (LanzaTech, 2026). A empresa LanzaJet contribuiu para levar a tecnologia do ambiente laboratorial para escala comercial. O seu produto, LanzaJet SAF, é produzido utilizando etanol de baixo carbono, como o proveniente de culturas energéticas, resíduos sólidos urbanos, carbono capturado de processos industriais, energia renovável e outros. Ela já produziu 119 milhões de galões de LanzaJet SAF e já anunciou projetos que resultarão em uma capacidade anual de produção de SAF superior a 300 milhões de galões e pretende atingir a marca de 1 bilhão de galões até 2030 (LanzaJet 2026a; LanzaJet 2018). A Figura 5 demonstra o processo simplificado de produção SAF via rota ATJ-SPK.

Outra contribuição relevante veio da empresa Gevo, que desenvolveu uma rota ATJ baseada em isobutanol. Essa tecnologia foi uma das primeiras a ser aprovada dentro da especificação D7566, marcando um passo importante para a comercialização de combustíveis sustentáveis de aviação (Gevo, 2016).

Figura 5 - Processo simplificado de produção de SAF via rota ATJ-SPK.



Fonte: Adaptado de LanzaJet (2026b)

Por fim, a padronização e aprovação da rota ATJ-SPK foram conduzidas pela própria ASTM International, que incorporou essas tecnologias à norma D7566, permitindo seu uso comercial na aviação. Dessa forma, a criação da rota ATJ-SPK pode ser entendida como um esforço colaborativo entre ciência, indústria e regulamentação, no qual diferentes atores contribuíram em etapas distintas, desde a pesquisa básica até a aplicação comercial e padronização internacional. De acordo com Lopes (2026), Rodrigues (2025) e Queen (2023), para produzir 1 litro de SAF via rota ATJ-SPK são necessários aproximadamente de 1,6 a 1,8 litros de etanol.

7.2. Aprovação da rota ATJ-SPK na ASTM International

A rota ATJ produz combustível SPK a partir do álcool e foi aprovada em 2016 como Anexo A5 do D7566 (CAAFI, 2022b apud Cabrera & de Sousa, 2022). A D7566 – 18 trata da Especificação Padrão para Combustível de Turbina de Aviação Contendo Hidrocarbonetos Sintetizados, esta norma é emitida sob a designação fixa D7566 e foi aprovada para uso por agências do Departamento de Defesa dos EUA (ASTM International, 2018). Para estar “pronto para uso imediato”, o SAF deve atender às qualidades e características do combustível de jato convencional. O padrão internacional mais usado para definir o combustível à base de querosene usado na aviação comercial é o D1655 da ASTM International, Especificação Padrão para Combustíveis de Turbina de Aviação, que define os requisitos necessários para que o Jet A e o Jet A-1 atendam, sendo o primeiro o combustível

usado nos Estados Unidos (EUA), enquanto o último é predominante no resto do mundo (Cabrera & de Sousa, 2022).

A D7566 abrange a fabricação de combustível para turbinas de aviação que consiste em componentes de mistura convencionais e sintéticos. Esta especificação aplica-se somente no ponto de origem do lote, da seguinte forma (ASTM International, 2018):

- A. O combustível para turbinas de aviação fabricado, certificado e liberado de acordo com todos os requisitos das Tabelas 2 e 3 desta especificação (D7566), atende aos requisitos da Especificação D1655 e deve ser considerado combustível para turbinas de acordo com a Especificação D1655. Não é necessário realizar testes duplicados; os mesmos dados podem ser usados para conformidade com as especificações D7566 e D1655. Uma vez que o combustível seja liberado de acordo com esta especificação (D7566), os requisitos específicos desta especificação não serão mais aplicáveis: qualquer recertificação deverá ser feita de acordo com as Tabelas 2 e 3 da Especificação D1655.
- B. Mistura em campo de querosene parafinico sintetizado (SPK), conforme descrito no Anexo A1 (FT SPK), Anexo A2 (HEFA SPK), Anexo A3 (SIP), Anexo A4 querosene parafinico sintetizado com aromáticos (SPK/A) ou Anexo A5 (ATJ) com combustível D1655 (que pode ter origem total ou parcial como combustível D7566) será considerada origem em lote nesse caso, todos os requisitos das Tabelas 2 e 3 desta especificação (D7566) se aplicam e devem ser avaliados. Programas de teste de conformidade de formato curto, comumente usados para garantir a qualidade do transporte, não são suficientes. O combustível deve ser considerado como combustível para turbina D1655 após a certificação e liberação, conforme descrito no item A.
- C. Uma vez que um combustível seja redesignado como combustível para turbina de aviação D1655, ele poderá ser manuseado da mesma forma que o combustível para turbina de aviação D1655 refinado equivalente.
- D. Esta especificação define os requisitos mínimos de propriedades para combustível de turbina de aviação que contenham hidrocarbonetos sintetizados e lista os aditivos aceitáveis para uso em motores e aeronaves civis. A especificação D7566 é direcionada a aplicações civis e mantida como tal, mas pode ser adotada para usos militares, governamentais ou outros usos especializados.

Tabela 2 - Requisitos detalhados para combustíveis de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados - Parte 1: Requisitos Básicos

(continua)

PROPRIEDADE		JET A OU JET A-1	MÉTODO DE TESTE
COMPOSIÇÃO			
Acidez total, mg KOH/g	Máx	0,10	D3242/IP 354
Aromáticos: Um dos seguintes requisitos deve ser atendido:			
1. Aromáticos, porcentagem em volume	Máx	25	D1319 ou IP 156
2. Aromáticos, porcentagem em volume	Máx	26,5	D6379/IP 436
Enxofre, mercaptano, porcentagem em massa	Máx	0,003	D3227/IP 342
Enxofre, porcentagem em massa total	Máx	0,30	D1266, D2622, D4294, D5453, ou IP 336
VOLATILIDADE			
Destilação			D2887/IP 406 ou D86 ou IP 123 D7345
Temperatura de destilação, °C:			
10% recuperado, temperatura (T10)	Máx	205	
50% recuperado, temperatura (T50)		relatório	
90% recuperado, temperatura (T90)		relatório	
Ponto de ebulição final, temperatura	Máx	300	
Resíduo da destilação, porcentagem	Máx	1,5	
Perda por destilação, percentual	Máx	1,5	
Ponto de fulgor, °C	Mín	38	D56 ou D3828 , IP 170 ou IP 523

Tabela 2 - Requisitos detalhados para combustíveis de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados - Parte 1: Requisitos Básicos

(continua)

PROPRIEDADE		JET A OU JET A-1	MÉTODO DE TESTE
Densidade a 15 °C, kg/m ³		775 a 840	D1298/IP 160 ou D4052 ou IP 365
FLUIDEZ			
Ponto de congelamento, °C	Máx	-40 Jet A	D5972/IP 435, D7153/IP 529, D7154/IP 528, ou D2386/IP 16
Viscosidade –20 °C, mm ² /s	Máx	-47 Jet A-1 8,0	D445/IP 71, Seção 1, D7042K ou D7945
COMBUSTÃO			
Poder Calorífico Inferior, MJ/kg	Mín	42,8	D4529, D3338, D4809 ou IP 12
Um dos seguintes requisitos deve ser atendido:			
(1) Ponto de fumaça, mm, ou	Mín	25,0	D1322/IP 598
(2) Ponto de fumaça, mm, e	Mín	18,0	D1322/IP 598
Naftalenos, volume, porcentagem	Máx	3,0	D1840
CORROSÃO			
Tira de cobre, 2 h a 100 °C	Máx	No. 1	D130/IP 154
ESTABILIDADE TÉRMICA			
2,5 h à temperatura de controle de 260 °C, min			D3241 /IP 323
Queda de pressão no filtro, mm Hg	Máx	25	

Tabela 2 - Requisitos detalhados para combustíveis de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados - Parte 1: Requisitos Básicos

(conclusão)

PROPRIEDADE		JET A OU JET A-1	MÉTODO DE TESTE
Classificação do tubo: Um dos seguintes requisitos deve ser atendido:			
(1) Anexo A1 VTR, Código de Cores VTR	Menor que	3 Sem depósitos de cor pavão ou coloração anormal.	
(2) Anexo A2 ITR ou Anexo A3 ETR, nm médio em área de 2,5 mm ²	Máx	85	
CONTAMINANTES			
Goma existente, mg/100 mL	Máx	7	D381, IP 540
Microseparômetro, Classificação			D3948
Sem aditivo de condutividade elétrica	Mín	85	
Com aditivo de condutividade elétrica	Mín	70	
ADITIVOS			
Condutividade elétrica, pS/m		Ver 6.3	D2624/IP 274

Fonte: Adaptado de ASTM International (2018)

- E. Esta especificação pode ser usada como padrão para descrever a qualidade do combustível de turbina de aviação, desde a produção até a aeronave. No entanto, esta especificação não define os testes e procedimentos de garantia de qualidade necessários para garantir que o combustível no sistema de distribuição continue em conformidade com esta especificação após a certificação do lote. Tais procedimentos são definidos em outros locais, por exemplo, na ICAO 9977, EI/JIG Standard 1530, JIG 1, JIG 2, API 1543, API 1595 e ATA-103.
- F. Esta especificação não inclui todos os combustíveis satisfatórios para motores de turbina de aviação. Certos equipamentos ou condições de uso podem permitir uma

gama mais ampla ou exigir uma gama mais estreita de características do que as mostradas nesta especificação.

Tabela 3 - Requisitos detalhados para combustíveis de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados - Parte 2: Requisitos ampliados

PROPRIEDADE		JET A OU JET A-1	MÉTODO DE TESTE
COMPOSIÇÃO			
Aromáticos: Um dos seguintes requisitos deve ser atendido:			
1. Aromáticos, porcentagem em volume	Mín	8	D1319 ou IP 156
2. Aromáticos, porcentagem em volume	Mín	8,4	D6379/IP 436
VOLATILIDADE			D2887/IP 406, D86 ou IP 123
Destilação			
T50-T10, °C	Mín	15	
T90-T10, °C	Mín	40	
LUBRICIDADE			
Lubrificação, mm	Máx	0,85	D5001
FLUIDEZ			
Viscosidade -40 °C, mm ² /s	Máx	12	D445 /IP 71, Seção 1 , ou D7945

Fonte: Adaptado de ASTM International (2018)

- G. Embora os combustíveis para turbinas de aviação definidos nas Tabelas 2 e 3 desta especificação possam ser usados em aplicações diferentes de motores de turbina de aviação, os requisitos para essas outras aplicações não foram considerados no desenvolvimento desta especificação.
- H. Os componentes de mistura sintética, os combustíveis sintéticos e as misturas de combustíveis sintéticos com combustíveis convencionais derivados de petróleo nesta

especificação foram avaliados e aprovados de acordo com os princípios estabelecidos na Prática D4054.

