



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GABRIEL DA SILVA MARQUES DOS PRAZERES

**ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS
DE AVIAÇÃO A PARTIR DA ENERGIA VERDE DA CANA-DE-AÇÚCAR**

JOÃO PESSOA – PB

2026

GABRIEL DA SILVA MARQUES DOS PRAZERES

**ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS
SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO A PARTIR DA ENERGIA VERDE DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

Trabalho Final de Curso apresentado à Coordenação do
Curso de Engenharia Química da Universidade Federal da
Paraíba como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Flávio Luiz Honorato da Silva.

JOÃO PESSOA – PB

2026

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P921r Prazeres, Gabriel da Silva Marques Dos.
ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS
SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO A PARTIR DA ENERGIA VERDE DA
CANA-DE-AÇÚCAR / Gabriel da Silva Marques Dos Prazeres.
- João Pessoa, 2026.
49 f. : il.

Orientação: Flavio Luiz Honorato da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Cana-de-açúcar. 2. Rotas Tecnológicas. 3.
Querosene de Aviação. 4. Combustíveis Sustentáveis de
Aviação. I. Silva, Flavio Luiz Honorato da. II. Título.

UFPB/CT

CDU 66.01(043.2)

GABRIEL DA SILVA MARQUES DOS PRAZERES

**ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS
SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO A PARTIR DA ENERGIA VERDE DA CANA-
DE-AÇÚCAR**

Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Química
da Universidade Federal da Paraíba, como parte
dos requisitos necessários exigidos para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia
Química.

Aprovado em 18 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO LUIZ HONORATO DA SILVA**
Data: 25/03/2026 08:14:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **JOSE ETIMOGENES DUARTE VIEIRA SEGUNDO**
Data: 25/03/2026 09:09:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo
(Examinador)

Documento assinado digitalmente
 **ERLYVANIA DEBORA HENRIQUE DE OLIVEIRA**
Data: 25/03/2026 09:30:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutoranda Erlyvânia Débora Henrique de Oliveira
(Examinadora)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Severino e Maria, expresso minha mais profunda gratidão por todo o apoio, incentivo e confiança ao longo de toda a minha trajetória. Foram eles que, com dedicação, paciência e amor, me deram a base necessária para chegar até aqui, sempre acreditando no meu potencial mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos meus familiares, agradeço o carinho, apoio e compreensão durante essa caminhada. Tiveram um papel fundamental ao me oferecerem suporte, palavras de incentivo e momentos de acolhimento, contribuindo de forma significativa para que eu pudesse seguir firme até a conclusão desta etapa.

Às amigas que construí ao longo dessa trajetória, expresso minha gratidão pela parceria, companheirismo e pelos momentos de apoio. Seja nas conversas, nos incentivos ou simplesmente na presença, vocês tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

Aos professores e à universidade, deixo meu sincero agradecimento pela formação proporcionada, pelos conhecimentos compartilhados e por toda a estrutura oferecida ao longo do curso. Cada ensinamento e orientação contribuíram de maneira essencial para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

O transporte aéreo desempenha papel estratégico na mobilidade global de pessoas e mercadorias, sendo sustentado por diferentes tipos de motores aeronáuticos que utilizam, majoritariamente, querosene de aviação de origem fóssil. Essa dependência contribui para as emissões de gases de efeito estufa, configurando um dos principais desafios ambientais do setor. Nesse contexto, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) surgem como alternativa para a redução das emissões sem a necessidade de alterações significativas na infraestrutura ou nos sistemas de propulsão existentes. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre rotas tecnológicas para a produção de SAF a partir de matérias-primas renováveis, com destaque para o potencial da cana-de-açúcar no Brasil. O estudo aborda rotas de conversão como Alcohol-to-Jet (ATJ), Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT/SPK), e processos voltados à obtenção de Synthetic Iso-Paraffins (SIP), destacando sua compatibilidade com o combustível aeronáutico convencional. Os resultados indicam que a cadeia sucroenergética apresenta elevado potencial para a produção de SAF, devido à ampla disponibilidade de matéria-prima, à alta produtividade agrícola e à infraestrutura consolidada no setor de biocombustíveis. Dessa forma, o desenvolvimento dessas rotas tecnológicas pode contribuir para a descarbonização da aviação e para a expansão do uso de combustíveis renováveis no setor aéreo.

Palavras-chave: combustíveis sustentáveis de aviação; SAF; cana-de-açúcar; rotas tecnológicas.

ABSTRACT

Air transport plays a strategic role in global mobility of people and goods and relies on different types of aircraft engines that predominantly use fossil-based aviation kerosene. This dependence contributes to greenhouse gas emissions and represents a major environmental challenge for the aviation sector. In this context, Sustainable Aviation Fuels (SAF) have emerged as an alternative to reduce emissions while maintaining compatibility with existing infrastructure and propulsion systems. Therefore, this study aimed to conduct a bibliographic review of technological pathways for SAF production from renewable feedstocks, highlighting the potential of sugarcane in the Brazilian context. The study addresses conversion routes such as Alcohol-to-Jet (ATJ), responsible for producing hydrocarbons such as Synthetic Paraffinic Kerosene (SPK), as well as processes aimed at obtaining Synthetic Iso-Paraffins (SIP), emphasizing their compatibility with conventional aviation fuel. The results indicate that the sugar-energy sector presents significant potential for SAF production due to the wide availability of feedstock, high agricultural productivity, and a well-established biofuel industry infrastructure. Thus, the development of these technological pathways may contribute to the decarbonization of aviation and to the expansion of renewable fuels in the air transport sector.

Keywords: sustainable aviation fuels; SAF; sugarcane; technological pathways.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATJ – Alcohol to Jet

CHJ – Catalytic Hydrothermolysis Jet

CORSIA – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FT – Fischer-Tropsch

FT-SPK – Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene

FT-SPK/A – Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics

GEE – Gases de Efeito Estufa

HEFA – Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

IATA – International Air Transport Association

ICAO – International Civil Aviation Organization

QAV – Querosene de Aviação

SAF – Sustainable Aviation Fuel

SIP – Synthetic Iso-Paraffins

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha cronológica da Aviação.....	17
Figura 2 - Ilustração do primeiro voo do 14-Bis	18
Figura 3 - Motor Turbojato.....	20
Figura 4 - Motor turboprop.....	21
Figura 5 - Motor Turbofan.....	22
Figura 6 - Motor Turboshaft	22
Figura 7 - Principais Rubricas de Custo.....	24
Figura 8 - Preço do QAV (R\$/L).....	24
Figura 9 - Consumo estimado de QAV por ano	25
Figura 10 - Diagrama simplificado de uma refinaria de petróleo.....	27
Figura 11 - Esquema de produção de QAV	28
Figura 12 - Cronograma de rotas tecnológicas certificadas.....	32
Figura 13 - Emissões de CO ₂ por setor	34
Figura 14 - Capacidade instalada e projetada de SAF no mundo.....	35
Figura 15 - Oferta x Demanda de SAF no Brasil	36
Figura 16 - Matérias-primas e respectivas rotas tecnológicas	37
Figura 17 - Gráfico de Área x Produção ao longo dos anos.....	39
Figura 18 - Produção de Etanol ao longo dos anos.....	40
Figura 19 - Esquema de produção de SAF via SPK/FT e SPK/A	42
Figura 20 - Esquema de produção de SAF via ATJ-SPK	43
Figura 21 - Esquema simplificado da Rota SIP.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral.....	14
3. METODOLOGIA	14
4. DISCUSSÃO (REVISÃO DA LITERATURA)	16
4.1. Uma breve história da aviação e sua relevância para a globalização	16
4.2. Tipos de motores aeronáuticos modernos	19
4.3. Combustíveis de Aviação.....	23
4.3.1. Definição e composição do Querosene de Aviação - QAV.....	25
4.3.2. Propriedades físico-químicas e requisitos de qualidade.....	28
4.3.4. Tipos de Querosene de Aviação e especificações normativas	29
4.4. Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF).....	30
4.4.1. Conceito, requisitos técnicos e certificação.....	31
4.4.2. Cenário atual e perspectivas de desenvolvimento do SAF	33
4.4.3. Matérias-primas	37
4.5. Cana-de-açúcar	38
4.6. Rotas Tecnológicas de Querosene de Aviação a partir da Cana-de-Açúcar	41
4.6.1. SPK-FT e SPK/A	41
4.6.2. ATJ-SPK	42
4.6.3. SIP	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
6. REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

A consolidação do setor aéreo comercial, ao longo das décadas, foi resultado de diversos avanços tecnológicos e de várias transformações organizacionais, que permitiram ampliar a mobilidade ao redor do mundo. Essa indústria incorporou inúmeras inovações como melhorias em motores, novos materiais aeronáuticos, sistemas automatizados de informação atrelados à logística, além de avanços na gestão e comercialização, proporcionando um dinamismo e uma competitividade maior ao mercado de transportes.

No entanto, mesmo com os avanços tecnológicos e os ganhos de eficiência operacional, a aviação ainda enfrenta desafios significativos do ponto de vista ambiental, sobretudo em razão de sua forte dependência de combustíveis fósseis. Por se tratar de um setor de difícil descarbonização, a tendência de crescimento da demanda por querosene de aviação (QAV) pode intensificar ainda mais as emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo (Confederação Nacional do Transporte, 2025). Assim, a compreensão dos combustíveis fósseis torna-se essencial, uma vez que eles representam a principal fonte das emissões associadas ao setor. Entre os principais exemplos, destacam-se o petróleo, o carvão e o gás natural, formados a partir da decomposição de matérias orgânicas ricas em carbono ao longo de milhões de anos, sob condições específicas de temperatura e pressão. Esses recursos constituem uma das principais fontes de energia no cenário mundial, com ampla aplicação em diversos segmentos, incluindo os setores industrial e de transporte.

Contudo, a queima de combustíveis fósseis, especialmente derivados do petróleo, é uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO_2), um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Esses combustíveis são amplamente utilizados no setor de transportes e na indústria, contribuindo significativamente para a poluição atmosférica e o aumento das emissões de CO_2 (Furtado, 2020).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2024), o setor nacional de transportes é responsável pela maior parcela das emissões, com aproximadamente 214,3 milhões de toneladas de CO_2 produzidas. No mesmo ano, dados oficiais indicaram que o querosene de aviação (QAV) foi responsável por cerca de 3,5% do consumo energético do setor de transportes no país.

Esse combustível também conhecido como Jet A-1, é um combustível derivado do petróleo amplamente utilizado em aeronaves a jato, comerciais e militares (ANP, 2024). O querosene de aviação (QAV) representa uma parcela significativa dos custos operacionais das

companhias aéreas no Brasil, correspondendo a cerca de 30,1%, sendo fortemente influenciado pela variação cambial e pelo mercado internacional de petróleo. Essa dependência resulta em elevada volatilidade dos preços, o que impacta diretamente o valor das passagens aéreas, reduzindo a acessibilidade do transporte e afetando a competitividade do setor. (Campos et al., 2025; Agência Nacional de Aviação Civil, 2025)

Diante desses desafios, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) representam uma alternativa ao querosene convencional, sendo produzidos a partir de matérias-primas renováveis que absorvem CO₂ e proporcionam redução líquida das emissões ao longo de todo o ciclo de vida. Para serem considerados sustentáveis, devem ser derivados de fontes de baixo carbono obtidas de forma contínua, sem competir com a produção de alimentos ou causar impactos relevantes no uso da terra e da água, além de atenderem aos mesmos requisitos técnicos do combustível fóssil, permitindo seu uso sem adaptações nas aeronaves. Podem ser produzidos a partir de diferentes fontes, como óleos e gorduras residuais, resíduos sólidos urbanos, biomassa lignocelulósica e algas, embora existam desafios quanto à viabilidade econômica e à oferta em larga escala; nesse contexto, priorizam-se biocombustíveis de segunda geração para garantir maior sustentabilidade (*Air Transport Action Group*, 2025).