- I. Os valores expressos em unidades SI devem ser considerados como padrão. Nenhuma outra unidade de medida está incluída nesta norma.
- J. Esta norma não pretende abordar todas as questões de segurança, se houver, associadas ao seu uso. É de responsabilidade do usuário desta norma estabelecer práticas apropriadas de segurança, saúde e meio ambiente e determinar a aplicabilidade das limitações regulamentares antes do uso.
- K. Esta norma internacional foi desenvolvida de acordo com os princípios de normalização reconhecidos internacionalmente estabelecidos na Decisão sobre Princípios para o Desenvolvimento de Normas, Guias e Recomendações Internacionais emitida pelo Comitê de Barreiras Técnicas ao Comércio (TBT) da Organização Mundial do Comércio.

O Anexo 5 define querosene paraafínico sintético de álcool para aviação (ATJ-SPK) como um componente de mistura sintética para combustíveis de turbina de aviação para uso em aeronaves e motores civis. Os componentes de mistura sintética definidos neste anexo não são adequados para motores de turbina de aviação, a menos que misturados com até 50% do combustível convencional ou componentes de mistura convencionais. Os componentes de mistura sintética do ATJ-SPK devem ser compostos por querosene paraafínico sintetizado e hidroprocessado derivado inteiramente de etanol ou isobutanol processado por desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento. O objetivo final deste comitê é permitir o uso de todos os álcoois de C2 a C5 para a produção de ATJ-SPK, assim que dados de teste suficientes estiverem disponíveis para esses outros álcoois. Cada lote de componente de mistura sintética deve estar em conformidade com os requisitos prescritos na Tabela 4 (ASTM International, 2018).

Cada lote do componente da mistura ATJ-SPK deve atender aos requisitos da Tabela 5. Esses requisitos têm o objetivo de verificar o controle dos processos durante a ampliação inicial da produção desses componentes da mistura sintética. O objetivo final deste comitê é transformar esses requisitos de lote em um requisito de gerenciamento de mudanças assim que for adquirida experiência suficiente em produção. Os requisitos da Tabela 5 serão então exigidos somente quando novas instalações ou esquemas de produção forem estabelecidos, ou quando mudanças significativas nas operações de produção existentes forem implementadas, como a introdução de uma nova matéria-prima.

Tabela 4 - Requisitos detalhados do lote; Álcool para Jato (ATJ-SPK)

(continua)

PROPRIEDADE		ATJ-SPK	MÉTODO DE TESTE
COMPOSIÇÃO			
Acidez, KOH total, mg/g	Máx	0,015	D3242/IP 354
VOLATILIDADE			
Destilação — ambos os seguintes requisitos devem ser atendidos:			
1. Destilação Física			D86 ou IP 123
Temperatura de destilação, °C			
10% recuperado, temperatura (T10)	Máx	205	
50% recuperado, temperatura (T50)		relatório	
90% recuperado, temperatura (T90)		relatório	
Ponto de ebulição final, temperatura	Máx	300	
T90-T10, °C	Mín	21	
Resíduo da destilação, porcentagem	Máx	1,5	
Perda por destilação, percentual	Máx	1,5	
Ponto de fulgor, °C	Mín	38	D56, D3828 , IP 170 ou IP 523
Densidade a 15 °C, kg/m³		730 a 770	D1298/IP 160, D4052 ou IP 365

Tabela 4 - Requisitos detalhados do lote; Álcool para Jato (ATJ-SPK)

(conclusão)

PROPRIEDADE		ATJ-SPK	MÉTODO DE TESTE
Ponto de congelamento, °C	Máx	-40	D5972/IP 435, D7153/IP 529, D7154/IP 528, ou D2386/IP 16
Estabilidade térmica (2,5 h à temperatura de controle)			
Temperatura, °C	Mín	325	D3241G /IP 323G
Queda de pressão no filtro, mm Hg	Máx	25	
Classificação do tubo: Um dos seguintes requisitos deve ser atendido:			
(1) Anexo A1 VTR, Código de Cores VTR	Menor que	3 Sem depósitos de cor pavão ou coloração anormal.	
(2) Anexo A2 ITR ou Anexo A3 ETR, nm médio em área de 2,5 mm ²	Máx	85	
ADITIVOS			
Antioxidantes, mg/L	Mín	17	
	Máx	24	

Fonte: Adaptado de ASTM International (2018)

Tabela 5 - Outros Requisitos Detalhados; Álcool para Jato (ATJ-SPK)

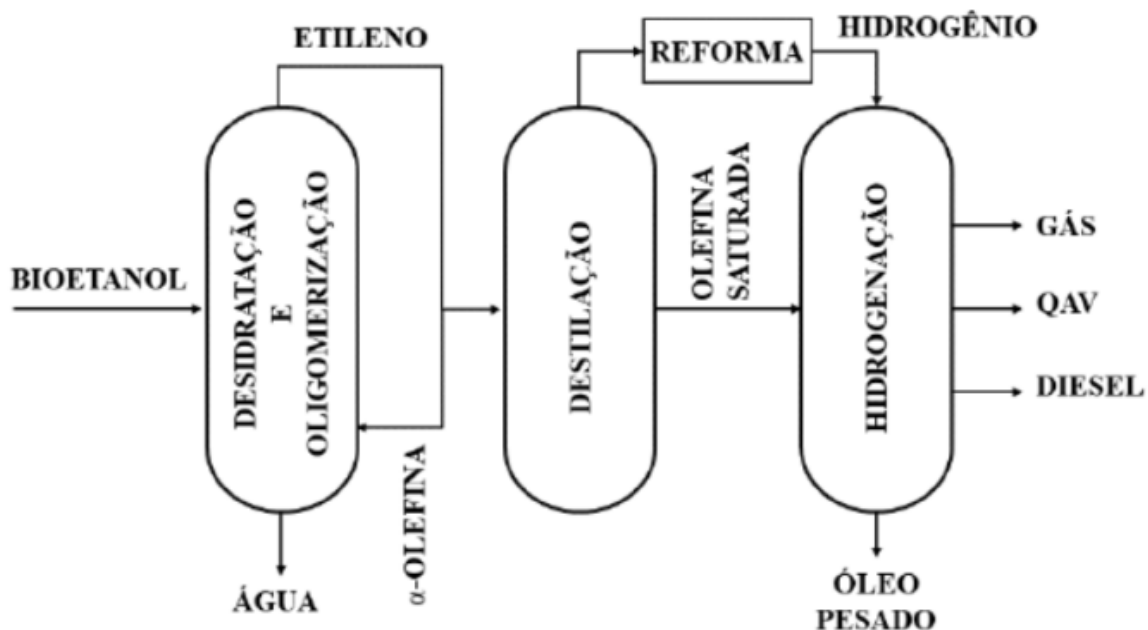
PROPRIEDADE		ATJ-SPK	MÉTODO DE TESTE
Composição de Hidrocarbonetos			
Cicloparafinas, % em massa	Máx	15	D2425
Aromáticos, % em massa	Máx	0,5	D2425
Parafinas, % em massa		relatório	D2425
Carbono e Hidrogênio, % em massa	Mín	99,5	D5291
Composição Não-hidrocarboneto			
Nitrogênio, mg/kg	Máx	2	D4629/IP 379
Água, mg/kg	Máx	75	D6304 ou IP 438
Enxofre, mg/kg	Máx	15	D5453 ou D2622
Metais			
(Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Sn, Sr, Ti, V, Zn), mg/kg	Máx	0,1 por metal	D7111 ou UOP 389
Halogênios, mg/kg	Máx	1	D7359

Fonte: ASTM International (2018)

7.3. Processo de produção de SAF via rota ATJ-SPK

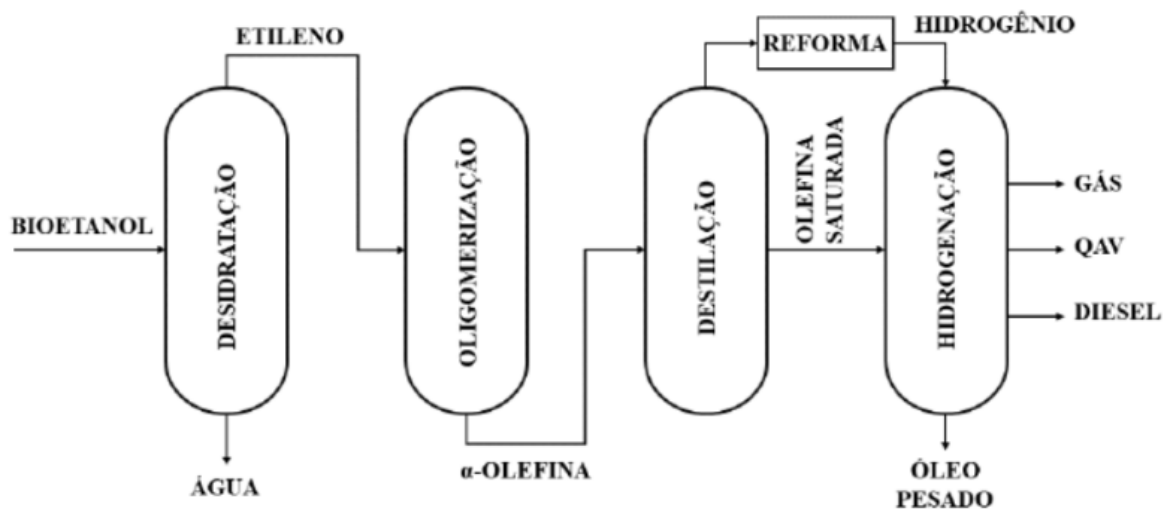
O processo ATJ-SPK envolve, em sequência, as etapas de desidratação do etanol ou isobutanol, oligomerização, hidrogenação e, por último, a separação do produto, resultando no QAV ATJ-SPK. Entre as matérias-primas, o etanol se destaca por facilitar a formação de eteno em condições mais suaves, já que apresenta alta conversão e seletividade. Além disso, os hidrocarbonetos obtidos situam-se na faixa de C9 a C15 (Gutiérrez-Antonio et al., 2017 apud Silva, 2023). Esse processo pode ser conduzido de duas maneiras, com três ou quatro etapas, conforme ilustrado nas Figuras 6 e 7 (Silva, 2023).

Figura 6 - Fluxograma do Processo SPK-ATJ em Três Etapas



Fonte: Silva (2023)

Figura 7 - Fluxograma do Processo SPK-ATJ em Quatro Etapas



Fonte: Silva (2023)

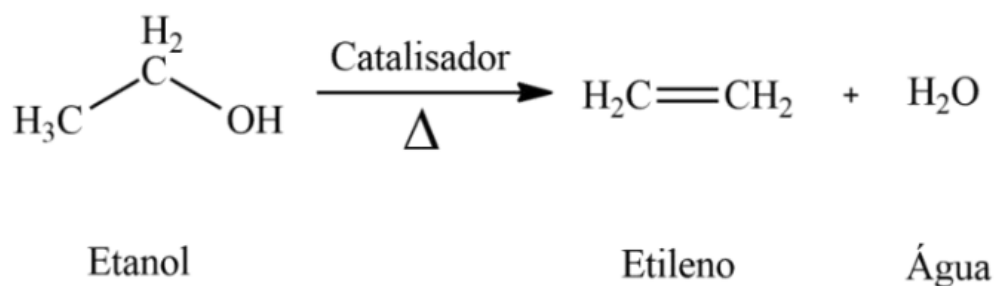
7.3.1. Desidratação

A fase de desidratação do etanol pode seguir dois percursos distintos: reação endotérmica intramolecular, que tende a gerar etileno, e a reação exotérmica intermolecular, que favorece a formação de éter dietílico. Ambos os mecanismos são influenciados pela temperatura. Em condições de menor temperatura, predomina a produção de éter dietílico,

enquanto temperaturas mais elevadas estimulam a formação de etileno (Cheng et al., 2020; Zhang et al., 2008 apud Silva, 2023).

No processo SPK-ATJ, o composto desejado na etapa de desidratação é o etileno, por isso, dá-se atenção à reação intramolecular endotérmica do etanol (Figura 8). Para esse caso, há catalisadores já consolidados e outros ainda em investigação, como zeólitas, Al_2O_3 , heteropoliácidos e óxidos de metais de transição (Wei et al., 2019 apud Silva, 2023).

Figura 8 - Etapa de Desidratação Intramolecular do Etanol



Fonte: Silva (2023)

Atualmente, as zeólitas são os materiais mais empregados, destacando-se HZSM-5, SAPO (fosfato de aluminossilicato) e a beta zeólita (Kawsuwan et al., 2020 apud Silva, 2023). As zeólitas são materiais cristalinos microporosos constituídos por aluminossilicatos, que apresentam elevada estabilidade térmica, ampla área superficial e acidez interna elevada. Além disso, podem atuar como sítios ativos em reações químicas, devido à sua capacidade de realizar trocas iônicas com diferentes espécies moleculares (Chai et al., 2021 apud Silva, 2023).

É fundamental considerar o valor de SAR das zeólitas, pois níveis elevados podem levar à desativação precoce do catalisador, além de favorecer a formação excessiva de compostos aromáticos. De modo geral, a faixa ideal de SAR situa-se entre 50 e 250. Outro ponto que exige cuidado é a temperatura da reação. Quando ultrapassa 400 °C, ocorre a decomposição das α -olefinas, resultando na geração de CO, CO_2 e H_2 . Portanto, para otimizar a produção de olefinas, recomenda-se manter a temperatura entre 300 e 400 °C (Filho, 2019 apud Silva, 2023).

A desidratação catalítica do bioetanol já é aplicada industrialmente em diversos países. A Tabela 6 apresenta um resumo das principais características dos processos utilizados para converter etanol em etileno (Cavalcanti, 2022).

Tabela 6 - Características industriais do processo de desidratação de etanol a etileno.

Companhia	Reator	Catalisador	T (°C)	P (atm)	WHSV ⁹ (h ⁻¹)	Etanol (vol.%)	X/S ¹⁰ (%)
Brasken	Adiabático (quatro camadas)	Al ₂ O ₃ - Mg/SiO ₂ (Syndol)	450	-	0,56	95	99/97
Sovay Indupa (Halcon/SD)	Adiabático	Syndol	200-400	5,9-6,4	0,33-0,43	95	99/97
Lummus	Adiabático	γ-Al ₂ O ₃	400	0,66	-	49,75	99/95
Lummus	Leito fluidizado	γ-Al ₂ O ₃	400	0,66	-	49,75	99,6/99,9
Petrobras	Cascata de reatores adiabáticos paralelos	Al-Si	300-440	0,84-7	0,03-0,7	-	99/98
China	Tubular	HZSM-5 (NKC-03A)	260	-	2,4	-	98/99

Fonte: Adaptado de Yakovleva et al. (2016) apud Cavalcanti (2022)

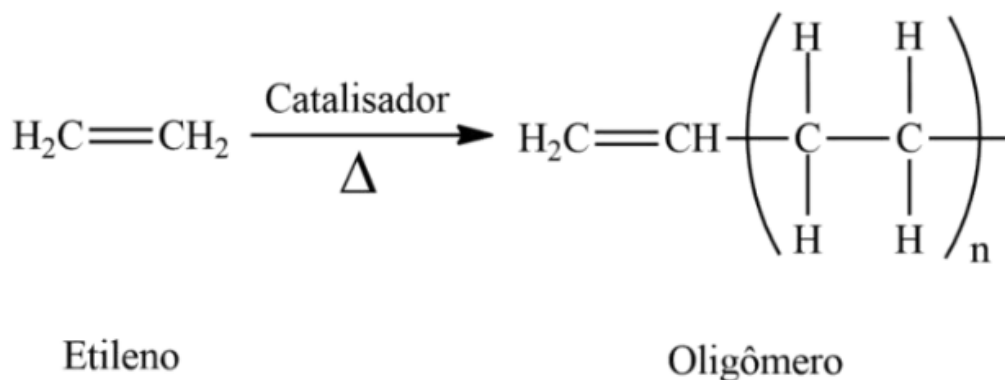
7.3.2. Oligomerização

O etileno produzido na etapa de desidratação é direcionado para um processo de oligomerização (Figura 9), que também ocorre por via catalítica. Nessa etapa, moléculas de cadeia curta se combinam, formando moléculas de cadeia mais longa. No processo ATJ, os alcenos com 2 a 4 átomos de carbono são convertidos em alcenos com cadeias entre 8 e 16 carbonos. (Pechstein et al., 2017 apud Cavalcanti, 2022). A reação depende do uso de catalisadores para ocorrer e, durante muito tempo, foram utilizados até três tipos diferentes. Atualmente, pesquisas indicam a possibilidade de empregar um único catalisador nas etapas de desidratação e de oligomerização (Guo et al., 2021 apud Silva, 2023).

⁹ WHSV (weight hourly space velocity) é a velocidade espacial horária do peso de alimentação

¹⁰ X/S é a razão entre a conversão do etanol e a seletividade ao etileno

Figura 9 - Etapa de Oligomerização



Fonte: Silva (2023)

Em geral, a oligomerização do etileno é realizada sob temperaturas elevadas, na faixa de 100 a 300 °C, pressões que variam de 0 a 70 bar e com o uso de catalisadores como zeólitas ácidas, resinas de ácido sulfônico e ácido fosfórico sólido (Finiels; Fajula; Hulea, 2014; Ryan, 2019 apud Silva, 2023).

A etapa de oligomerização também pode acontecer de forma simultânea à desidratação, quando se usa catalisadores como MCM-41, Al-MCM-41 e zeólitas mesoporosas como SAR 38 (zeólitas HZSM-5 tratadas com NaOH). Esses se apresentam eficiente nas duas reações, tendo características bifuncionais (Filho et al., 2019 apud Silva, 2023).

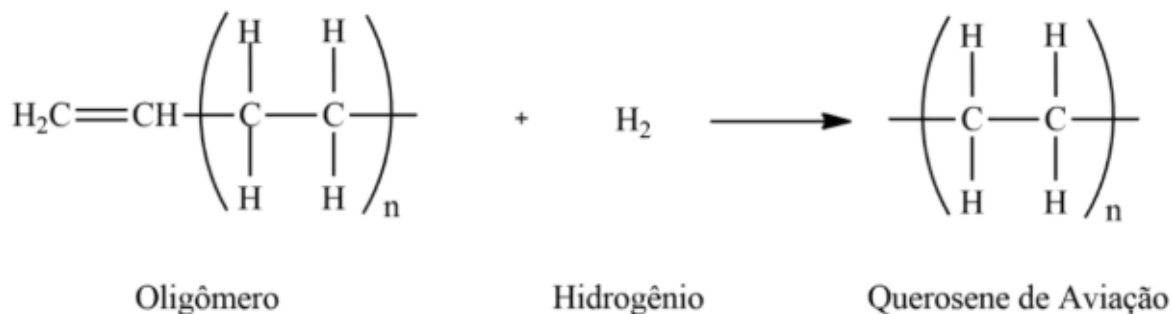
Ao término da reação, é necessário realizar a destilação do produto obtido. Isso ocorre porque a mistura formada contém hidrocarbonetos com diferentes tamanhos de cadeia, desde compostos com quatro átomos de carbono até aqueles com mais de dezesseis. A fração entre C4 e C8 deve ser recirculada para a etapa de oligomerização, pois o querosene de aviação é composto, em sua maioria, por parafinas na faixa de C9 a C15, enquanto o diesel verde se encontra entre C16 e C22. Um ponto relevante é que aproximadamente 50% dos produtos gerados estão na faixa de C6 a C10, devendo, portanto, ser reintegrados ao processo a fim de aumentar o rendimento do combustível de interesse (Wang; Tao, 2016 apud Silva, 2023).

7.3.3. Hidrogenação

A etapa de hidrogenação (Figura 10) é necessária para transformar as α -olefinas obtidas na fase anterior em parafinas ou isoparafinas. Essas α -olefinas apresentam baixa estabilidade, o que as torna inadequadas para uso em combustíveis de aviação. Dessa forma,

realiza-se a saturação das ligações por meio do processo de hidrogenação, aumentando a estabilidade dos compostos formados (Attanatho et al., 2020 apud Silva, 2023).

Figura 10 - Etapa de Hidrogenação do Oligômero



Fonte: Silva (2023)

Os oligômeros situados na faixa de C10 a C16 constituem as principais matérias-primas para a etapa de hidrogenação. Esse processo envolve a adição de hidrogênio em um reator contendo os oligômeros, com o objetivo de produzir querosene de aviação e, em muitos casos, também diesel verde (Wang; Tao, 2016 apud Silva, 2023).