A eficiência na redução das emissões de gases do efeito estufa pelo uso de SAF vai estar diretamente ligada à escolha da matéria-prima e à rota tecnológica adotada para sua produção. Cada rota tecnológica exige diferentes tipos de fontes renováveis e processos de conversão, como hidrotratamento, gaseificação ou fermentação. Para ser classificado como SAF, o combustível deve atender aos requisitos estabelecidos pela norma D7566 da *American Society for Testing and Materials International* (ASTM International), que estabelece os requisitos técnicos e parâmetros de qualidade para os biocombustíveis destinados à aviação. Combustíveis que atendem a esse padrão são reconhecidos como adequados e seguros para uso no setor aeronáutico (Costa et al., 2024).

A escolha do material impacta diretamente nos custos, na disponibilidade e no desempenho ambiental do combustível final, sendo a viabilidade dos insumos condicionada a fatores regionais, estruturais e regulatórios. Nesse cenário, a rastreabilidade e a certificação confiável da matéria-prima, associadas ao seu baixo ou neutro teor de carbono, são essenciais para a produção de SAF. Por outro lado, restrições excessivas a determinados insumos podem limitar a oferta e comprometer o atendimento à demanda global futura. Assim, mais relevante do que o tipo de matéria-prima é o cumprimento de critérios consistentes de rastreabilidade, certificação e sustentabilidade (Costa et al., 2024).

No âmbito nacional, a cana-de-açúcar destaca-se como uma das fontes mais promissoras para a produção de SAF, não apenas pelo elevado rendimento agrícola, mas também pela estrutura consolidada da cadeia de biocombustíveis. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra de 2024/2025, o país produziu cerca de 687 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, resultando em aproximadamente 29 bilhões de litros de etanol e gerando grandes volumes de subprodutos como melaço, bagaço e palha lignocelulósica. Diante desse potencial, evidencia-se a relevância de aprofundar o conhecimento sobre o aproveitamento dessa matéria-prima no contexto da produção de combustíveis sustentáveis de aviação.

Assim, a realização de uma revisão bibliográfica mostra-se fundamental para reunir e analisar de forma crítica o conhecimento disponível sobre a produção de SAF no Brasil, com ênfase na cana-de-açúcar, que se destaca pela ampla disponibilidade, elevado potencial produtivo e papel já consolidado na matriz de biocombustíveis do país. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial dessa matéria-prima na produção de SAF, considerando as principais rotas tecnológicas envolvidas e sua contribuição para a descarbonização do setor aeronáutico, frente aos desafios energéticos e ambientais atuais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica sobre o potencial da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) no Brasil, considerando suas rotas tecnológicas e sua contribuição para a descarbonização do setor aeronáutico

3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como um estudo de natureza teórica, de caráter exploratório e descritivo, desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, com o objetivo de fundamentar teoricamente a análise sobre as rotas tecnológicas para produção de combustíveis sustentáveis de aviação a partir da cana-de-açúcar, uma biomassa-energia verde.

As etapas utilizadas para realizar o desenvolvimento do texto principal estão apresentadas de forma sintética na Tabela 1, conforme orientações observadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2016), adaptadas à temática central do trabalho.

Tabela 1 – Etapas de elaboração do trabalho

Etapas	Descrição
Definição do tema	Delimitação do objeto de estudo relacionado aos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), considerando aspectos conceituais, tecnológicos, ambientais e regulatórios.
Levantamento das fontes	Busca em bases de dados nacionais e internacionais, com recorte temporal de 2009 a 2025, período marcado pelo desenvolvimento das principais rotas de produção de SAF.
Seleção do material	Priorização de fontes com rigor científico, incluindo artigos, teses e dissertações, bem como documentos técnicos-informativos provenientes de instituições e órgãos reconhecidos.

Leitura e análise crítica	Leitura exploratória e analítica das obras selecionadas, com identificação de conceitos centrais e verificação da existência ou ausência de convergências (consenso entre autores) e divergências, especialmente quanto à viabilidade, eficiência e limitações das rotas de produção.
Sistematização das informações	Organização dos conteúdos em eixos temáticos para subsidiar a construção do referencial teórico da dissertação.
Síntese teórica	Integração das informações obtidas, servindo de base para a discussão do texto principal sobre SAF.
Fonte: Próprio Autor (2025)	

As fontes utilizadas para a realização do levantamento bibliográfico deste estudo foram:

- Google Acadêmico: selecionado por indexar ampla variedade de publicações científicas nacionais e internacionais, incluindo artigos, periódicos, anais de eventos e documentos técnicos relacionados aos setores energético e aeronáutico.
- Publicações e documentos técnicos-informativos de órgãos reguladores e entidades representativas do setor: incluindo materiais da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), da Petrobras, da *International Civil Aviation Organization* (ICAO), da *International Air Transport Association* (IATA), da *ASTM International* (ASTM), da *Air Transport Action Group* (ATAG) e da *International Energy Agency* (IEA), com o objetivo de assegurar o alinhamento do referencial teórico às normas, diretrizes e práticas vigentes.

4. DISCUSSÃO (REVISÃO DA LITERATURA)

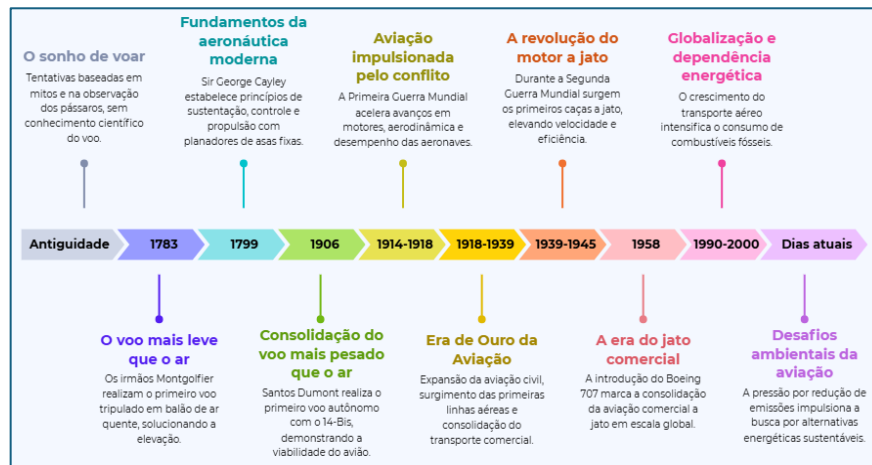
4.1. Uma breve história da aviação e sua relevância para a globalização

A aviação consolidou-se, ao longo de sua trajetória histórica, como um dos principais pilares da globalização, ao possibilitar a integração rápida entre mercados, culturas e cadeias produtivas em escala mundial. Os avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de motores mais eficientes e o uso de novos materiais, ampliaram a segurança, a velocidade e a capacidade das aeronaves, impulsionando o transporte de passageiros e cargas. Além disso, o setor exerceu papel estratégico em contextos militares e contribuiu para o crescimento do comércio internacional e do turismo, tornando-se um símbolo de progresso econômico e tecnológico. Apesar disso, ainda enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade, demandando soluções que garantam sua continuidade de forma mais eficiente e ambientalmente responsável (Carvalho, 2024).

Nesse contexto, o transporte aéreo assume papel central na mobilidade global e no crescimento econômico, com projeções que indicaram a movimentação de aproximadamente 9,8 bilhões de passageiros em 2025, sendo as viagens internacionais o principal vetor de crescimento, ainda que com variações regionais associadas a fatores estruturais, políticos e a mudanças nos padrões de viagem, o que evidencia a necessidade de políticas regulatórias voltadas à conectividade, à resiliência de longo prazo e ao crescimento sustentável do setor (*Airports Council International*, 2025).

Diante desse processo histórico de evolução técnica e de ampliação do papel estratégico da aviação no contexto global, torna-se pertinente visualizar, de forma sintética, os marcos que estruturaram essa trajetória ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta, de forma cronológica, os principais marcos históricos e inovações tecnológicas que caracterizam a evolução da aviação, evidenciando a progressão tecnológica que sustentou sua expansão ao longo do tempo.

Figura 1 - Linha cronológica da Aviação



Fonte: Autor (2026)

A trajetória da aviação inicia-se a partir de tentativas empíricas de voo humano, inspiradas na observação dos pássaros e em concepções míticas, evoluindo, a partir do século XVIII, para abordagens científicas mais sistematizadas. Os avanços iniciais da aviação envolveram tanto experimentos com dispositivos mais leves que o ar quanto o desenvolvimento de aeronaves mais pesadas que o ar. Enquanto os balões de ar quente demonstraram a viabilidade da sustentação no ar, foi o aprofundamento científico conduzido por pesquisadores como Sir George Cayley que permitiu a consolidação da aeronáutica moderna. Ao longo do século XIX, Cayley formulou os princípios fundamentais do voo controlado, estabelecendo o uso de asas fixas, superfícies de controle e a separação funcional entre sustentação e propulsão. Reconhecido como o “pai da navegação aérea”, suas contribuições incluíram a construção do primeiro aeromodelo funcional e testes com aeronaves tripuladas em escala real, que serviram de base para o desenvolvimento posterior das aeronaves (ANAC, 2023).

No final do século XIX e início do século XX, os avanços nos sistemas de propulsão viabilizaram os primeiros voos motorizados controlados. Nesse contexto, Alberto Santos Dumont destacou-se como figura central na consolidação do voo mecânico, sendo responsável pela realização de um voo autônomo e pelo desenvolvimento de dirigíveis e aeronaves pioneiras que contribuíram de forma decisiva para o avanço da navegação aérea. Em 1901, ao conquistar o Prêmio Deutsch de La Meurthe, sob supervisão do Aeroclube da França, Santos Dumont demonstrou o controle efetivo de um veículo aéreo, marco que simboliza o início da Era da Navegação Aérea. Posteriormente, em 1906, realizou o primeiro voo completo de uma aeronave mais pesada que o ar a decolar por meios próprios, utilizando o avião 14-Bis, feito amplamente

reconhecido como um dos marcos fundadores da aviação moderna (Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2024).

Figura 2 - Ilustração do primeiro voo do 14-Bis



Fonte: MAST (2024)

O percurso de Santos Dumont foi caracterizado por sucessivas experimentações e aprendizados decorrentes de falhas técnicas. Desde os primeiros ensaios com balões, iniciados em 1898, até os testes com o avião Demoiselle, em 1910, o inventor enfrentou inúmeros acidentes, os quais foram tratados como oportunidades de análise e aprimoramento dos projetos. Essa abordagem experimental, aliada à divulgação pública de seus resultados, contribuiu para o avanço científico da aeronáutica e para a consolidação dos princípios que orientariam o desenvolvimento das aeronaves nas décadas seguintes (Museu de Astronomia e Ciências Afins, 2024).

Ao longo do século XX, a evolução da aviação foi impulsionada por demandas militares e avanços tecnológicos associados às guerras mundiais, promovendo melhorias em aerodinâmica, materiais e sistemas de propulsão. Na década de 1930, durante a chamada Era de Ouro da Aviação, esses avanços possibilitaram o desenvolvimento de aeronaves maiores, mais rápidas e com maior capacidade de carga e passageiros, além de melhorias nos sistemas de navegação, comunicação por rádio e introdução do piloto automático, aumentando a confiabilidade operacional (Fay; Oliveira, 2011).

A expansão da aviação comercial na segunda metade do século XX transformou o transporte aéreo em um elemento central da globalização. A redução do tempo de deslocamento entre continentes favoreceu a integração econômica, o turismo internacional, a circulação de pessoas e mercadorias e a formação de cadeias produtivas globais. Assim, a aviação passou a

exercer papel estratégico no desenvolvimento econômico e social, conectando regiões distantes e viabilizando a intensificação das relações internacionais. Esse crescimento, entretanto, esteve historicamente associado ao uso intensivo de combustíveis fósseis, tornando necessária, no cenário contemporâneo, a transição para alternativas de menor impacto ambiental, como os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).