7.3.4. Fracionamento

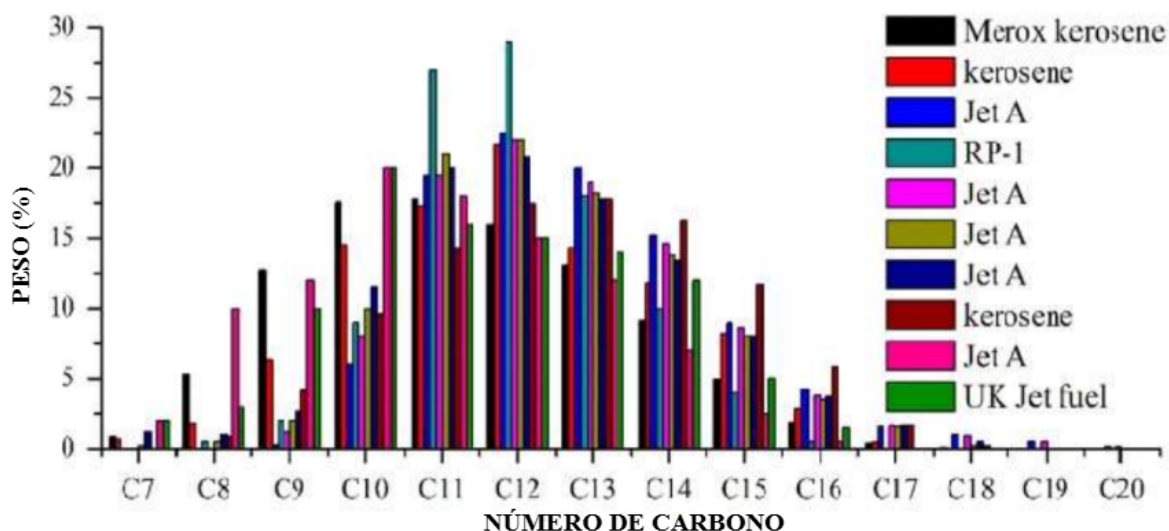
A etapa final do processo ATJ consiste no fracionamento dos hidrocarbonetos renováveis obtidos após a hidrogenação dos produtos da oligomerização. Nessa fase, é produzido o combustível de aviação, além de outras frações como nafta, gasolina e diesel de origem renovável. O procedimento ocorre em uma coluna de destilação convencional, onde os componentes são separados de acordo com seus diferentes pontos de ebulição, condensando-se em níveis específicos ao longo da coluna. Trata-se de uma tecnologia amplamente utilizada em refinarias de petróleo, empregada comercialmente há várias décadas em todo o mundo (Pechstein et al., 2017 Cavalcanti, 2022).

De modo geral, os hidrocarbonetos produzidos apresentam uma composição química mais simples do que a dos combustíveis de aviação tradicionais, que incluem centenas de diferentes tipos de hidrocarbonetos (Yang et al., 2018 apud Cavalcanti, 2022).

Os componentes do querosene podem ser organizados em sete grupos principais, incluindo parafinas, parafinas monociclo, parafinas bicíclicas, parafinas policíclicas, alquilbenzenos, cicloalquilbenzenos, naftenos e outros aromáticos binucleares (Cavalcanti, 2022). Yang et al. (2016) apud Cavalcanti (2022) apresentaram um estudo sobre a distribuição

de carbono em combustíveis de aviação e organizou um gráfico com 10 tipos de querosenes que está apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Distribuição de carbono do combustível de aviação



Fonte: Yang et al. (2016) apud Cavalcanti (2022)

Segundo Yang et al. (2016) apud Cavalcanti (2022), os componentes parecem exibir uma distribuição normal centralizada em C12. Os pesos totais de C7 e abaixo de C7 estão abaixo de 2 % e os pesos de C17 – C20 estão abaixo de 3,275 %. C12 é especialmente abundante em querosene, com níveis de 15 a 29 %.

O Querosene de Aviação é constituído principalmente por alcanos e cicloalcanos, que correspondem a aproximadamente 70% a 72% de sua composição total. Os compostos aromáticos representam cerca de 20%, enquanto os alcenos estão presentes em uma proporção próxima de 5%. Os 3% restantes são formados por outras substâncias, como compostos contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio (Rahmes et al., 2009 apud Silva, 2023).

7.3.5. Maturidade da rota tecnológica ATJ-SPK

Pode-se avaliar o nível de desenvolvimento tecnológico das diferentes rotas de produção de bioquerosene de aviação, sendo as principais apresentadas na Tabela 7 (IRENA 2019; Bauen et. al 2020 apud Souza et al. 2025). A rota que se encontra em estágio mais avançado é a SPK-HEFA, isso significa que a tecnologia está compatível para aplicação em escala de produção industrial (Souza et al., 2025).

Tabela 7 - TRL¹¹ das Principais Rotas de Bioquerosene de Aviação

ROTA	IRENA (2019)	BAUEN ET AL. (2020)
SPK-HEFA	6-9	8
SPK-ATJ	4-7	6-7
SIP	5-7	5-7
SPK-FT	7-8	6

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2025)

A rota SPK-ATJ, por outro lado, possui TRL entre 4 e 7, para IRENA (2019) apud Souza et al. (2025) e entre 6 e 7, para Bauen et al. (2020) apud Souza et al. (2025), o que indica a transição de testes laboratoriais para implementação de projetos comerciais. Neste contexto, em janeiro de 2024 foi inaugurada a primeira planta comercial de SAF baseado na rota do etanol, pela LanzaJet na Georgia, EUA (Department of Energy, 2024 apud Souza et al., 2025).

¹¹ TRL (Technology Readiness Level) - Nível de Maturidade Tecnológica

8. POTENCIAL E DESAFIOS DA PRODUÇÃO DE SAF VIA ROTA ATJ-SPK A PARTIR DO ETANOL NO BRASIL E EM ALAGOAS

8.1. Produção de etanol da cana-de-açúcar em alagoas

O Brasil ocupa a posição de segundo maior produtor de etanol no mundo, ficando bem atrás dos Estados Unidos, que lideram como principal produtor, consumidor e exportador desse biocombustível. O mercado interno ainda é o principal destino do etanol brasileiro. Apesar do apelo ambiental, não se espera um crescimento expressivo da demanda global, já que a tendência internacional aponta para maiores investimentos em veículos elétricos. No cenário nacional, a política de descarbonização conhecida como Renovabio tende a impulsionar o consumo de biocombustíveis no longo prazo. Para o encerramento da safra 2023/24, a expectativa é de que as usinas com destilarias integradas, inclusive no Nordeste, continuem priorizando a produção de açúcar, influenciadas pelos preços elevados do produto (Vidal, 2024).

Alagoas lidera a produção de etanol no Nordeste em 2025, segundo a Associação de Produtores de Açúcar, Etanol e Bioenergia (NovaBio). O estado alcançou 416,4 milhões de litros, equivalentes a 21% do total regional, que somou 1,9 bilhão de litros. Na sequência aparecem Paraíba (398,2 milhões), Bahia (354,8 milhões) e Pernambuco (333,5 milhões). Do volume produzido em Alagoas, 163,5 milhões de litros correspondem ao etanol anidro e 252,9 milhões ao hidratado. O estado também ocupa o primeiro lugar na produção de cana-de-açúcar, com 17,6 milhões de toneladas na safra 2024/2025, superando Pernambuco, que registrou 13,5 milhões (Nealdo, 2025).

Nos últimos anos, o Nordeste tem avançado na bioeconomia, utilizando o etanol como base para inovações em diferentes setores, incluindo combustíveis sustentáveis como SAF, biometano, biogás, hidrogênio verde e e-metanol. Para estimular a sustentabilidade e reduzir a poluição, o Governo de Alagoas instituiu, em setembro, a Política de Prioridade no Abastecimento com Etanol, que prevê a substituição gradual da gasolina na frota do Executivo estadual. A medida busca promover a transição energética, fortalecer a produção local e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Nealdo, 2025).

O grupo alagoano da Usina Coruripe obteve a certificação ISCC Corsia Plus, que permite a comercialização de etanol como matéria-prima para a produção de bioquerosene de aviação (SAF). No Brasil, apenas cinco usinas possuem esse certificado, incluindo unidades

da Raízen, São Martinho e BP Bunge. Sem essa certificação, a venda de etanol para a indústria de SAF não é autorizada (Leão, 2024).

O setor sucroenergético tem papel central na matriz energética de Alagoas. Segundo o Balanço Energético de Alagoas (Beal), 87% da energia consumida no estado provém de fontes renováveis, com destaque para a cana-de-açúcar, responsável por 47% da produção. De acordo com a secretária Alice Beltrão, o estado vem adotando políticas públicas para atrair investimentos em energias renováveis. Em parceria com a empresa Essenz Soluções, está sendo realizado um levantamento das condições locais para oferta de energia limpa, que servirá de base para apresentar oportunidades a investidores nacionais e estrangeiros e ampliar a participação de Alagoas no setor (Leão, 2024).

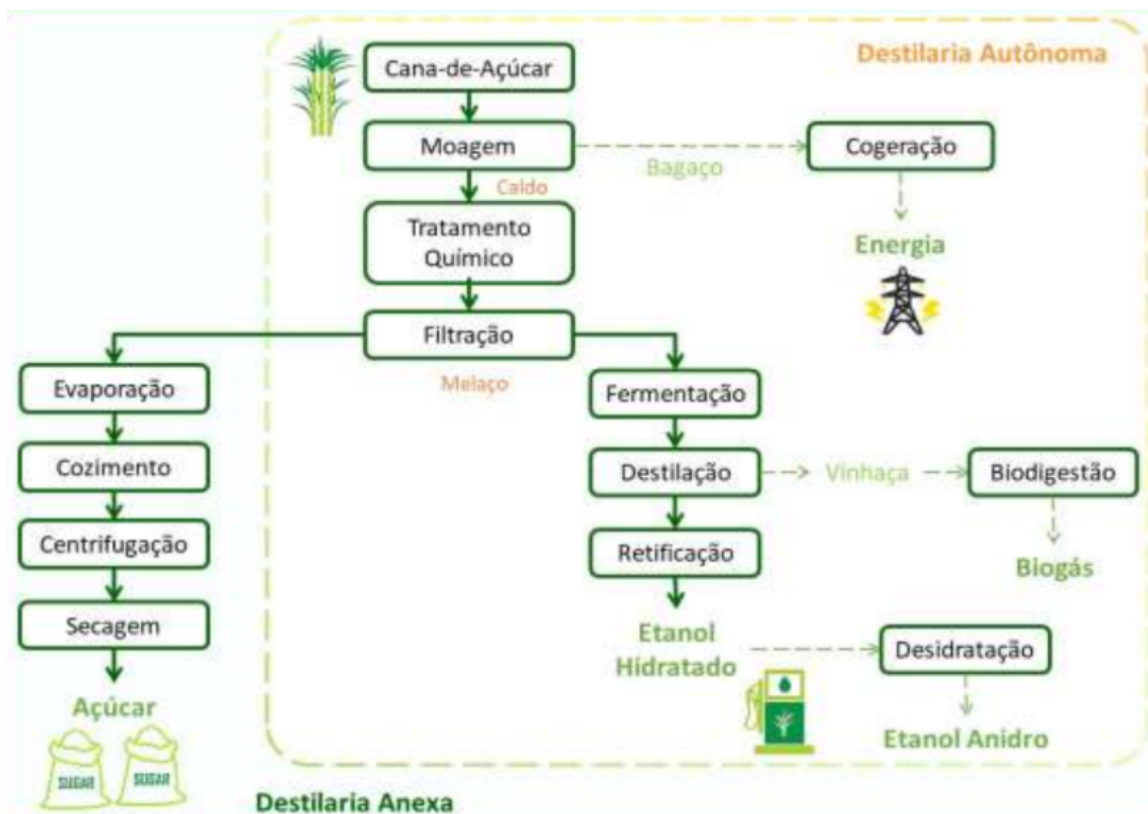
8.2. Métodos empregados na fabricação do etanol da cana-de-açúcar

O etanol, ou álcool etílico, é um composto orgânico pertencente à função álcool, com fórmula molecular C_2H_6O , estruturalmente representado por CH_3-CH_2-OH (Raízen, 2022). O etanol é um líquido incolor, volátil e de cheiro parecido com o éter, sendo miscível em água e outros líquidos orgânicos. Ele pode ser comercializado tanto na sua forma hidratada quanto em forma de álcool anidro, sendo a primeira forma utilizada como combustível e a segunda forma na fabricação de tintas, vernizes e aerossóis, como inseticidas, repelentes de insetos, desodorantes de ambientes, fungicidas, além de ser uma mistura colocada na gasolina (Carvalho et al., 2011 apud Camargo, 2023).

8.2.1. Etanol de primeira geração (E1G)

O etanol é obtido, majoritariamente, pela fermentação de açúcares (sacarose, a glicose e frutose) e cereais, que podem ser encontrados em vegetais como o milho, a beterraba e a cana-de-açúcar. O processo industrial de produção de etanol consiste das seguintes etapas apresentadas na Figura 12. O termo etanol de primeira geração (E1G), é referente a produção do biocombustível através da fermentação (Raízen, 2022).

Figura 12 - Fluxograma simplificado da produção de etanol 1G, açúcar e eletricidade.

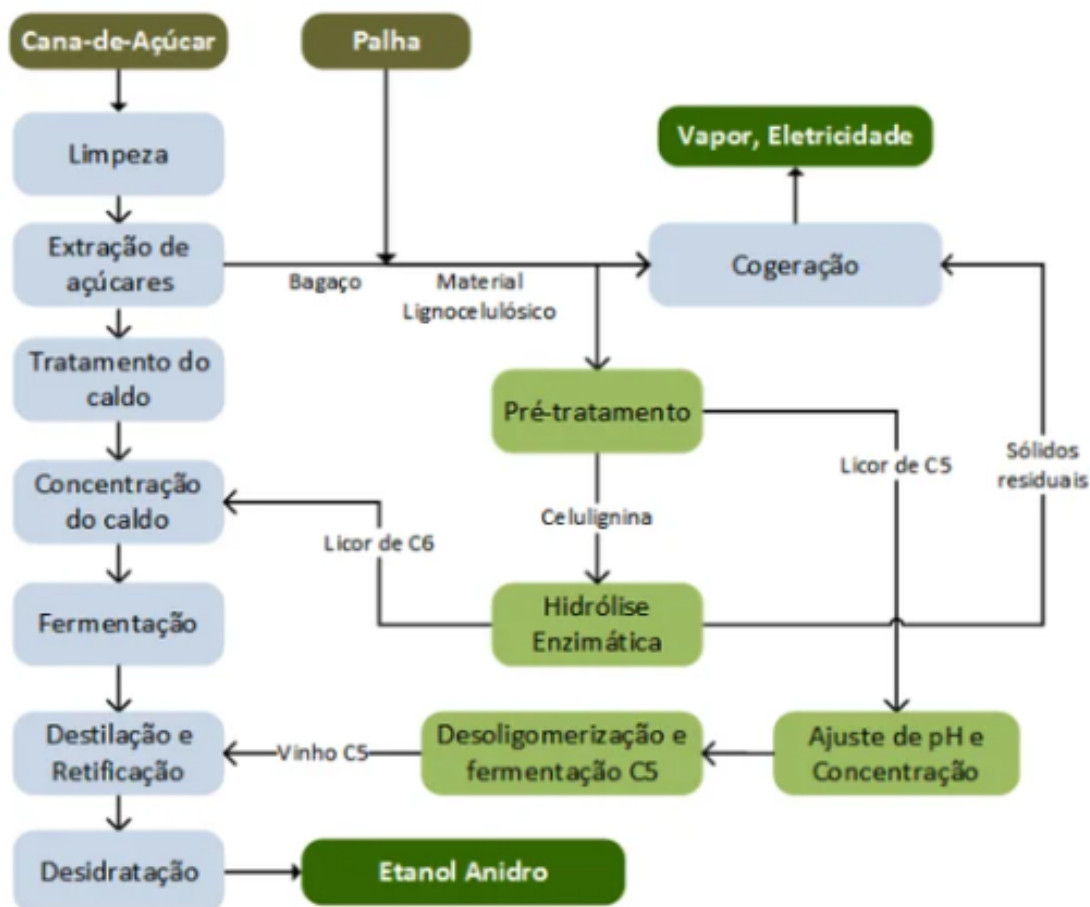


Fonte: Cavalcanti (2022)

8.2.2. Etanol de segunda geração (E2G)

No etanol de segunda geração (E2G) ocorre a etapa de pré-tratamento, além da necessidade de realizar a hidrólise da celulose antes do início do processo fermentativo (Camargo, 2023). O processo de produção do E2G pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Processo industrial simplificado de produção de etanol 1G e 2G



Fonte: Junqueira (2015)

8.3. Políticas públicas brasileiras de incentivo à pesquisa, produção e uso de SAF

Embora o Brasil seja membro fundador da ONU, e a ICAO uma agência vinculada à ONU que é responsável pela adoção do CORSIA, o país não aderiu voluntariamente ao programa (ICAO, 2025e). Ainda assim, o Brasil tem promovido iniciativas voltadas à implementação do bioquerosene de aviação, em conformidade com os princípios e diretrizes estabelecidos pelo CORSIA. Nesse contexto, destacam-se a Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021, e a Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, bem como a Resolução ANP nº 856/2021, que incorpora especificações técnicas alinhadas aos padrões da ASTM International.

A Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021, estabelece o Programa Nacional do Bioquerosene para o incentivo à pesquisa e o impulso da produção de energia à base de biomassas que não concorram com a produção de alimentos, visando à sustentabilidade da aviação brasileira. Para a inserção nos benefícios do Programa Nacional do Bioquerosene, o

bioquerosene tem que ser compatível com as tecnologias de propulsão atuais, de modo a não ser necessário alterar motores, aeronaves e infraestrutura de distribuição existentes; e não pode comprometer a segurança no sistema de aviação (BRASIL, 2021b).

A Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano (BRASIL, 2024). O Quadro 6 demonstra as metas e projeções determinadas para os biocombustíveis na Lei 14.993/2024 (EPE, 2025).

Quadro 6 - Metas e projeções determinadas na Lei 14.993/2024

BIOCOMBUSTÍVEL	QUANTIFICAÇÃO	PROJEÇÃO
SAF	Percentual anual mínimo de redução das emissões de GEE	1% a partir de 2027. Crescimento de 1% ao ano a partir de 2029, chegando a 10% em 2037.
DIESEL VERDE	Participação volumétrica mínima obrigatória	Limite de 3%. Permitida adição voluntária superior mediante comunicação à ANP.
BIOMETANO	Meta de redução de emissões de GEE no mercado de gás natural	1% a partir de 2026. Não poderá exceder a 10% de redução das emissões.
BIODIESEL	Percentual obrigatório, em volume, de adição de biodiesel ao óleo diesel	15% em 2025. Crescimento de 1% ao ano até chegar a 20% em 2030. Pode ser alterado para valores entre 13 e 25%.
ETANOL	Percentual obrigatório, em volume, de adição de etanol anidro à gasolina C	Fixado em 27%. Pode ser alterado para valores entre 22 e 35%.

Fonte: Adaptado de EPE (2025)

O ProBioQAV tem como objetivo incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético, na matriz energética brasileira, do combustível

sustentável de aviação. O Art. 8º da Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024 estabelece que (BRASIL, 2024):

A ANP estabelecerá os valores das emissões totais equivalentes por unidade de energia computados no ciclo do poço à queima de cada rota tecnológica de produção de SAF, para fins de contabilizar a descarbonização em face do querosene de aviação fóssil.

Parágrafo único. Além do disposto na RenovaBio, a ANP deverá observar as seguintes diretrizes na elaboração da análise do ciclo do poço à queima:

- I - Reconhecimento da importância do aproveitamento de SAF produzido e utilizado no País para o cumprimento de compromissos internacionais de descarbonização pelos operadores aéreos; e
- II - Busca pelo alinhamento metodológico à Organização de Aviação Civil Internacional em relação aos requisitos de elegibilidade e de certificação para o SAF.

Para estruturar o debate sobre Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) no Brasil, a Anac ajudou a criar a Conexão SAF¹², um fórum informal que reúne entidades públicas e privadas interessadas em impulsionar a produção e o uso desse combustível. A iniciativa foi lançada em 6 de junho de 2024, na sede da Agência, em Brasília, durante a 5ª edição do evento Aviação Sustentável (ANAC, 2024).

O fórum busca mapear desafios técnicos, regulatórios, tributários, produtivos e logísticos ligados ao SAF no Brasil e propor soluções que garantam sua viabilidade econômica. As discussões ocorrem em grupos técnicos organizados em seis eixos: certificação e qualidade; políticas e regulação; viabilidade comercial e financiamento; pesquisa e desenvolvimento; infraestrutura e distribuição; e tributação com acesso a mercados internacionais. A participação é aberta a diversos atores do setor, como produtores, distribuidores, companhias aéreas, operadores aeroportuários, fabricantes, instituições de pesquisa, financiadores e especialistas (ANAC, 2024).

¹² <https://www.gov.br/anac/conexaosaf>

8.4. Produção de SAF via rota ATJ-SPK no Brasil

Ainda não há produção comercial consolidada de SAF via rota ATJ-SPK no Brasil. No entanto, o país já conta com projetos de implantação, como por exemplo o da Petrobras na REPLAN, além de uma cadeia de insumos estruturada e empresas com certificações relevantes, como por exemplo a ISCC CORSIA Plus adquirida pela Usina Coruripe, Raízen, São Martinho e BP Bunge (PETROBRAS, 2026). A PETROBRAS está estudando a implantação de uma planta na Refinaria de Paulínia (Replan), com capacidade de 10 mil bpd para produção de SAF via rota Alcohol-to-jet (ATJ), que utiliza o etanol como matéria-prima. A tecnologia licenciada, associada à Honeywell UOP, já foi validada tecnicamente, mas permanece pouco difundida em larga escala, o que implica investimentos industriais e necessidade intensiva de capital. (PETROBRAS, 2026; CNN BRASIL, 2026).

Segundo Van Dyk e Saddler (2024), diversos projetos de plantas de produção de SAF via rota ATJ-SPK foram anunciados (Tabela 8). Contudo, essa relação não é exaustiva, uma vez que novos projetos são frequentemente divulgados. As fontes de etanol utilizadas são variadas, incluindo etanol produzido a partir de culturas agrícolas, etanol celulósico e etanol obtido pela fermentação de gás de síntese, entre outras alternativas.