4.2. Tipos de motores aeronáuticos modernos

Os motores a jato operam em regime contínuo de combustão, diferentemente dos motores de ciclo Otto ou Diesel, nos quais o funcionamento ocorre por ciclos. Por essa razão, parâmetros como número de octano ou de cetano não são aplicáveis aos combustíveis utilizados na aviação. Em princípio, diferentes frações do petróleo poderiam ser empregadas nesses motores; entretanto, o querosene mostrou-se o mais adequado devido às suas propriedades físico-químicas, como a menor volatilidade em relação à gasolina, o que reduz a formação de bolhas e aumenta a segurança no manuseio, além da menor massa molar média em comparação ao diesel, característica que favorece o desempenho em baixas temperaturas típicas de grandes altitudes (Prauchner *et al.*, 2024)

Esses motores podem ser classificados de acordo com o tipo de compressor utilizado em seu sistema de admissão de ar. De modo geral, existem três configurações principais de compressores: fluxo centrífugo, fluxo axial e fluxo centrífugo-axial. No compressor de fluxo centrífugo, a compressão ocorre quando o ar é acelerado radialmente para fora, de forma perpendicular ao eixo longitudinal do motor. Já no compressor de fluxo axial, o ar é comprimido ao atravessar sucessivas fileiras de aerofólios rotativos e estacionários, deslocando-se paralelamente ao eixo do motor. Por sua vez, o compressor centrífugo-axial combina características de ambos os sistemas, buscando alcançar níveis mais elevados de compressão do ar (ANAC, 2024).

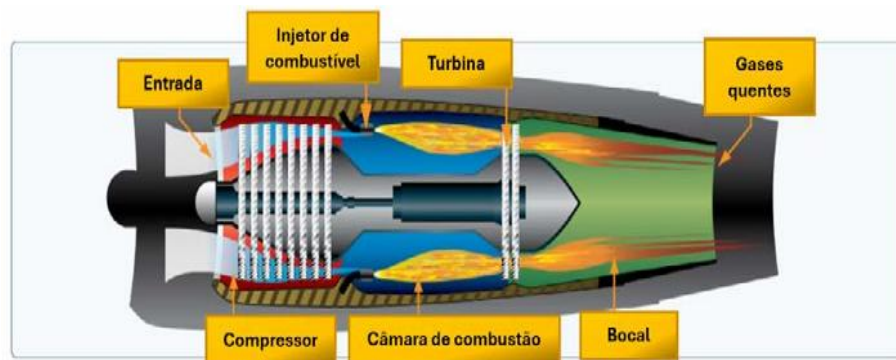
Nesse contexto, destacam-se os tipos de motores aeronáuticos apresentados a seguir, cuja classificação tem como base os materiais técnicos do programa Aero Saber, desenvolvido pela Agência Nacional de Aviação Civil (2024), voltado à disseminação do conhecimento na aviação civil.

- Turbojato

O turbojato (turbojet) é um dos modelos mais simples de motores a turbina. Ele é constituído basicamente por quatro seções principais: compressor, câmara de combustão, turbina e sistema de escapamento. Nesse tipo de motor, o ar é comprimido, misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão. A expansão dos gases movimenta a turbina, responsável por acionar o compressor e, ao sair pelo escapamento em alta velocidade, gera o empuxo que impulsiona a aeronave.

A Figura 3 apresenta um esquema simplificado do funcionamento de um motor turbojato.

Figura 3 - Motor Turbojato



Fonte: ANAC (2024)

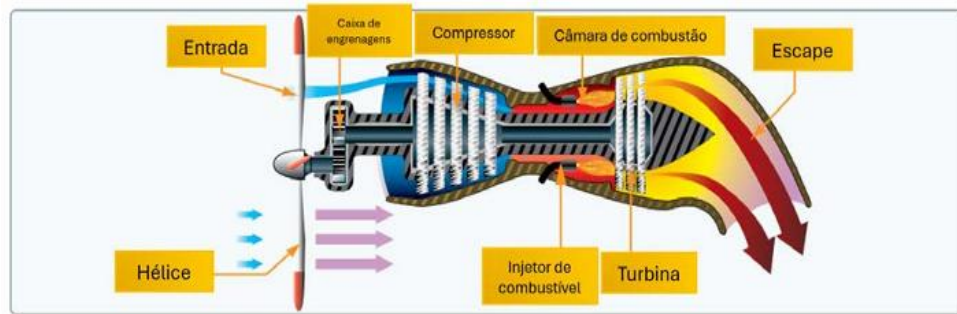
Esse tipo de motor apresenta elevada velocidade de exaustão dos gases e foi amplamente utilizado nas primeiras gerações de aeronaves a jato, sendo ainda empregado em algumas aeronaves militares devido à sua capacidade de atingir altas velocidades.

- Turboélice

O motor turboélice (turboprop) combina características de motores a turbina e motores convencionais com hélice. Nesse sistema, os gases resultantes da combustão acionam uma turbina conectada a um conjunto de engrenagens redutoras, responsável por transmitir potência à hélice. A redução é necessária porque a eficiência da hélice ocorre em rotações menores que as do motor.

A Figura 4 apresenta um esquema simplificado do funcionamento de um motor turboélice.

Figura 4 - Motor turboprop



Fonte: ANAC (2024)

A maior parte do empuxo nesse tipo de motor é produzida pela hélice, enquanto uma pequena parcela resulta da saída dos gases de escape. Motores turboélice apresentam boa eficiência em velocidades moderadas e altitudes intermediárias, sendo amplamente utilizados em aeronaves regionais e de transporte de menor porte (Electra, Fokker, etc).

- Turbopan

Os motores turbopan foram desenvolvidos para combinar características do turbojato e do turboélice, oferecendo maior eficiência energética e menor consumo de combustível. Nesse tipo de motor, o ar admitido é dividido em dois fluxos: um passa pelo núcleo do motor, onde ocorre a combustão, e outro desvia ao redor da câmara de combustão, contribuindo para a geração adicional de empuxo. Esse fluxo secundário de ar, chamado de fluxo de desvio (bypass), também auxilia na redução do ruído e no resfriamento do motor. Devido a essas características, os turbopans são atualmente os motores mais utilizados na aviação comercial, proporcionando melhor desempenho em cruzeiro e maior eficiência no consumo de combustível.

A Figura 5 apresenta a configuração típica desse tipo de motor.

Figura 5 - Motor Turbofan



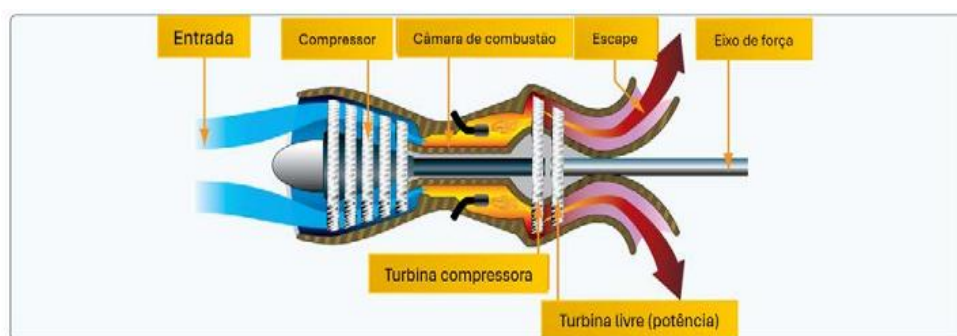
Fonte: ANAC (2024)

- Turboshaft

O turboshaft é um tipo de motor a turbina projetado para fornecer potência mecânica a um eixo, em vez de produzir empuxo diretamente pelos gases de escape. Nesse sistema, a maior parte da energia gerada pela expansão dos gases é utilizada para acionar uma turbina conectada a um eixo de transmissão.

A Figura 6 apresenta o esquema de funcionamento do motor do tipo turboshaft.

Figura 6 - Motor Turboshaft



Fonte: ANAC (2024)

Esse tipo de motor é amplamente empregado em helicópteros, onde a potência gerada é utilizada para movimentar o rotor principal. Além disso, também pode ser utilizado como unidade auxiliar de potência em aeronaves de grande porte.

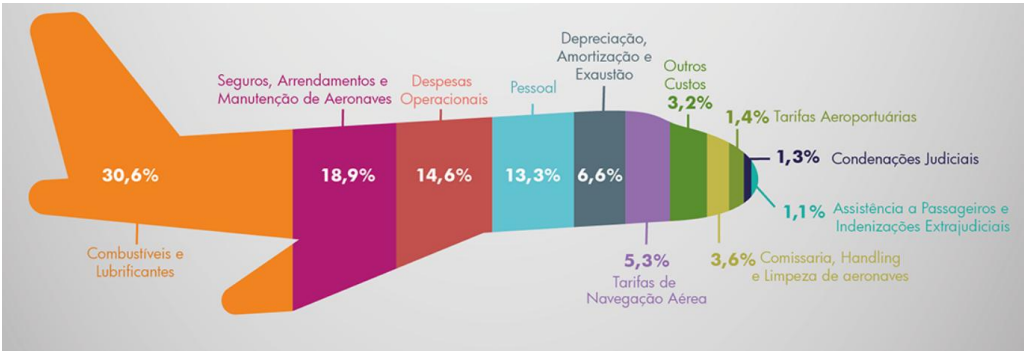
4.3. Combustíveis de Aviação

Os combustíveis de aviação desempenham papel fundamental no desempenho, na segurança e na eficiência operacional do transporte aéreo, com destaque para o querosene de aviação (QAV) e a gasolina de aviação (GAV), empregados conforme o tipo de aeronave e de motor. As características desses combustíveis estão diretamente relacionadas às exigências operacionais dos diferentes tipos de motores aeronáuticos, sendo os motores de reação alimentados pelo QAV e os motores a pistão pela GAV, além das condições severas de operação e do atendimento às normas técnicas que regulamentam sua produção, controle de qualidade e aplicação. (ANP, 2024).

Nesse contexto, embora ambos sejam considerados, o presente estudo concentra-se no QAV, dada sua ampla aplicação na aviação comercial, tornando-se essencial a compreensão de sua origem, composição, propriedades físico-químicas e classificação, como base conceitual para a análise do combustível convencional e das alternativas sustentáveis aplicáveis ao setor aeronáutico.

O combustível representa um dos principais fatores de custo no setor de aviação, exercendo forte influência sobre a viabilidade econômica das operações aéreas. Entre os diversos componentes que compõem a estrutura de despesas das companhias aéreas, os gastos com combustíveis e lubrificantes correspondem à maior parcela dos custos operacionais. Esse peso elevado faz com que variações no preço do combustível tenham impacto direto nas tarifas, na competitividade das empresas e na dinâmica do setor aéreo como um todo. Conforme apresentado na Figura 7, os gastos com combustíveis e lubrificantes representam cerca de 30,6% dos custos operacionais, constituindo a maior parcela entre os componentes analisados. Outros custos relevantes incluem seguros, arrendamentos e manutenção de aeronaves (18,9%), despesas operacionais (14,6%) e custos com pessoal (13,3%). Essa distribuição demonstra que o combustível exerce forte influência sobre a viabilidade econômica das operações aéreas, de modo que variações em seu preço podem impactar diretamente o custo do transporte aéreo.

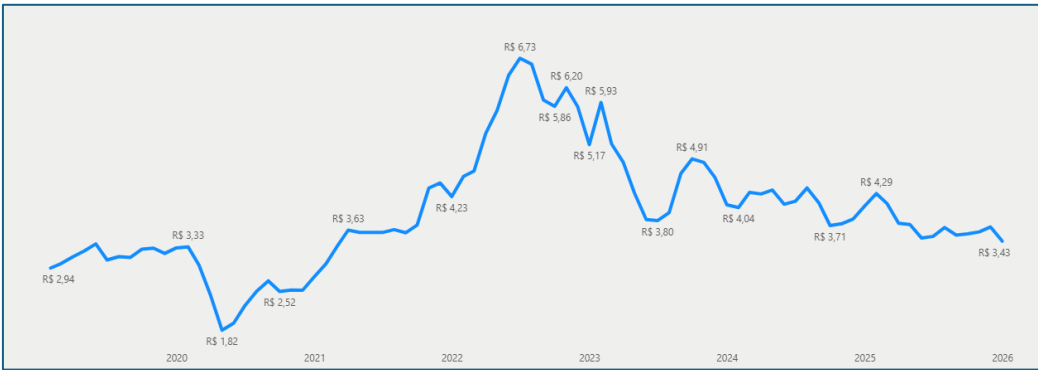
Figura 7 - Principais Rubricas de Custo



Fonte: ANAC (2024).

Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2025), o preço do querosene de aviação (QAV) ao longo dos últimos anos apresentou variações significativas. Conforme a Figura 8, observa-se uma queda no período mais crítico da pandemia de COVID-19, em função da redução da demanda por voos, seguida por uma forte elevação a partir de 2022, associada à retomada das atividades do setor. Nos anos subsequentes, verificam-se oscilações marcadas por períodos de alta e baixa, refletindo a instabilidade do mercado energético. Esse comportamento reflete a influência das condições do mercado energético sobre os custos operacionais do setor aéreo, sendo intensificado pela dependência parcial de importações de derivados, o que aumenta a exposição às variações do petróleo e à volatilidade cambial (Campos *et al.*, 2025)

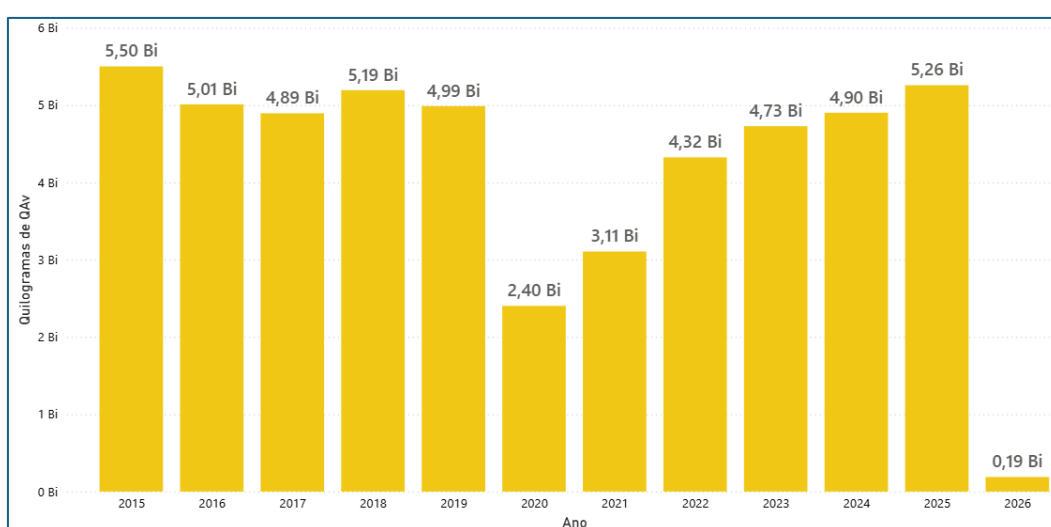
Figura 8 - Preço do QAV (R\$/L)



Fonte: ANAC (2024)

Paralelamente às variações de preço, o consumo de querosene de aviação (QAV) no Brasil permaneceu elevado. A Figura 9 apresenta a evolução desse consumo ao longo dos últimos anos, evidenciando a magnitude da demanda no setor aéreo, que, segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (2025), atingiu 5,26 bilhões de quilogramas em 2025. Em comparação com a retração observada durante o período mais crítico da pandemia, verifica-se uma recuperação consistente nos anos subsequentes.

Figura 9 - Consumo estimado de QAV por ano



Fonte: ANAC, 2026

4.3.1. Definição e composição do Querosene de Aviação - QAV

O querosene de aviação (QAV), também denominado internacionalmente como Jet A-1, é um combustível derivado do petróleo, constituído por uma mistura complexa de hidrocarbonetos líquidos resultantes do seu fracionamento. Sua composição envolve principalmente hidrocarbonetos alifáticos, naftênicos e aromáticos, com cadeias carbônicas variando entre C8 e C16, posicionando-se como uma fração intermediária entre a gasolina e o diesel. A partir da análise de sua composição média, pode-se representar esse combustível por uma fórmula aproximada de $C_{11}H_{21}$, com massa molar em torno de $153,3 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ (IHA *et al.*, 2018).

De acordo com o Manual de Querosene de Aviação da Petrobras (2024), a obtenção do QAV ocorre em uma faixa de destilação entre aproximadamente 150 °C e 300 °C, intervalo no qual são separadas frações com predominância de hidrocarbonetos parafínicos.

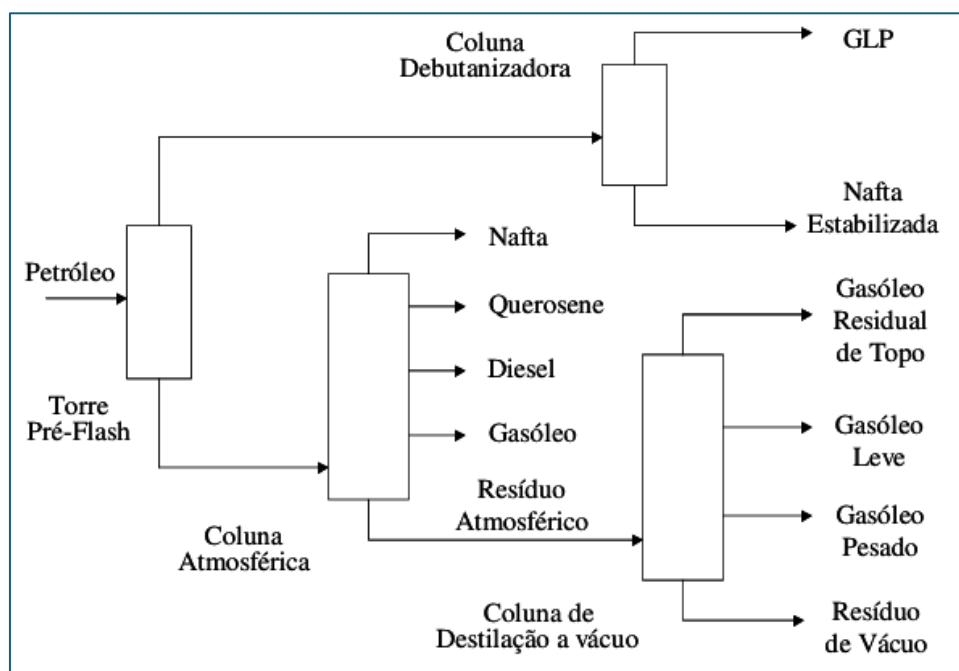
Esse combustível é essencial para o funcionamento de motores a turbina, devendo apresentar propriedades que garantam segurança e desempenho, como boa fluidez em baixas temperaturas, estabilidade e queima eficiente, além de passar por etapas de tratamento para remoção de impurezas e ajuste de suas características físico-químicas. (CAMPOS *et al.*, 2025).

O refino de petróleo consiste em um conjunto de etapas nas quais o petróleo bruto é processado para a obtenção de diferentes produtos que atendam às especificações de qualidade exigidas pelo mercado. Nesse processo, a unidade de destilação destaca-se como uma das mais importantes da refinaria, pois é responsável pelo fracionamento inicial do petróleo em diversas correntes, como nafta, querosene e diesel.

Parte dessas frações pode ser destinada diretamente como produto, enquanto outras seguem para unidades de processamento adicionais. Além disso, em razão das variações na demanda por derivados, as refinarias precisam apresentar flexibilidade operacional, empregando unidades de conversão, como o craqueamento catalítico e a destilação a vácuo, que permitem transformar o excedente de determinadas frações em outros produtos de maior interesse (Yamanishi, 2007).

Com isso, o processo de refino do petróleo pode ser representado de forma simplificada no diagrama da Figura 10, que ilustra o fluxo básico de uma refinaria, iniciando-se na torre pré-flash e seguindo para a coluna de destilação atmosférica, onde ocorre a separação em frações como nafta, querosene, diesel e gasóleo. As correntes mais pesadas são encaminhadas à destilação a vácuo, gerando gasóleo leve, gasóleo pesado e resíduo de vácuo, enquanto as frações leves são direcionadas à coluna debutanizadora, resultando em GLP e nafta estabilizada.

Figura 10 - Diagrama simplificado de uma refinaria de petróleo



Fonte: Yamanishi (2007)

Devido às exigências de segurança do setor de aviação, a formulação do querosene de aviação envolve etapas adicionais de processamento destinadas a garantir maior pureza e estabilidade do combustível. Entre essas etapas, destaca-se o hidrorrefino, que contribui para a obtenção de um combustível com menor tendência à corrosão e à oxidação. Além disso, processos como alquilação e isomerização catalítica são utilizados para melhorar as propriedades em baixas temperaturas, enquanto a remoção de n-parafinas por adsorção auxilia na adequação das características do combustível. Mesmo após esses tratamentos, é comum a adição de aditivos anticongelantes e anticorrosivos para assegurar o desempenho adequado do QAV (Prauchner *et al.*, 2024).

As etapas complementares empregadas no refino para a obtenção do querosene de aviação podem ser observadas no diagrama apresentado na Figura 11.

Combustão	Relaciona-se ao desempenho energético, incluindo poder calorífico, massa específica, ponto de fuligem e teor de aromáticos, assegurando eficiência e menor formação de resíduos.
Corrosividade e dissolução de elastômeros	Avalia o potencial de corrosão em metais e degradação de elastômeros, por meio de ensaios como corrosividade ao cobre e teor de enxofre mercaptídico.
Água	A presença de água pode causar cristalização em baixas temperaturas, crescimento microbiológico e corrosão, sendo um parâmetro crítico para o combustível.
Segurança	Relaciona-se ao manuseio e armazenamento, sendo o ponto de fulgor um dos principais indicadores do risco de inflamabilidade.

Fonte: Adaptado Petrobras (2024)

4.3.4. Tipos de Querosene de Aviação e especificações normativas

De acordo com a Resolução ANP nº 856/2021, os combustíveis de aviação do tipo querosene são classificados em diferentes categorias, abrangendo combustíveis fósseis convencionais, misturas contendo frações renováveis e combustíveis produzidos integralmente a partir de matérias-primas alternativas. Entre os principais tipos regulamentados destacam-se o JET A, o JET A-1, o JET C e o querosene de aviação alternativo, obtido por distintas rotas tecnológicas e passível de utilização isoladamente ou em misturas com combustíveis convencionais.

- I. JET A: é um combustível de aviação de origem fóssil obtido a partir do refino do petróleo, destinado exclusivamente ao uso em motores aeronáuticos do tipo turbina. Conforme especificado pela ANP, apresenta ponto máximo de congelamento de -40 °C, sendo amplamente utilizado em operações aeronáuticas que não demandam condições extremas de temperatura. Sua composição é semelhante à do JET A-1, diferindo principalmente pelas propriedades relacionadas ao comportamento em baixas temperaturas

- II. JET A-1: também é um combustível de origem fóssil destinado ao consumo em turbinas aeronáuticas, sendo o tipo mais utilizado na aviação comercial internacional. Apresenta ponto máximo de congelamento de -47°C , característica que favorece sua aplicação em operações em grandes altitudes e rotas internacionais, nas quais o combustível é submetido a temperaturas mais severas.
- III. JET Alternativo: compreende combustíveis produzidos a partir de fontes não fósseis, como biomassa, óleos vegetais, gorduras animais, resíduos sólidos, gases residuais, carvão e gás natural, desde que obtidos por processos tecnológicos aprovados pela ANP. Esses combustíveis são desenvolvidos com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e ampliar a sustentabilidade do setor aeronáutico, podendo ser utilizados de forma isolada ou em misturas com combustíveis convencionais, conforme limites regulatórios estabelecidos.
- Querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ);
 - Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT);
 - Querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A);
 - Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA);
 - Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bio-derivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HC-HEFA);
 - Querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ).
- IV. JET C: corresponde a um combustível formulado pela mistura de um único tipo de querosene alternativo com o JET A ou com o JET A-1. As proporções de mistura são definidas pela regulamentação da ANP, permitindo a incorporação gradual de componentes renováveis aos combustíveis convencionais sem comprometer a segurança e o desempenho dos motores aeronáuticos. Essa categoria representa uma alternativa intermediária para a transição energética no setor da aviação

4.4. Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF)

Os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (*Sustainable Aviation Fuels* – SAF) representam uma alternativa estratégica ao querosene de aviação de origem fóssil, inserindo o setor aeronáutico no contexto da transição energética. Esses combustíveis têm se consolidado como uma das principais rotas para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa associadas ao transporte aéreo, ao possibilitar reduções significativas de CO₂ ao longo do ciclo de vida do combustível, dependendo das matérias-primas e dos processos produtivos empregados.