Entre as rotas aprovadas, a única atualmente utilizada no Brasil para a produção de SAF é a HEFA-SPK. As primeiras entregas desse combustível sustentável de aviação foram anunciadas pela Petrobras na sexta-feira, 5 de dezembro de 2025, no Rio de Janeiro. A empresa tornou-se a primeira a produzir integralmente no país um SAF certificado conforme os critérios de sustentabilidade da ICAO. O volume inicial, de 3 mil m³, foi comercializado com distribuidoras que atuam no Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão – RJ), quantidade equivalente a aproximadamente um dia de consumo de querosene de aviação nos aeroportos do estado do Rio de Janeiro. (PETROBRAS, 2023; PETROBRAS, 2025a; PETROBRAS, 2025b).

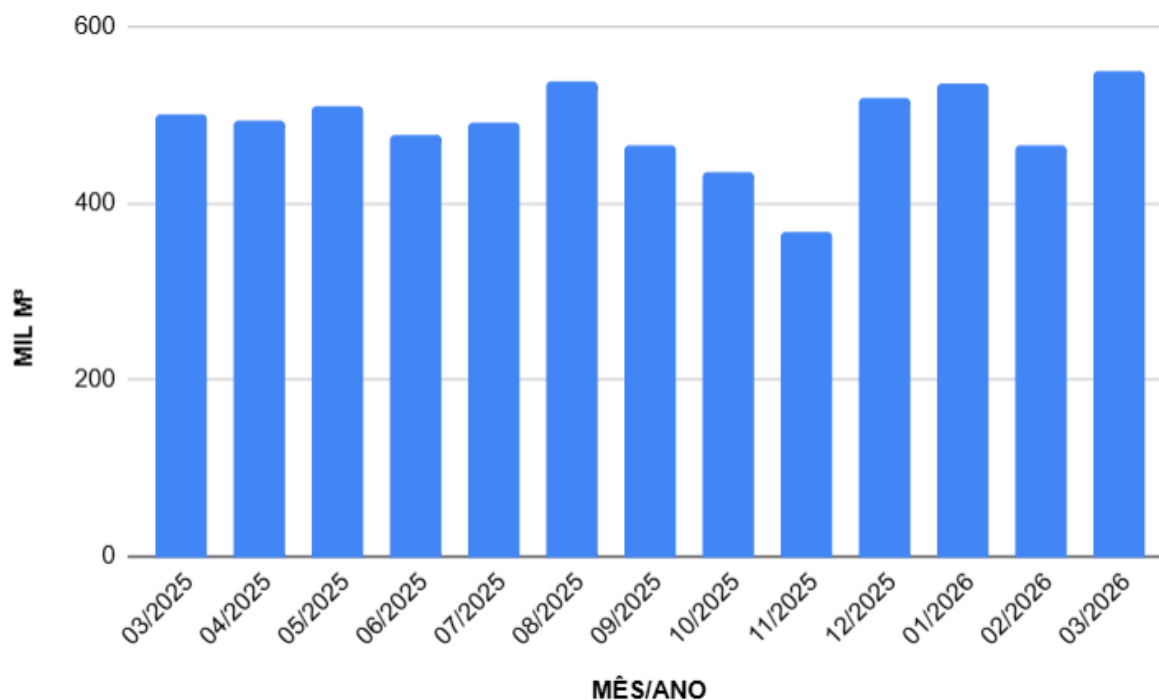
A produção brasileira de querosene de aviação (QAV) convencional no período de março de 2025 a março de 2026 totalizou 6.353,24 mil m³ (ou 6.353,24 milhões ou 6,35 bilhões), esse dado foi obtido do Painel Dinâmico de Produtores de Derivados de Petróleo da ANP. A Figura 14 apresenta a distribuição mensal dessa produção ao longo do período analisado. Já a Tabela 9 apresenta a produção brasileira detalhada de QAV convencional no 1º trim. de 2026 (ANP, 2026).

Tabela 8 - Lista de empresas/projetos baseados em tecnologias de conversão de álcool em combustível de aviação (lista não exaustiva) (com base em informações da Argus Media)

NOME DO PROJETO	LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE (t/ano)
AtmosFUEL (Lanzajet, Carbon Engineering)	Reino Unido	76000
Blue blade Energy	-	387000
Byogy	Kawasaki, Japão	22713
Cosmo Oil/Mitsui	Japão	172000
Flite	-	29000
Gevo Net Zero 1	Lago Preston, Dakota do Sul	158000
Gevo	Silsbee, Texas	287
HCS Group	Speyer, Alemanha	60000
Hyskies (Lanzatech, Vattenfall, SAS, Shell)	Forsmark, Suécia	86000
Idemitsu	Chiba, Japão	76000
Jet Zero Australia/Lanzajet	Queensland, Austrália Oriental	76000
Lanzajet	Japão	30000
Lanzajet	Soperton, Geórgia	29000
Lanzajet/Marquis	Hennepin, Illinois	345000
Lotus (SkyNRG, Lanzajet)	Noroeste do Pacífico	14000
Project Dragon (Lanzajet)	Port Talbot, Gales do Sul, Reino Unido	86000
Renewable bio	Esperance, Austrália Ocidental	30000
Speedbird (BA, Lanzajet, Nova Pangaea)	Wilton International, Teeside, Reino Unido	86000
Summit Agricultural Group	Costa do Golfo dos EUA	316000
Swedish Biofuels/COWI	Estocolmo, Suécia	20000

Fonte: Adaptado de Van Dyk & Saddler (2024)

Figura 14 - Produção brasileira anual de QAV convencional em mil m³



Fonte: Adaptado de ANP (2026)

A partir dos dados apresentados na Tabela 9, foi elaborado o gráfico exibido na Figura 15, o qual ilustra a produção mensal por região. Observa-se que o Nordeste produziu, respectivamente nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2026, 55,42 mil m³, 68,19 mil m³ e 79,29 mil m³ de QAV convencional. As instalações responsáveis por essa produção são a 3R Potiguar S.A. (Mossoró/RN) e a Refinaria de Mataripe S.A. (Acelen) (São Francisco do Conde/BA).

Na Seção 8.1, verificou-se que o estado de Alagoas produziu 416,4 milhões de litros de etanol em 2025. Caso esse volume fosse integralmente convertido em bioquerosene pela rota ATJ-SPK, o estado poderia ter produzido aproximadamente 244,9 mil m³ de SAF. Esse resultado considera a relação de conversão de 1,7 litros de etanol para 1 litro de SAF, conforme discutido na Seção 7.1.

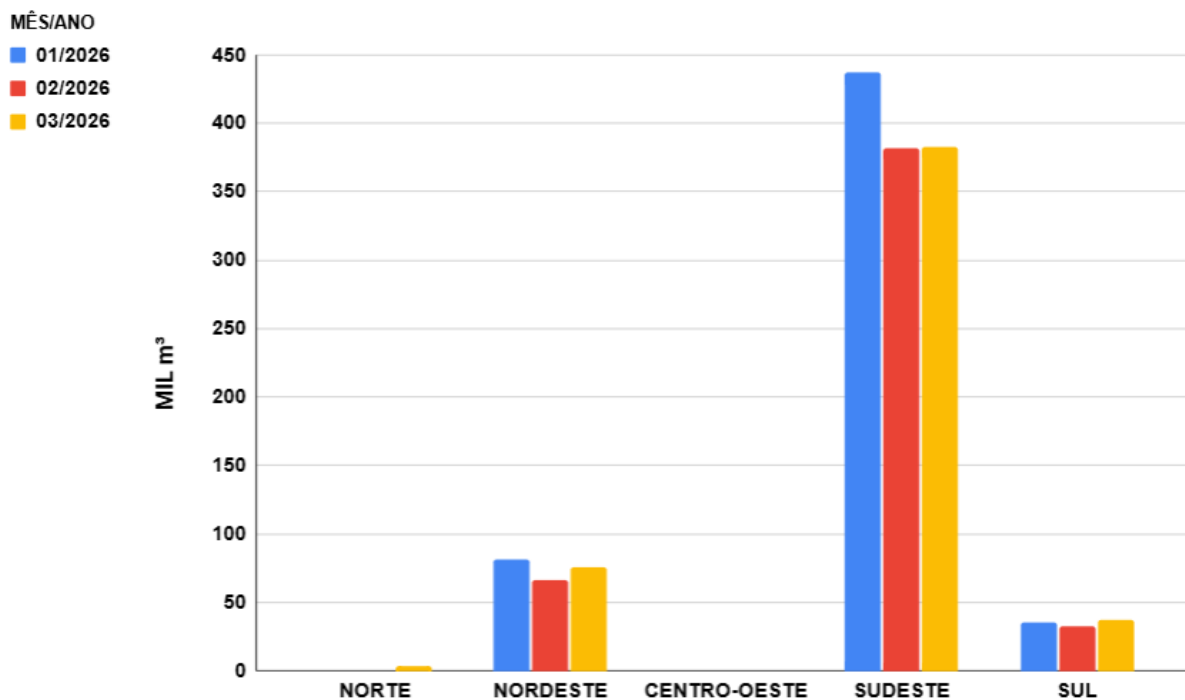
A análise desses dados indica que Alagoas possui potencial para se tornar o maior produtor de bioquerosene do Nordeste, ficando atrás apenas da região Sudeste, atual maior produtora de QAV convencional. Apesar dos resultados promissores, a produção de etanol pode competir com a produção de alimentos, o que contraria a Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021. Como alternativa, destaca-se o uso de etanol de segunda geração (2G).

Tabela 9 - Produção brasileira detalhada de QAV convencional no 1º trim. de 2026

Mês/Ano	Instalação	Cidade/UF	Mil m³	Mil m³ Total
01/2026	3R POTIGUAR S.A.	Mossoró/RN	11,63	537,4
	REDUC	Duque de Caxias/RJ	83,47	
	REFAP	Canoas/RS	18,24	
	REFINARIA DE MATARIPE	São Francisco do Conde/BA	43,79	
	REGAP	Betim/MG	55,60	
	REPAR	Araucária/PR	26,37	
	REPLAN	Paulínia/SP	133,04	
	REVAP	São José dos Campos/SP	165,26	
02/2026	3R POTIGUAR S.A.	Mossoró/RN	13,61	467,19
	REDUC	Duque de Caxias/RJ	81,48	
	REFAP	Canoas/RS	17,95	
	REFINARIA DE MATARIPE	São Francisco do Conde/BA	54,58	
	REGAP	Betim/MG	53,59	
	REPAR	Araucária/PR	22,24	
	REPLAN	Paulínia/SP	61,19	
	REVAP	São José dos Campos/SP	162,55	
03/2026	3R POTIGUAR S.A.	Mossoró/RN	16,39	548,53
	REDUC	Duque de Caxias/RJ	80,25	
	REFAP	Canoas/RS	16,76	
	REAM	Manaus/AM	1,12	
	REFINARIA DE MATARIPE	São Francisco do Conde/BA	62,90	
	REGAP	Betim/MG	54,81	
	REPAR	Araucária/PR	28,84	
	REPLAN	Paulínia/SP	116,39	
	REVAP	São José dos Campos/SP	171,07	

Fonte: Elaboração própria - Adaptado da ANP (2026)

Figura 15 - Produção de QAV convencional no Brasil (1º tri./2026, mil m³)



Fonte: Elaboração própria - Adaptado da ANP (2026)

8.5. Desafios de custo na produção de SAF

As tecnologias com maior potencial para produção em larga escala nos próximos 10 anos são: Gaseificação + Fischer-Tropsch (FT) e Álcool a Jato (ATJ) (MME, 2022). Rocco e Henkes (2020) e Peres et al. (2021), apud MME (2022), concluem que coprodutos da produção do biodiesel (material lignocelulósico oriundo das cascas e resíduos da colheita das oleaginosas e a glicerina) podem ser utilizados como matérias-primas para produção de SAF, por meio das rotas SPK-FT, SPK/A-FT, SPK-ATJ, SIP.

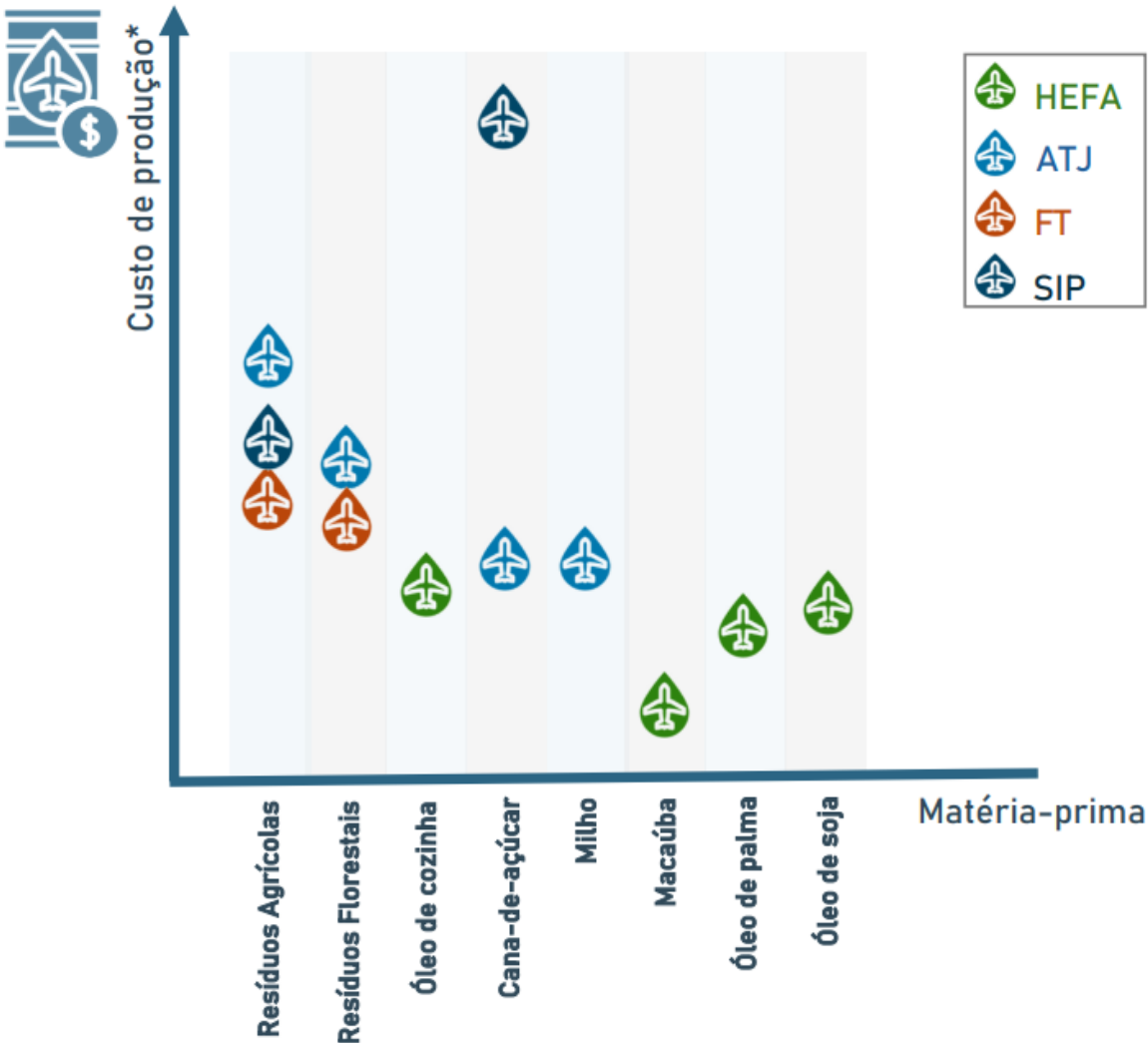
O desempenho econômico das rotas de produção SAF é mais indicado pelo MFSP (equivalente ao custo de produção), que representa o preço de venda mínimo viável do combustível no qual um investimento atinge o ponto de equilíbrio, ou seja, MFSP inferior significa que o investimento é mais promissor e competitivo. O MFSP médio da rota HEFA é o mais baixo, ou seja, 1,2 US\$/L (1,07-1,32 US\$/L), que é atribuído principalmente ao seu alto rendimento de produção (> 1000 L/t de carga seca) e custos de capital relativamente mais baixos (~ 0,34 US\$/L). Ambas as rotas FT (0,92–2,59 US\$/L) e ATJ (0,75–2,77 US\$/L) mostram MFSP médio semelhante a 1,76 US\$/L (MME, 2022).

O tipo de matéria-prima e a tecnologia adotada para a produção de SAF têm forte influência no MFSP. Por exemplo, o uso de culturas energéticas na síntese FT resultaria em

MFSP mais alto (2,15 US\$/L) em comparação com o uso de RSU ou resíduos agrícolas (1,53 e 1,98 US\$/L, respectivamente) na mesma capacidade. Uma tendência similar pode ser observada no caso do ATJ em que as culturas energéticas fornecem o maior MFSP (2,77 US\$/L) em comparação com a cana-de-açúcar, resíduos agrícolas e grãos de milho (1,86, 2,71 e 1,86 US\$/L, respectivamente). Estudos descobriram que na rota ATJ o custo de capital contribui com 20-50% para os custos totais de produção (MME, 2022).

Os preços do QAV convencional variam entre 3,45 e 5,40 R\$/L (Moura, 2026), foi visto que o preço do SAF via rota ATJ-SPK pode variar de 1,86 - 2,77 US\$/L, que equivale a aproximadamente 9,24 - 13,77 R\$/L, por esse motivo o SAF fica menos atrativo. A Figura 16 dá uma visão geral do custo de produção de diversas variedades de SAF.

Figura 16 - Rotas Tecnológicas & Matéria-Prima: custos de produção de SAF



Fonte: EPE (2024)

9. CONCLUSÃO

A análise realizada ao longo deste trabalho evidencia que o Combustível Sustentável de Aviação (SAF) representa uma alternativa essencial para a redução das emissões de carbono no setor aéreo, especialmente no curto e médio prazo. Entre as rotas tecnológicas disponíveis, a ATJ-SPK se destaca por sua flexibilidade quanto às matérias-primas e por seu potencial de integração com a cadeia produtiva do etanol.

No contexto brasileiro, a abundância de etanol de cana-de-açúcar, aliada à experiência consolidada na produção de biocombustíveis, posiciona o país de forma estratégica para se tornar um importante produtor de SAF. Além disso, iniciativas regulatórias e políticas públicas recentes demonstram um avanço na direção da descarbonização da aviação.

Entretanto, ainda existem desafios relevantes a serem superados, especialmente relacionados aos altos custos de produção, à necessidade de investimentos em infraestrutura e ao desenvolvimento tecnológico em escala industrial. A competitividade do SAF frente ao querosene convencional continua sendo um dos principais entraves para sua ampla adoção.

Dessa forma, conclui-se que, embora o Brasil possua vantagens significativas para liderar a produção de SAF via rota ATJ-SPK, a consolidação dessa alternativa dependerá de esforços coordenados entre governo, indústria e setor acadêmico, visando reduzir custos, ampliar investimentos e fortalecer o ambiente regulatório. O futuro da aviação sustentável no país não é apenas uma possibilidade técnica, mas uma construção estratégica que começa agora.

REFERÊNCIAS

- ANAC. Conexão SAF reúne instituições públicas e privadas para debater viabilidade dos combustíveis sustentáveis de aviação. **ANAC**, Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2024/conexao-saf-reune-instituicoes-publicas-e-privadas-para-debater-viabilidade-dos-combustiveis-sustentaveis-de-aviacao>. Acesso em: 13 abr. 2026.
- ANP. Painel dinâmico dos produtores de derivados de petróleo. **ANP**, Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapas-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-dos-produtores-de-derivados-de-petroleo#:~:text=O%20Painel%20Din%C3%A2mico%20de%20Produtores,ANP%20com%20suas%20capacidades%20autorizadas>. Acesso em: 19 abr. 2026.
- ASTM INTERNATIONAL. D7566 – 18 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. **ASTM International**, West Conshohocken, 2018. Disponível em: https://store.astm.org/rr-d02-1884.html?_gl=1*hzjvk*_gcl_au*NTM1MjA5MzY5LjE3Nzc0ODIzMDg. Acesso em 01 mar. 2026.
- ASTM INTERNATIONAL. Sobre a ASTM. ASTM International, West Conshohocken, 2025. Disponível em: <https://regional.astm.org/pt/about>. Acesso em: 06 dez 2025.
- BIBLIOTECAS ESPM. Tabelas. Normas ABNT ESPM. **BIBLIOTECAS ESPM**, 2025. Disponível em: <https://normas-abnt.espm.br/index.php?title=Tabelas>. Acesso em: 21 jun. 2026.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021**. Estabelece as especificações do querosene de aviação. Brasília: 2021a. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-856-de-22-de-outubro-de-2021-354349404>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 14.248, de 25 de novembro de 2021**. Institui o Programa Nacional do Bioquerosene e dispõe sobre o incentivo à pesquisa e à produção de energia a partir de biomassa para a aviação. Brasília: Presidência da República, 2021b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/114248.htm. Acesso em: 05 abr. 2026.
- BRASIL. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024**. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o ProBioQAV, PNDV e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaoorigina-173317-pl.html>. Acesso em: 11 abr. 2026.
- BRITANNICA. Kerosene chemical compound. **BRITANNICA**, Chicago, 2025. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/kerosene>. Acesso em: 01 nov. 2025.

CABRERA, E.; DE SOUSA, J.M.M. Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. **Energies**, Basel, v. 15, n. 7, 2440-?, 2022, EISSN 1996-1073. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15072440>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CAMARGO, K. C. C. **ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO E ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**. 2023. 53f. Dissertação (Mestrado em Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2023. Disponível em: [https://repositorio.ufms.br/retrieve/968937b6-bea6-4ee1-8bed-5404c9484f8f/Disserta%
7%cc3%a3o%20de%20Mestrado%20-%20Kelly%20Cristina%20Costa%20Camargo.pdf](https://repositorio.ufms.br/retrieve/968937b6-bea6-4ee1-8bed-5404c9484f8f/Disserta%c3%a7%cc3%a3o%20de%20Mestrado%20-%20Kelly%20Cristina%20Costa%20Camargo.pdf). Acesso em: 17 fev. 2026.