De forma geral, os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) são desenvolvidos para compatibilizar desempenho operacional, segurança e sustentabilidade ambiental, permitindo sua adoção progressiva sem comprometer a confiabilidade das operações aeronáuticas. Assim, seu desenvolvimento e regulamentação assumem papel central nas políticas de descarbonização da aviação civil em âmbito nacional e internacional.

4.4.1. Conceito, requisitos técnicos e certificação

A Agência Nacional de Aviação Civil (2024) define os combustíveis sustentáveis de aviação como aqueles obtidos a partir de matérias-primas renováveis ou de resíduos, quimicamente equivalentes ao querosene de aviação de origem fóssil e passíveis de utilização nos sistemas aeronáuticos existentes sem a necessidade de modificações em motores ou aeronaves, desde que atendam aos critérios de sustentabilidade ambiental estabelecidos.

Esses combustíveis, também conhecidos como Biojet ou Bioquerosene de Aviação (BioQAV), podem proporcionar reduções nas emissões de dióxido de carbono da ordem de 70% a 90% ao longo do ciclo de vida, em comparação ao querosene convencional, a depender da rota tecnológica adotada e dos insumos empregados em sua produção (Raízen, 2023).

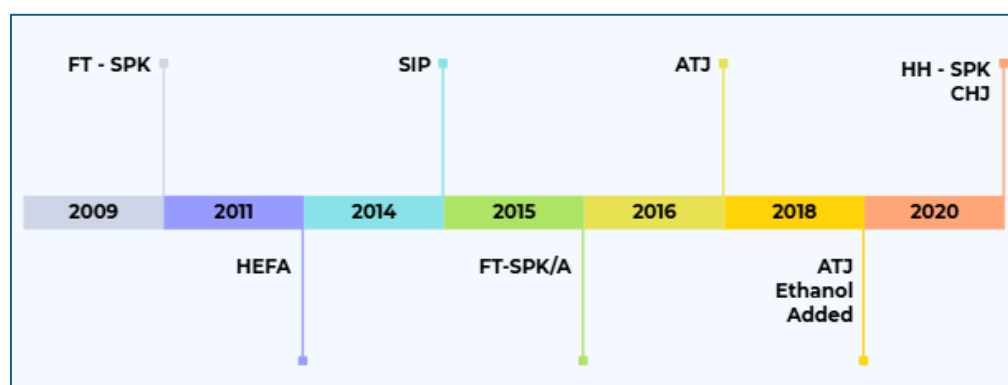
Para que possa substituir o combustível convencional de aviação, é necessário que apresente as mesmas qualidades e características técnicas. Isso é fundamental para assegurar que fabricantes não precisem redesenhar motores ou aeronaves, bem como para evitar que fornecedores de combustível e aeroportos tenham que construir novos sistemas de abastecimento, o que poderia ser exigido em alternativas como hidrogênio ou eletrificação. Atualmente, a indústria concentra seus esforços na produção de combustíveis do tipo “*drop-in*” como substitutos do querosene convencional. Esses combustíveis são totalmente fungíveis com

o querosene tradicional e não requerem adaptações nos motores nem na infraestrutura de distribuição associada (IATA, s.d).

As especificações internacionais de qualidade do querosene de aviação são estabelecidas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). A norma ASTM D1655 define os requisitos para os combustíveis JET A e JET A-1, enquanto a ASTM D7566 estabelece os padrões para querosenes de aviação que contêm hidrocarbonetos sintéticos (Souza et al., 2025)

A evolução das rotas aprovadas na ASTM D7566, conforme ilustrado na Figura 12, demonstra o avanço gradual das tecnologias ao longo da última década.

Figura 12 - Cronograma de rotas tecnológicas certificadas



Fonte: Adaptado IATA (s.d)

De acordo com a IATA, a certificação das rotas tecnológicas para produção de combustíveis sustentáveis de aviação ocorreu de forma gradual ao longo dos últimos anos, com a aprovação de diferentes processos capazes de gerar combustíveis compatíveis com o querosene de aviação convencional. Entre as principais rotas certificadas destacam-se:

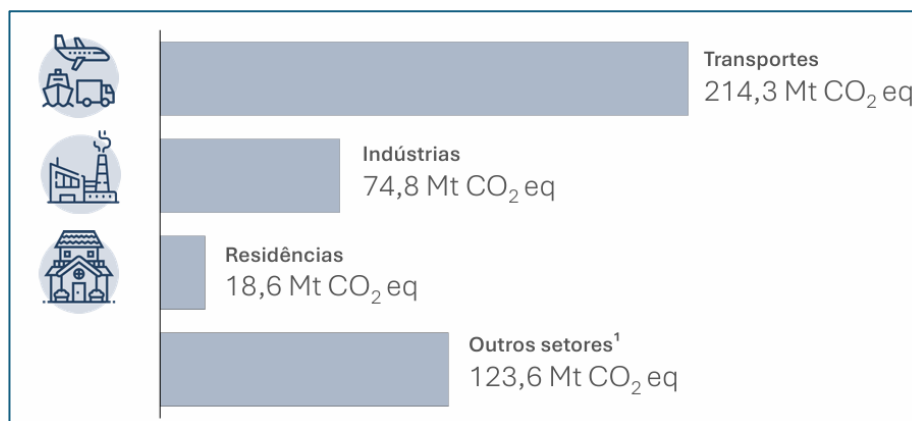
- 2009 – FT-SPK (*Fischer-Tropsch Synthesized Paraffinic Kerosene*): baseada na gaseificação de carvão, gás natural ou biomassa para produção de gás de síntese, posteriormente convertido cataliticamente em hidrocarbonetos líquidos.
- 2011 – HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*): utiliza óleos vegetais, gorduras animais ou resíduos oleosos submetidos à desoxigenação e hidrocessamento para obtenção de compostos compatíveis com o querosene de aviação.

- 2014 – SIP (*Synthesized Isoparaffins*): fundamentada na fermentação de matérias-primas açucaradas para produção de moléculas hidrocarbonéticas.
- 2015 – FT-SPK/A: variante do processo Fischer-Tropsch que incorpora compostos aromáticos ao combustível sintético.
- 2016 – ATJ (*Alcohol-to-Jet*) com isobutanol: rota certificada com limite de mistura de até 50% ao combustível fóssil.
- 2018 – ATJ com etanol: inclusão do etanol como matéria-prima elegível na rota ATJ, mantendo-se o limite máximo de mistura de 50%.

A certificação dessas rotas demonstra a expansão progressiva das alternativas tecnológicas disponíveis para a produção de SAF, mantendo como requisito fundamental o atendimento aos padrões internacionais de segurança e desempenho exigidos para combustíveis de aviação.

4.4.2. Cenário atual e perspectivas de desenvolvimento do SAF

O desenvolvimento do combustível sustentável de aviação (SAF) está diretamente relacionado à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor aéreo, considerada uma atividade de difícil descarbonização. A análise das emissões de CO₂ associadas aos diferentes setores da economia permite compreender a relevância de alternativas energéticas mais sustentáveis para a mitigação desses impactos. Como pode ser observado na Figura 13, que apresenta a distribuição das emissões de CO₂ por setor no Brasil.

Figura 13 - Emissões de CO₂ por setor

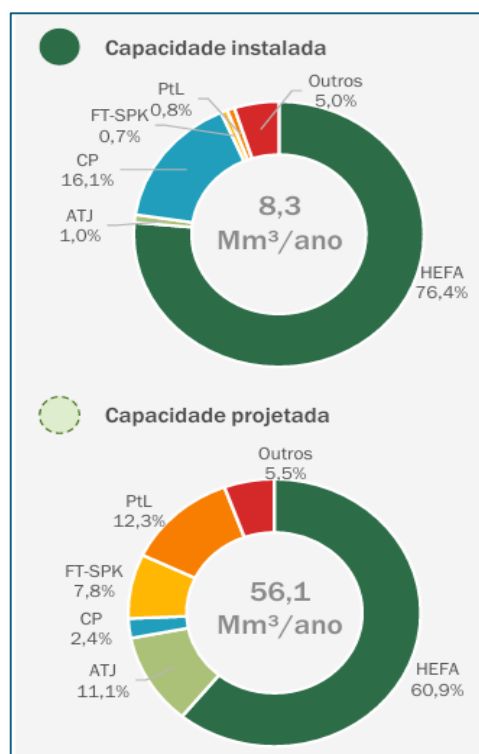
Fonte: EPE (2024)

Como pode ser visto na Figura 13, o setor de transportes apresenta participação significativa nas emissões de CO₂ de 214,3 Mt, destacando-se como um dos principais responsáveis pelas emissões associadas ao consumo de combustíveis fósseis. Dentro desse setor, a aviação também contribui para a geração de gases de efeito estufa, o que reforça a necessidade de estratégias voltadas à redução da intensidade de carbono dos combustíveis utilizados nas operações aéreas.

No Brasil, dados da Agência Nacional de Aviação Civil (2025) indicam que o consumo de querosene de aviação (QAV) em voos domésticos e internacionais alcançou cerca de 5,2 bilhões de kg, resultando na emissão aproximada de 16,6 milhões de kg de CO₂ equivalente em 2025. Diante desse cenário, o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis de aviação tem sido apontado como uma das principais alternativas para reduzir a intensidade de carbono do setor aéreo. Nos últimos anos, observa-se um avanço no desenvolvimento da cadeia produtiva do SAF, com o surgimento de novos projetos industriais e a expansão da capacidade de produção em diferentes regiões do mundo.

Esse crescimento pode ser observado na Figura 14, que apresenta a capacidade global instalada e projetada de produção de SAF associada às diferentes rotas tecnológicas.

Figura 14 - Capacidade instalada e projetada de SAF no mundo



Fonte: EPE (2024)

Além da expansão da capacidade produtiva, o mercado de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) apresenta variações regionais associadas à disponibilidade de matérias-primas, às políticas de incentivo e aos compromissos de descarbonização adotados por diferentes países.