CAVALCANTI, C. J. da S. **SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: etanol, bioquerosene de aviação e diesel verde**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, 2022. Disponível: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/48258/1/TESE%20Claudia%20Jessica%20da%20Silva%20Cavalcanti.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2026.

CNN BRASIL. Petrobras aposta no etanol para abastecer aviões. **CNN BRASIL**, São Paulo, 2026. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/blogs/pedro-cortes/economia/macroeconomia/petrobras-aposta-no-etanol-para-abastecer-avioes/#goog_rewarded. Acesso em: 24 abr. 2026.

CROWN OIL. Guide to Kerosene. **Crown Oil**, Bury, 2025. Disponível em: <https://www.crownoil.co.uk/guides/kerosene-guide/#h-what-is-kerosene>. Acesso em: 05 nov. 2025.

EPE. Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil. **EPE**, Rio de Janeiro, 2024. 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: 07 abr. 2026.

EPE. Nota de esclarecimentos NE-EPE-DPG-SDB-2024-81 – Combustível do Futuro. **EPE**, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-873/topico-745/Nota%20de%20Esclarecimentos%20-%20EPE_Combust%C3%A1vel%20do%20Futuro.pdf. Acesso em: 09 abr. 2026.

FRANCO NETTO, Guilherme. O que esperar da COP no Brasil? Amazônia se torna o epicentro do debate do clima com a conferência que ocorre no Pará em 2025. **Radis: Comunicação e Saúde**, n. 272, p. 14, mai 2025. Disponível em: https://radis.ensp.fiocruz.br/pdf/radis-272_web.pdf. Acesso em: 03 abr. 2026.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION: Filosofia da informação**, 6:57–63, 2020. Acesso em 01 nov. 2025.

GEVO. ASTM Completes Revision of Standard Specification. **Gevo**, Nova Iorque, 2016. Disponível em: <https://investors.gevo.com/news-releases/news-release-details/astm-completes-revision-standard-specification>. Acesso em: 13 mar. 2026.

IBERDROLA. As consequências do efeito de estufa: da desertificação as inundações. **IBERDROLA**, Bilbao, 2026. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/consequencias-efeito-estufa>. Acesso em: 01 abr. 2026

ICAO. Sustainable Aviation Fuels (SAF). **ICAO**, Montreal, 2025a. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF>. Acesso em: 01 dez. 2025.

ICAO. SAF Conversion processes. **ICAO**, Montreal, 2025b. Disponível em: <https://www.icao.int/SAF/saf-conversion-processes>. Acesso em: 11 dez. 2025.

ICAO. About ICAO. **ICAO**, Montreal, 2025c. Disponível em: <https://www.icao.int/about-icao>. Acesso em: 16 dez. 2025.

ICAO. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). **ICAO**, Montreal, 2025d. Disponível em: <https://www.icao.int/CORSIA>. Acesso em: 26 dez. 2025.

ICAO. CORSIA States for Chapter 3 State Pairs. **ICAO**, Montreal, 2025e. Disponível em: <https://www.icao.int/CORSIA/corsia-states-chapter-3-state-pairs>. Acesso em: 01 jan. 2026.

ICAO. CORSIA Implementation Elements. **ICAO**, Montreal, 2025f. Disponível em: <https://www.icao.int/CORSIA/implementation-elements>. Acesso em: 06 jan. 2026.

ICAO. CORSIA METHODOLOGY FOR CALCULATING ACTUAL LIFE CYCLE EMISSIONS VALUES. **ICAO**, Montreal, 2025g. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-07-Methodology-for-Actual-Life-Cycle-Emissions-June-2025.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

ICAO. CORSIA SUSTAINABILITY CRITERIA FOR CORSIA ELIGIBLE FUELS. **ICAO**, Montreal, 2025h. 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: 21 jan. 2026.

ICAO. ICAO Global Framework for SAF, LCAF and other Aviation Cleaner Energies: (Adopted by CAAF/3 on 24 November 2023). **ICAO**, Montreal, 2023. Disponível em: https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ICAO-Global-Framework-on-Aviation-Cleaner-Energies_24Nov2023-1.pdf. Acesso em: 21 dez. 2025.

ICAO. ICAO document: CORSIA Approved Sustainability Certification Schemes. **ICAO**, Montreal, 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/CORSIA/Documents>

/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2004%20-%20Approved%20SCSs%20-%20October%202024.pdf. Acesso em: 16 jan. 2026.

JUNQUEIRA, T. L. Previsão da Evolução de Custo do Etanol 2G. **1º Workshop sobre o Estado da Arte da Tecnologia de Produção de Etanol: de Olho na Segunda Geração**, Campinas, 2015. Disponível em: <https://pages.cnpem.br/tecnologia-etanol/wp-content/uploads/sites/66/2015/12/tassia-junqueira.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2026.

LANZAJET. Sustainable Fuels. **LanzaJet**, Soperton, 2026a. Disponível em: <https://www.lanzajet.com/sustainable-fuels>. Acesso em: 07 mar. 2026.

LANZAJET. Our Technology. **LanzaJet**, Soperton, 2026b. Disponível em: <https://www.lanzajet.com/technology>. Acesso em: 11 mar. 2026.

LANZAJET. Jet Fuel Derived from Ethanol Now Eligible for Commercial Flights. **LanzaJet**, Soperton, 2018. Disponível em: <https://www.lanzajet.com/news-insights/jet-fuel-derived-from-ethanol-now-eligible-for-commercial-flights>. Acesso em: 09 mar. 2026.

LANZATECH. Sustainable Aviation Fuel. **LanzaTech**, Skokie, 2026. Disponível em: <https://lanzatech.com/saf/>. Acesso em: 05 mar. 2026.

LEÃO, L. Alagoas é destaque em produção de combustível limpo para a aviação. **Governo de Alagoas**, Maceió, 2024. Disponível em: <https://alagoas.al.gov.br/noticia/alagoas-e-destaque-em-producao-de-combustivel-limpo-para-a-aviacao>. Acesso em: 09 fev. 2026.

LOPES, D. C. Etanol: o agente para a descarbonização da aviação. **Revista Opiniões**, 2026. Disponível em: <https://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/6-etanol-o-agente-para-d-escarbonizacao-da-aviacao/>. Acesso em: 15 mar. 2026.

MYER, B. PNNL Technology Clears Way for Ethanol-Derived Jet Fuel. **CleanTech Alliance**, Seattle, 2018. Disponível em: <https://www.cleantechalliance.org/2018/06/11/pnnl-technology-clears-way-for-ethanol-derive-d-jet-fuel/>. Acesso em 03 mar. 2026

MME. Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). **MME**, Brasília, 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: 21 abr. 2026.

MOURA, Bruno de Freitas. Petrobras reajusta preço do querosene de aviação em 55%. **Agência Brasil**, Rio de Janeiro, 2026. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2026-04/petrobras-reajusta-preco-do-querosene-de-aviacao-em-55>. Acesso em: 23 abr. 2026.

NEALDO, C. Alagoas registra a maior produção de etanol do Nordeste em 2025. **Governo de Alagoas**, Maceió, 2025. Disponível em:

<https://alagoas.al.gov.br/noticia/alagoas-registra-a-maior-producao-de-etanol-do-nordeste-em-2025>. Acesso em: 05 fev. 2026.

PETROBRAS. QUEROSENE DE AVIAÇÃO: Informações Técnicas. **PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/assistencia-tecnica>. Acesso em: 09 nov. 2025.

PETROBRAS. SAF: veja como investimos em tecnologia rumo ao futuro dos combustíveis sustentáveis. **PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 2026. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/saf-veja-como-investimos-em-tecnologia-rumo-ao-futuro-dos-combustiveis-sustentaveis>. Acesso em: 15 abr. 2026.

PETROBRAS. Petrobras contrata tecnologia para produção de bioquerosene de aviação e diesel 100% renovável. **PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-contrata-tecnologia-para-producao-de-bioquerosene-de-aviacao-e-diesel-100-renovavel>. Acesso em: 25 abr. 2026.

PETROBRAS. Petrobras tem a primeira refinaria do país certificada para produção de SAF. **PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 2025a. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-tem-a-primeira-refinaria-do-pa%C3%ADs-certificada-para-produ%C3%A7%C3%A3o-de-saf>. Acesso em: 26 abr. 2026

PETROBRAS. Petrobras lança combustível sustentável de aviação produzido totalmente no Brasil. **PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 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: 27 abr. 2026.

QUEEN, F. Produção de combustível de aviação de etanol no Brasil é defendida por empresas. **Raízen**, Ribeirão Preto, 2023. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/producao-combustivel-aviacao-etanol-brasil-defendida-empresas-061023>. Acesso em: 19 mar. 2026.

RAÍZEN. Etanol: o que é, como é produzido e quais seus benefícios? **Raízen**, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol>. Acesso em: 13 fev. 2026.

RODRIGUES, L. Setor aéreo pode demandar até 800 bilhões de litros de etanol para SAF até 2050, diz diretor da UNICA. **31ª edição da Fenasucro & Agrocana**, Sertãozinho, 2025. Disponível em: <https://visaoagro.com.br/setor-aereo-pode-demandar-ate-800-bilhoes-de-litros-de-etanol-para-saf-ate-2050-diz-diretor-da-unica/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

ROTHER, E. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 2, n.20, p.7-8, 2007. Acesso em 01 nov. 2025.

SILVA, A. C. D. da. **UMA REVISÃO SOBRE A PRODUÇÃO DE BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO A PARTIR DE BIOETANOL VIA ROTA ATJ**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) — Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/20319/1/ACDSilva.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2026.

SOUZA, G. de J.; SOUSA, D. S. de; MARTINS, R. C.; SANTOS, F. H. de S.; SANT'ANNA, M. C. Perspectivas da rota SPK-ATJ para produção de bioquerosene de aviação: uma análise do potencial brasileiro e maranhense. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23 n. 2, p. 01-21, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n2-099>. Acesso em: 27 mar. 2026.

VAN DYK, S.; SU, J.; MCMILLAN, J. D.; SADDLER, J. J. N. Task 39 'DROP-IN' BIOFUELS: The key role that co-processing will play in its production. **IEA Bioenergy**, 2019. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-drop-in-biofuels-the-key-role-that-co-processing-will-play-in-its-production/#:~:text=Drop%2Din%20biofuels%20are%20%E2%80%9Cliquid,rail%20and%20long%2Ddistance%20trucking>. Acesso em: 21 nov. 2025.

VAN DYK, Susan; SADDLER, Jack. Task 39 Progress in Commercialization of Biojet / Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies. **IEA Bioenergy**, 2024. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2026.

VIDAL, Maria de Fátima. ETANOL. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 9, n. 325, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2711>. Acesso em: 01 fev. 2026.