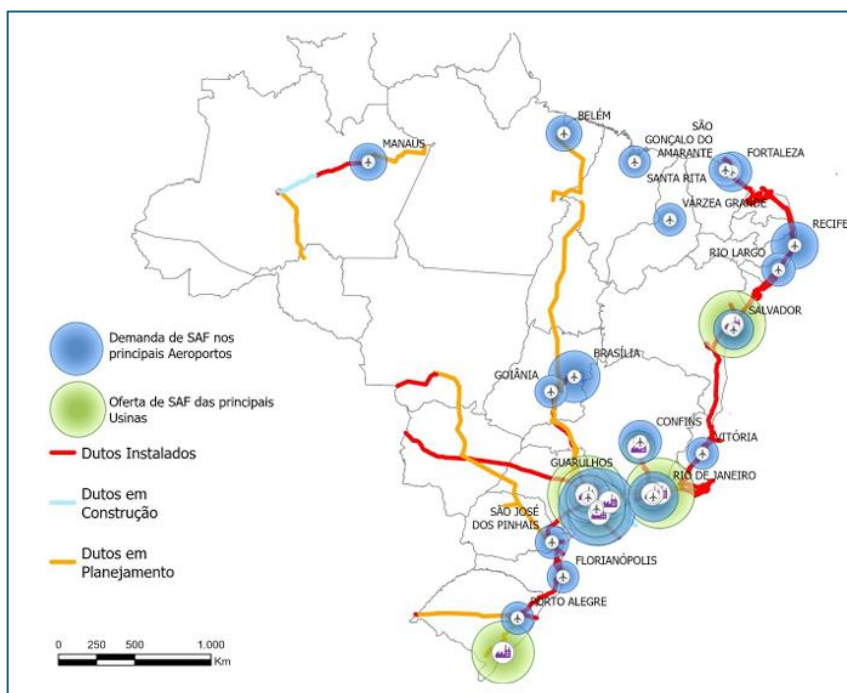
Diante disso, o desenvolvimento do SAF está diretamente associado às iniciativas globais de mitigação das emissões no setor aéreo, com destaque para o Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), estabelecido pela International Civil Aviation Organization (ICAO), que busca limitar o crescimento das emissões líquidas de CO₂ por meio de mecanismos de compensação e do uso de combustíveis elegíveis, como o SAF, além de exigir rastreabilidade, certificação e cumprimento de metas no setor aéreo. No Brasil, iniciativas regulatórias vêm sendo implementadas para estimular essa transição. Dentre essas medidas, destaca-se o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), instituído pela Lei nº 14.993/2024 no âmbito da política do Combustível do Futuro, que estabelece metas obrigatórias e progressivas de redução das emissões nas operações aéreas domésticas. Dessa forma, a partir de 2027, os operadores deverão reduzir suas emissões em 1%, alcançando 10% até 2037, com base nas emissões associadas aos combustíveis fósseis. Adicionalmente, a política prioriza a mitigação ao longo do ciclo de vida dos combustíveis, sem

impor percentuais fixos de mistura, alinhando-se às diretrizes internacionais de descarbonização do setor aéreo (RBQAV, 2025).

A implementação dessas metas está diretamente relacionada à capacidade de produção e distribuição do SAF no território nacional. O país apresenta elevada disponibilidade de matérias-primas renováveis proveniente do setor sucroenergético e de outras cadeias de biocombustíveis, o que favorece o desenvolvimento de rotas tecnológicas baseadas em etanol, óleos vegetais e resíduos lignocelulósicos, o que favorece o avanço de diferentes rotas tecnológicas para a produção desse combustível. Entretanto, a oferta de SAF tende a apresentar forte concentração geográfica, com maior capacidade produtiva instalada nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, destacando-se o Sudeste como principal polo produtor. Em contraste, a demanda encontra-se distribuída por todo o território nacional, com maior intensidade nos aeroportos localizados em grandes centros urbanos (EPE, 2025).

Nesse sentido, a Figura 15 evidencia essa relação ao apresentar a distribuição espacial dos principais polos de consumo nos aeroportos brasileiros em comparação com as regiões produtoras, bem como a malha de dutos existente, em expansão e planejada, destacando os desafios logísticos associados à integração entre oferta e demanda de SAF no país.

Figura 15 - Oferta x Demanda de SAF no Brasil



Fonte: EPE (2025)

A disponibilidade de matérias-primas agrícolas é um fator estratégico para a produção de combustíveis sustentáveis. Nesse contexto, o Brasil se destaca pela ampla base agrícola, favorecida por condições climáticas adequadas, disponibilidade de terras e investimentos em pesquisa e desenvolvimento, além de um setor produtivo consolidado. Essa combinação posiciona o país de forma favorável para o suprimento de insumos, desde que associada a políticas que garantam o cumprimento de critérios de sustentabilidade e responsabilidade na produção (FAPESP, 2013).

4.4.3. Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na produção de combustíveis sustentáveis de aviação são variadas e exercem papel determinante na viabilidade técnica, econômica e ambiental do processo. Podem ser classificadas conforme sua origem e composição, sendo agrupadas, de modo geral, em três principais categorias: triglicerídeos, biomassa lignocelulósica e fontes ricas em açúcares e amidos, cada uma com características próprias de disponibilidade e aplicação industrial.

A Figura 16 apresenta a relação entre as principais matérias-primas utilizadas e as rotas tecnológicas aprovadas para a produção de querosene de aviação sustentável, conforme estabelecido pela norma ASTM D7566 e pela regulamentação nacional.

Figura 16 - Matérias-primas e respectivas rotas tecnológicas

Principais matérias-primas	Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM D7566 e ANP Res. 856/2021		Mistura máxima ¹
Triglicerídeos Oleaginosas, algas, óleos e gorduras residuais	HEFA	Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados	50%
	HC-HEFA	Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados	10%
	CHJ	Querosene de hidrotermólise catalítica	50%
Biomassa lignocelulósica Eucalipto, pinheiro, capim elefante, bagaço de cana	SPK-FT	Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch	50%
	SPK-A	Querosene parafínico sintetizado com aromáticos	50%
	SIP	Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados	10%
Açúcares e amidos Cana-de-açúcar, milho, beterraba, mandioca	ATJ	Querosene parafínico sintetizado por álcool	50%

Fonte: EPE (2024)

Observa-se que cada grupo de matéria-prima está associado a rotas tecnológicas específicas que já foram aprovadas para a produção de querosene de aviação sustentável, conforme estabelecido por normas técnicas internacionais. Entre essas rotas destacam-se processos como HEFA, SPK/FT e ATJ. Cada uma dessas rotas envolve diferentes processos de conversão química ou bioquímica capazes de transformar matérias-primas renováveis em hidrocarbonetos com propriedades compatíveis com o querosene de aviação convencional, respeitando também limites específicos de mistura com o combustível fóssil estabelecidos pelas normas de certificação

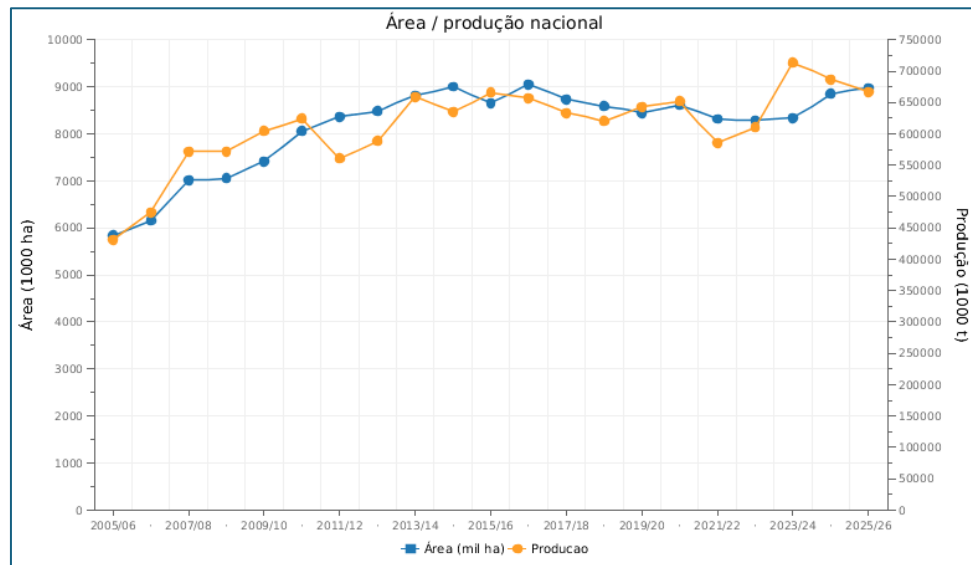
Nesse contexto, a cana-de-açúcar assume posição estratégica, principalmente em países como o Brasil, devido à sua elevada produtividade e consolidação da cadeia produtiva do etanol. Podendo ser utilizada tanto como fonte açucarada para rotas fermentativas quanto como biomassa residual, por meio do aproveitamento do bagaço e da palha em processos termoquímicos. Essa versatilidade amplia seu potencial de inserção nas diferentes rotas tecnológicas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação.

4.5.Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (gênero *Saccharum* sp.) é uma gramínea perene amplamente cultivada para a extração de sacarose, utilizada principalmente na produção de açúcar e etanol. Essa cultura possui grande relevância econômica e energética, sendo uma das mais importantes do mundo e estando presente em mais de 100 países (ProQR, 2023). Destacando-se como uma das principais culturas agrícolas do Brasil, desempenhando papel fundamental no setor sucroenergético e na produção de biocombustíveis. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2024/25 a área cultivada foi de aproximadamente 8,85 milhões de hectares, com produção estimada em 687,06 milhões de toneladas e produtividade média de cerca de 77.600 kg por hectare. Esses números evidenciam a relevância da cultura para a economia nacional e para a cadeia produtiva de energia renovável.

No gráfico da Figura 17, pode-se observar a evolução da área cultivada e da produção estimada de cana-de-açúcar no Brasil ao longo dos últimos anos, permitindo visualizar as variações ocorridas entre as safras e o comportamento da produção no período analisado

Figura 17 - Gráfico de Área x Produção ao longo dos anos

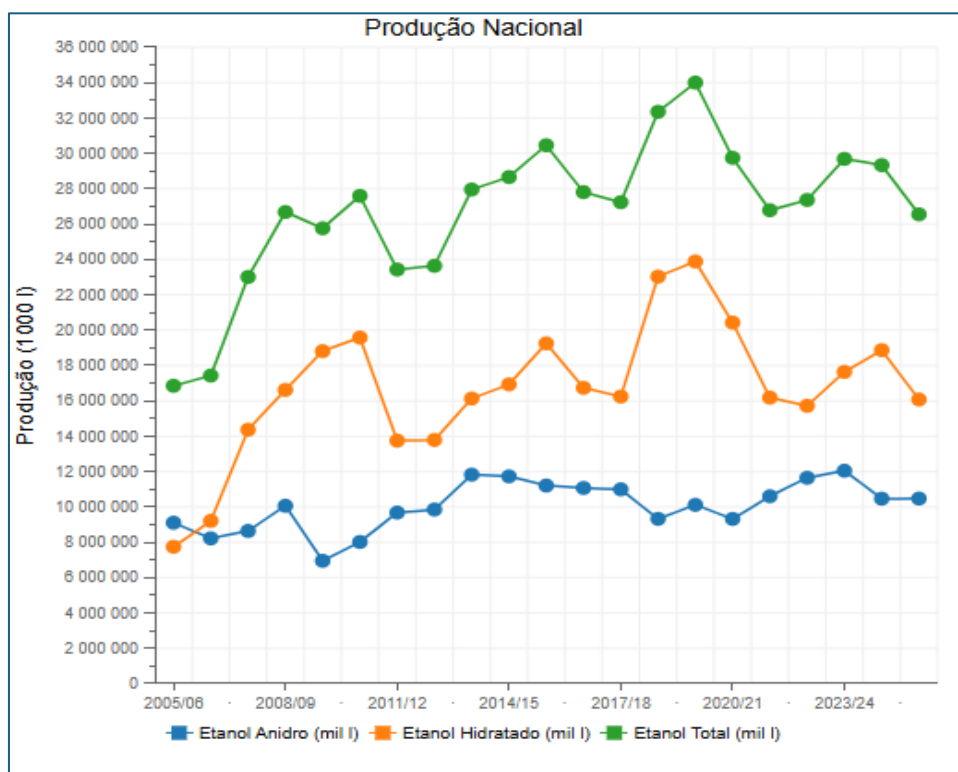


Fonte: CONAB (2025)

Além da produção de açúcar, a cana-de-açúcar é amplamente utilizada na fabricação de etanol, um dos principais biocombustíveis utilizados no país. Esse recurso renovável permite a obtenção de etanol anidro, utilizado como aditivo na gasolina, e etanol hidratado, empregado diretamente como combustível. Na safra 2024/25, a produção total de etanol proveniente da cana foi estimada em mais de 29 bilhões de litros, considerando ambas as formas, o que evidencia a importância dessa cultura como fonte de energia renovável e como alternativa aos combustíveis fósseis (CONAB, 2025).

No gráfico da Figura 18, pode-se observar a evolução da produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar ao longo dos últimos anos, permitindo analisar as variações entre as safras e o comportamento da produção no período.

Figura 18 - Produção de Etanol ao longo dos anos



Fonte: CONAB (2025)

Além disso, o processamento da cana gera grandes quantidades de bagaço, que pode ser aproveitado para a cogeração de energia elétrica nas usinas sucroalcooleiras, prática cada vez mais comum no setor. Estima-se que, para cada tonelada de cana processada, sejam gerados aproximadamente 250 kg de bagaço, resíduo que pode ser utilizado para produção de energia e outros produtos de valor agregado (EMBRAPA, s.d).

O caldo de cana é utilizado principalmente na produção de etanol de primeira geração e açúcar. Já o bagaço, rico em material lignocelulósico, é geralmente destinado à queima em caldeiras para geração de calor e energia nas usinas, estando sua disponibilidade relacionada à eficiência do processo industrial. Após a utilização de parte desses resíduos para suprimento energético e a permanência de uma fração da palha no campo para fins agrônômicos, o excedente de bagaço e palha pode ser aproveitado para a produção de combustíveis. Estimativas indicam que esses resíduos poderiam suprir cerca de 90% da demanda de combustível Jet A produzido pela rota Alcohol-to-Jet (ATJ) e aproximadamente 30% pela rota Fischer-Tropsch (FT), evidenciando o potencial da biomassa da cana-de-açúcar para o desenvolvimento do mercado de combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil (RSB, 2021).

4.6. Rotas Tecnológicas de Querosene de Aviação a partir da Cana-de-Açúcar

4.6.1. SPK-FT e SPK/A

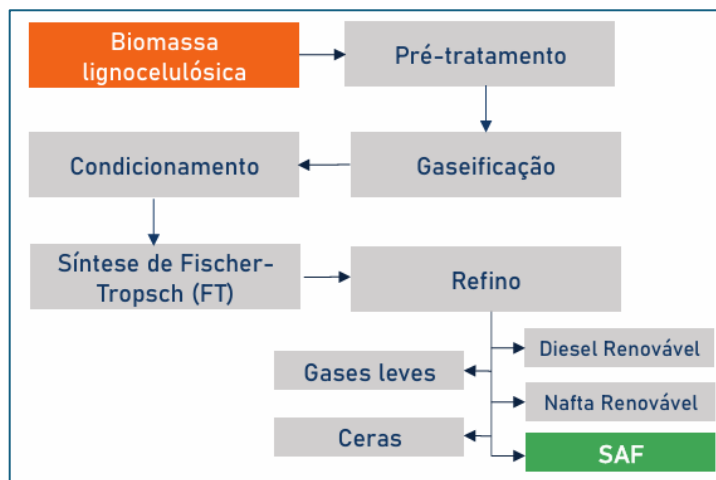
O *Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene* (FT-SPK) é um querosene paraafínico sintético produzido a partir de uma matéria-prima proveniente da gaseificação, seguido de um processo de síntese por *Fischer-Tropsch* (KINDER; RAHMES, 2009 *apud* VELAZQUEZ, 2012).

Enquanto o *Synthesized Paraffinic Kerosene/Aromatics* (SPK/A), ou querosene paraafínico sintetizado com aromáticos, é definido como um combustível obtido a partir de uma variação do processo *Fischer-Tropsch* que inclui a adição de compostos aromáticos. De modo geral, o processo de produção é semelhante ao do SPK convencional, diferindo principalmente pela presença de aromáticos no SPK/A, que são incorporados por meio da alquilação de aromáticos leves não derivados do petróleo com olefinas provenientes do processo *Fischer-Tropsch* (ZSCHOCKE; SCHEUERMANN; ORTNER, 2015 *apud* SILVA, 2023).

Nesse processo, a matéria-prima é inicialmente submetida à gaseificação, gerando um gás de síntese (syngas) composto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂). Em seguida, esse gás é convertido em hidrocarbonetos líquidos por meio da síntese *Fischer-Tropsch*, os quais podem ser posteriormente fracionados para obtenção da fração correspondente ao bioquerosene de aviação.

A gaseificação da biomassa ocorre em etapas sequenciais que incluem secagem, devolatilização, combustão e redução, resultando na formação do gás de síntese. A composição desse gás depende das condições do processo e das reações predominantes no reator, sendo a relação H₂/CO um parâmetro importante para a eficiência da síntese *Fischer-Tropsch*. Além disso, a qualidade do syngas é um fator crítico para a produção de combustíveis líquidos, exigindo etapas de purificação e condicionamento para remover impurezas e garantir o desempenho do processo (IEA, 2022). A Figura 19 apresenta um esquema simplificado desse tipo de método.

Figura 19 - Esquema de produção de SAF via SPK/FT e SPK/A



Fonte: EPE (2024)

As rotas baseadas na gaseificação de biomassa para a produção de combustíveis do tipo Fischer-Tropsch (FT) apresentam vantagens relevantes, como a obtenção de produtos isentos de enxofre, contribuindo para a redução dos impactos ambientais. Além disso, seus componentes já são amplamente utilizados em aplicações industriais, como geração de energia e processos carvão-para-líquidos. Entretanto, a aplicação integrada dessas rotas para a produção de combustível de aviação ainda não foi consolidada em larga escala, enfrentando desafios relacionados à viabilidade econômica em menores escalas, especialmente no uso de biomassa e resíduos. Soma-se a isso a necessidade de desenvolvimento de processos e catalisadores mais adequados, bem como limitações associadas à seletividade catalítica, à heterogeneidade das matérias-primas e à eficiência global do sistema (BAUEN, 2020; EPE, 2024).

4.6.2. ATJ-SPK

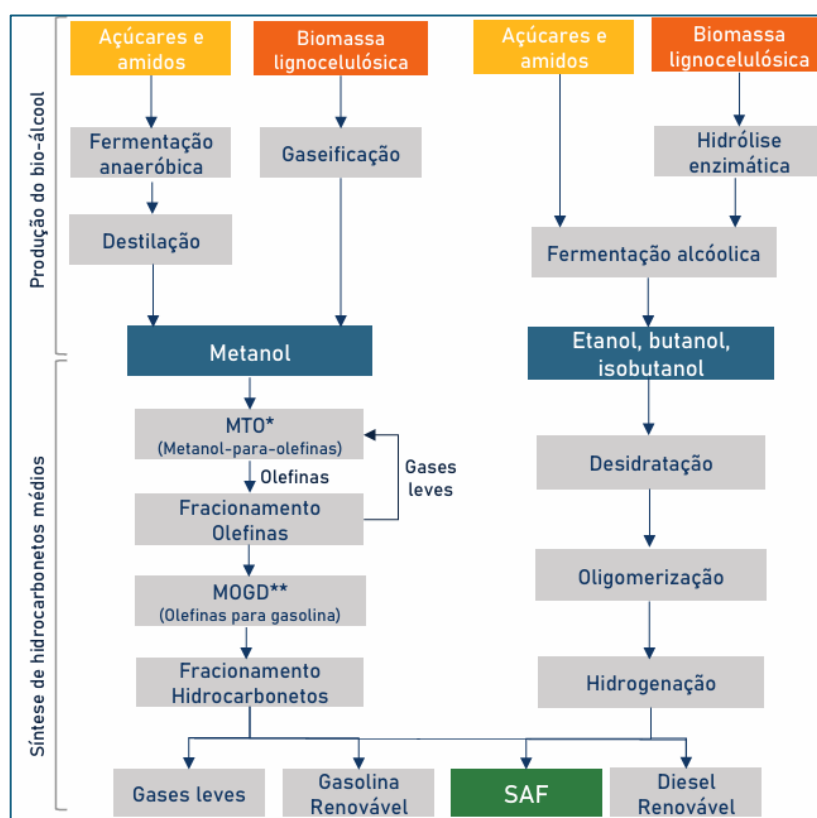
A rota *Alcohol-to-Jet* (ATJ) consiste na conversão de bioálcoois em hidrocarbonetos de cadeia longa compatíveis com combustíveis de aviação, como o combustível sustentável de aviação (SAF). Nesse processo, os álcoois de cadeia curta, como etanol e metanol, podem ser obtidos principalmente por duas vias: pela fermentação de açúcares e amidos presentes em matérias-primas sacaríneas ou amiláceas, por ação de microrganismos, ou pela gaseificação de biomassa lignocelulósica, que gera intermediários posteriormente convertidos em bioálcoois utilizados na produção do combustível (CNT, 2025).

Entre os álcoois que podem ser utilizados nesse processo estão metanol, etanol, isobutanol, butanol e álcoois graxos de cadeia longa, além de misturas contendo acetona,

butanol e etanol. Nesse processo, os intermediários podem passar por etapas catalíticas, como a conversão de metanol em olefinas e, posteriormente, em hidrocarbonetos líquidos. No entanto, apesar da possibilidade de uso de diferentes álcoois, apenas o etanol e o isobutanol já foram aprovados pela ASTM para a produção de combustíveis do tipo *drop-in*. Os produtos obtidos podem apresentar propriedades adequadas para aplicação como gasolina, combustível de aviação, diesel, nafta, lubrificantes e óleo combustível pesado, dependendo das matérias-primas utilizadas e das etapas de processamento adotadas (PROQR, 2023; EPE, 2025).

A Figura 20 apresenta de forma esquemática esses dois caminhos principais de obtenção do bioálcool e as etapas de conversão envolvidas na rota ATJ.

Figura 20 - Esquema de produção de SAF via ATJ-SPK



Fonte: EPE (2024)

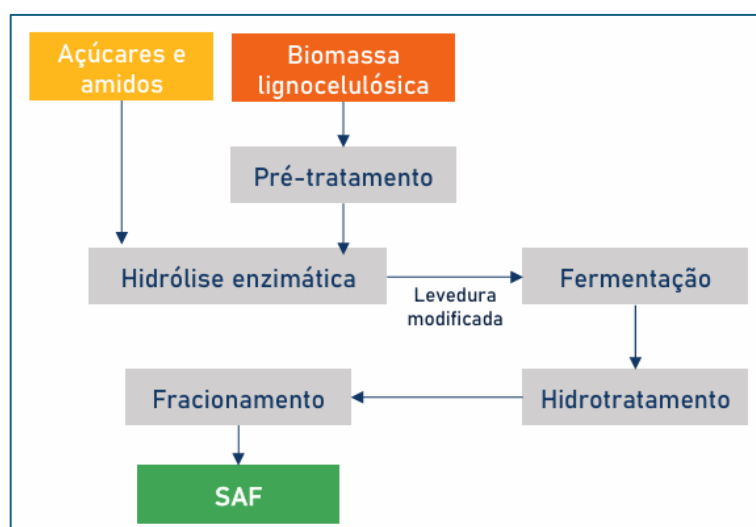
Essa rota apresenta vantagens relevantes por permitir a conversão de diferentes tipos de álcoois, como etanol, metanol e isobutanol, provenientes de diversas fontes, em combustíveis de aviação, além de oferecer flexibilidade logística, já que a produção de álcool e a etapa de conversão não precisam ocorrer no mesmo local. No entanto, conforme destacado por Bauen

(2020), essa rota apresenta limitações relacionadas à seletividade do processo e ao custo de oportunidade do uso direto dos álcoois em outros setores de transporte. Além disso, o combustível produzido pode apresentar custos entre 20% e 40% superior ao do etanol em termos energéticos, refletindo perdas de eficiência e maiores investimentos no processo.

4.6.3. SIP

Na rota SIP (*Synthesized Iso-Paraffins*), diferentemente da rota ATJ, os carboidratos são convertidos diretamente em hidrocarbonetos, sem a necessidade da formação prévia de álcoois como intermediários. As fontes de carboidratos podem incluir sacarose ou hidrolisados obtidos de diferentes tipos de biomassa, como matérias-primas amiláceas e lignocelulósicas. A etapa de fermentação, responsável pela conversão desses açúcares, pode ser conduzida em regime contínuo ou em batelada, de maneira semelhante a outros bioprocessos industriais. Esse processo utiliza microrganismos capazes de produzir diretamente compostos hidrocarbonetos, que posteriormente são processados para a obtenção de combustíveis renováveis de aviação (WANG et al., *apud* PROQR, 2023). A Figura 21 apresenta um fluxograma simplificado desse tipo de rota bioquímica.

Figura 21 - Esquema simplificado da Rota SIP



Fonte: EPE (2024)

Nesse processo, os açúcares provenientes da biomassa são inicialmente fermentados para a produção de farneseno ($C_{15}H_{24}$). Esse composto é posteriormente hidrogenado, formando farnesano, que ainda passa por etapas de hidrocraqueamento e isomerização até atingir as características necessárias para uso como combustível de aviação. Durante o processo, frações como a lignina, que não são adequadas para a formação de farneseno, podem ser separadas e utilizadas como fonte de energia para atender às necessidades operacionais da planta. Conforme estabelecido pela norma ASTM D7566, o combustível obtido por essa rota pode ser misturado ao querosene de aviação de origem fóssil em proporções de até 10% (ICAO, 2024).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2024), a rota sugar-to-Isoparaffins (SIP) apresenta como vantagem a ausência de catalisadores químicos e de condições severas de temperatura e pressão, o que contribui para a simplificação do processo. Por outro lado, destaca-se a elevada viscosidade cinemática do combustível em comparação a outras rotas, além disso, sua maior adequação à produção de compostos de alto valor agregado pode limitar sua aplicação na produção de SAF em larga escala.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As rotas tecnológicas para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) representam uma alternativa relevante para a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor aéreo, um segmento de grande importância econômica e estratégica, especialmente em países de grande extensão territorial como o Brasil. A produção desse tipo de combustível ainda enfrenta desafios, principalmente do ponto de vista econômico, uma vez que, atualmente, o SAF tende a apresentar custos mais elevados quando comparado ao querosene de aviação convencional. Entretanto, a ampliação da escala produtiva, o avanço tecnológico e a consolidação de políticas voltadas à descarbonização podem tornar esse cenário mais favorável, contribuindo para a maior competitividade do SAF ao longo do tempo.

Além disso, a diversidade de rotas tecnológicas amplia as possibilidades de produção e permite o aproveitamento de diferentes matérias-primas. Processos como Alcohol-to-Jet (ATJ), Synthesized Iso-Paraffins (SIP) e Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) demonstram a viabilidade da conversão de biomassa em hidrocarbonetos compatíveis com o querosene de aviação. No entanto, essas rotas apresentam diferenças quanto à eficiência: a ATJ se destaca pela flexibilidade de matérias-primas, mas apresenta perdas energéticas e maiores

custos associados à conversão de álcoois; a SIP possui um processo menos complexo, porém apresenta limitações relacionadas à maior viscosidade do combustível e à sua melhor adequação à produção de compostos de maior valor agregado; e a FT-SPK, embora produza combustíveis de alta qualidade e baixo teor de enxofre, enfrenta desafios quanto à eficiência global e à viabilidade em larga escala, especialmente na integração de processos baseados em biomassa. Entre as matérias-primas com maior potencial, destaca-se a cana-de-açúcar, que reúne características favoráveis no Brasil, como elevada produtividade, ampla disponibilidade e uma cadeia produtiva consolidada, facilitando sua integração às rotas de produção de SAF.

Por fim, destaca-se a atuação do engenheiro químico, cuja formação permite contribuir diretamente para o desenvolvimento, dimensionamento e otimização dessas rotas, além da avaliação técnica e econômica dos processos industriais. Essa atuação é fundamental para aprimorar a eficiência dos processos, conciliando desempenho energético, sustentabilidade e viabilidade econômica, aspectos essenciais para a consolidação dos combustíveis sustentáveis de aviação no longo prazo.

6. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Asas do conhecimento**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/biblioteca/asas-do-conhecimento>. Acesso em: 12 dez. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Conexão SAF**. Disponível em: <https://hotsites.anac.gov.br/conexaosaf/>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **CORSIA**. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **História da aviação**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/profissionais-da-aviacao-civil/pilotos/introducao-a-aviacao-civil/historia-da-aviacao>. Acesso em: 18 dez. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil**. Brasília: ANAC, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Painel de indicadores do transporte aéreo – 2024**. Brasília: ANAC, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo-2024>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Combustíveis de aviação**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução nº 856, de 22 de outubro de 2021**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 out. 2021. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021>. Acesso em: 14 dez. 2025.
- AIR TRANSPORT ACTION GROUP (ATAG). *What makes an aviation fuel sustainable?* Disponível em: <https://aviationbenefits.org/other-environmental-challenges/climate-action/sustainable-aviation-fuel/what-makes-an-aviation-fuel-sustainable/>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- BAUEN, Ausilio; BITOSS, Niccolò; GERMAN, Lizzie; HARRIS, Anisha; LEOW, Khangzhen. **Sustainable aviation fuels: status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation**. *Johnson Matthey Technology Review*, v. 64, n. 3, p. 263–278, 2020. Disponível em: <https://technology.matthey.com/content/journals/10.1595/205651320X15816756012040>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 out. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm. Acesso em: 18 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Entenda o efeito estufa**. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao_Nacional/eee.html. Acesso em: 25 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação**. 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 dez. 2025.

BRASIL. Ministério de Portos e Aeroportos. **Aviação: Governo Federal atualiza plano para redução da emissão de CO₂**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2025/04/aviacao-governo-federal-atualiza-plano-para-reducao-da-emissao-de-co2>. Acesso em: 20 dez. 2025.

CAMPOS, Carlos Eduardo Espinel; NORMANDO, Ana Luísa; CASTRO, Matheus; SCHWANTES, Fernanda; REZENDE, Fernanda. **Determinantes do preço do querosene de aviação no Brasil**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 2025. Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2025/submissao/files_I/i9-717caaa6bd8d50ec595eb25c24a7a44b.pdf. Acesso em: 20 dez. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safrá – série histórica: cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-cana-de-acucar.html>. Acesso em: 20 dez. 2025.

CARVALHO, Ivan. **A idade de ouro da aviação: como a aviação mudou o mundo no século XX**. Portal Voe Safe, 12 fev. 2024. Disponível em: <https://portal.voesome.com.br/a-idade-de-ouro-da-aviacao-como-a-aviacao-mudou-o-mundo-no-seculo-xx/>. Acesso em: 22 dez. 2025.

COSTA, Ricardo Cunha da et al. **Combustível sustentável de aviação**. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. 97–142, set. 2024. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/26108/3/PRArt%20216309_Combust%
%advel%20sustent%
%c3%a1vel%20de%20avia%
%c3%a7%c3%a3o_SAF.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/26108/3/PRArt%20216309_Combust%c3%advel%20sustent%c3%a1vel%20de%20avia%c3%a7%c3%a3o_SAF.pdf). Acesso em: 11 dez. 2025.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **Santos Dumont: o legado de nosso herói pioneiro**. 2024. Disponível em: https://www.decea.mil.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=santos-dumont-o-legado-de-nosso-heroi-pioneiro. Acesso em: 19 dez. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil e sinergia com o diesel verde**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-e-sinergia-com-o-diesel-verde>. Acesso em: 21 dez. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil – Perspectivas Futuras**. Rio de Janeiro: EPE, 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: 21 dez. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Processos de biorrefinaria para a produção de SAF e biobunker**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/processos-de-biorrefinaria-para-a-producao-de-saf-e-biobunker>. Acesso em: 28 nov. 2025.

FAY, Claudia Musa; OLIVEIRA, Geneci Guimarães. **Aviação, tecnologia e sociedade: os primeiros voos no Brasil**. In: CONGRESSO SCIENTIARUM HISTÓRIA IV, 2011, Brasil. Anais [...]. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/23560/2/Aviao_Tecnologia_e_sociedade_Os_primeiros_vos_no_Brasil.pdf. Acesso em: 17 jan. 2026.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: plano de ação**. São Paulo: FAPESP, 2013. Disponível em: <https://fapesp.br/publicacoes/plano-de-voo-biocombustiveis-brasil-pt.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

FURTADO, Maria Inês Vasconcellos; FURTADO, Rafaela Campos. **Estudo avaliativo da emissão de CO₂ a partir de combustíveis fósseis utilizando redes neurais**. *Conhecimento & Diversidade*, Niterói, v. 11, n. 25, p. 47–62, 2020. Disponível em: https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/conhecimento_diversidade/article/view/5804. Acesso em: 22 dez. 2025.

IHA, Bruno K. V.; SANTOS, Leila Ribeiro dos; SANTOS, Lenilson Afonso dos; SBAMPATO, Maria Esther; ROCCO, José A. F. F. **Equações lineares e não lineares para prever o comportamento de propriedades físico-químicas de combustível de aviação misturado com bioquerosene drop-in alternativo**. *Química Nova*, v. 42, n. 1, p. 1–9, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170302>. Acesso em: 20 dez. 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Sustainable aviation fuel (SAF): technical certifications**. Montreal: IATA, 2021. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **CORSIA supporting document: CORSIA-eligible fuels – life cycle assessment methodology (Version 6)**. Montreal: ICAO, 2024. Disponível em: https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/SCS-Evaluation/CORSIA_Supporting_Document_CORSIA-Eligible-Fuels_LCA_Methodology_V6.pdf. Acesso em: 22 dez. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **GUIA: COMO ELABORAR UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**. São José dos Campos: INPE, 2016. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/08.25.14.13/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2025.

MUSEU DE ASTRONOMIA E CIÊNCIAS AFINS (MAST). **Santos Dumont: o brasileiro que abriu as asas perto do sol**. 2 jul. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mast/pt-br/assuntos/noticias/2024/julho/santos-dumont-o-brasileiro-que-abriu-as-asas-perto-do-sol>. Acesso em: 13 dez. 2025.

PETROBRAS. **Querosene de aviação: informações técnicas**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2024. Disponível em: <https://petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/Manual+de+QAV+2024.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2025.

PETROBRAS. **SAF: veja como investimos em tecnologia rumo ao futuro dos combustíveis sustentáveis.** Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/saf-veja-como-investimos-em-tecnologia-rumo-ao-futuro-dos-combustiveis-sustentaveis>. Acesso em: 17 nov. 2025.

PRAUCHNER, Marcos J et al. **Combustíveis derivados do petróleo: obtenção, propriedades e usos.** *Revista Virtual de Química*, v. 15, n. 1, p. 55–56, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20220073>. Acesso em: 16 dez. 2025.

PRAUCHNER, Marcos J et al. **Combustíveis hidrocarbônicos alternativos, com ênfase para os combustíveis sustentáveis para aviação.** *Revista Virtual de Química*, v. 15, n. 1, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20220109>. Acesso em: 16 dez. 2025.

PROQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos. **Análise econômica de diferentes rotas de produção de combustíveis sustentáveis de aviação.** Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf/view>. Acesso em: 10 jan. 2026.

RBQAV – Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis para Aviação. **Como o Brasil vai cumprir as metas da SAF a partir de 2027?** 21 jul. 2025. Disponível em: <https://rbqav.com.br/2025/07/21/como-o-brasil-vai-cumprir-as-metas-da-saf-a-partir-de-2027/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS (RSB); AGROICONE. **Disponibilidade de matéria-prima para combustível sustentável de aviação no Brasil: desafios e oportunidades.** Genebra: RSB, 2021. Disponível em: https://www.boeing.com.br/content/dam/boeing/po_br/sustentabilidade/combustiveis/RSB-jetfuel-saf-factsheets_portuguese.pdf. Acesso em: 28 dez. 2025.

SILVA, Andressa Christine Dutra da. **Uma revisão sobre a produção de bioquerosene de aviação a partir de bioetanol via rota ATJ.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

SOUZA, G. de J. et al. **Perspectivas da rota SPK-ATJ para produção de bioquerosene de aviação: uma análise do potencial brasileiro e maranhense.** *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 23, n. 2, 2025. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/9039>. Acesso em: 20 dez. 2025.

VAN DYK, Susan; SADDLER, Jack. **Progress in commercialization of biojet / sustainable aviation fuels (SAF): technologies and policies.** Paris: IEA Bioenergy, 2024. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2025.

YAMANISHI, Érika. **Simulação, análise e otimização das colunas atmosférica e debutanizadora da unidade de destilação de refino de petróleo.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007