

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES



**COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS NA REDUÇÃO DE EMISSÕES NA
AVIAÇÃO CIVIL**

Gustavo Santos Rodrigues

Goiânia

2025

COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS NA REDUÇÃO DE EMISSÕES NA AVIAÇÃO CIVIL

Gustavo Santos Rodrigues¹, Roberto Márcio dos Santos²

¹Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, gustavo.sr321@gmail.com

²Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, rob.marcio@hotmail.com

RESUMO: A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por alternativas aos combustíveis fósseis na aviação civil, setor responsável por significativa emissão de gases do efeito estufa. Este trabalho tem como objetivo analisar os principais combustíveis sustentáveis que podem compor o futuro da aviação, com foco no SAF (Combustível Sustentável de Aviação) e no hidrogênio. A metodologia adotada foi a pesquisa bibliográfica, utilizando fontes acadêmicas e institucionais ligadas à aviação. Os resultados apontam que o SAF, por ser compatível com a infraestrutura atual, representa uma solução viável no curto prazo, enquanto o hidrogênio, embora ainda em fase de desenvolvimento, apresenta grande potencial para descarbonizar o setor no longo prazo. Conclui-se que, apesar dos desafios econômicos e tecnológicos, os combustíveis sustentáveis são essenciais para a transição energética da aviação, contribuindo para a redução das emissões e para um futuro mais limpo.

Palavras-chave: *Aviação, Biocombustíveis, Sustentabilidade, SAF, Hidrogênio.*

ABSTRACT: The growing concern about climate change has driven the search for alternatives to fossil fuels in civil aviation, a sector responsible for significant greenhouse gas emissions. This study aims to analyze the main sustainable fuels that may shape the future of aviation, focusing on SAF (Sustainable Aviation Fuel) and hydrogen. The methodology used was bibliographic research, based on academic and institutional sources related to aviation. The results show that SAF, due to its compatibility with current infrastructure, is a viable short-term solution, while hydrogen, still under development, presents great potential for long-term decarbonization of the sector. It is concluded that, despite economic and technological challenges, sustainable fuels are essential for aviation's energy transition, contributing to emission reduction and a cleaner future.

Keywords: *Aviation, Biofuels, Sustainability, SAF, Hydrogen.*

1. Introdução

Com o decorrer dos anos é cada vez mais notável as variações climáticas ao redor do mundo, afetando a vida de todos os seres humanos. Essas mudanças são decorrentes principalmente da grande emissão de gases que provocam o efeito estufa, emitidos por vários setores da indústria, agropecuária e transporte.

Com o crescimento da aviação a cada ano e o grande uso de combustíveis originados do petróleo, é possível concluir que o setor aéreo é um dos grandes contribuintes quanto à emissão de gases do efeito estufa, como o CO₂ (dióxido de carbono). O desafio da diminuição desses

gases vem sendo discutido mundialmente pelas nações em conjunto e levantando hipóteses de que os combustíveis sustentáveis seriam capazes de zerar a emissão de gases poluentes na aviação e que sua produção poderia ocorrer através de diversos meios.

Portanto, esta pesquisa se justifica pois é preciso tomar medidas imediatas para contornar as mudanças climáticas através da diminuição da emissão de gases poluentes em todo o setor aeronáutico. Este trabalho tem como objetivo geral entender melhor os principais combustíveis sustentáveis que estarão presentes no futuro da aviação mundial e seu desenvolvimento, identificando as rotas para se produzir cada combustível, mostrando como cada um funciona e ainda analisando vantagens e desafios para sua implementação. Todas as informações partirão de uma pesquisa bibliográfica, através de sites de órgãos ligados a aviação mundial, repositórios acadêmicos e artigos científicos.

2. Panorama Geral dos Combustíveis Atualmente

No cenário atual da aviação utilizam-se 2 tipos de combustíveis, o querosene de aviação (QAV) e a gasolina de aviação (AVGAS). Para que o funcionamento dos diversos motores utilizado em aviões funcione da forma correta garantindo a segurança, qualidade e desempenho, esses combustíveis devem ser aditivados para evitar seu congelamento, devido as elevadas altitudes, assim como prevenir corrosões biológicas e químicas nos tanques das aeronaves. Dessa forma são utilizados alguns tipos de aditivos como os antioxidantes, que garantem maior estabilidade química durante o armazenamento e o próprio uso; antiestáticos, que reduzem a eletricidade estática, portanto deixando seu abastecimento e transferência mais seguros ao evitar faíscas que poderiam causar incêndios ou explosões; inibidores de corrosão, responsáveis por evitar as corrosões tanto nos tanques das aeronaves quanto suas tubulações e sistemas de combustíveis; biocidas, com a função de impedir o crescimento de fungos e bactérias, impedindo a formação de borras e entupimento de filtros; inibidores de formações de gelos, garantindo o fluxo contínuo do combustível mesmo em ambientes frios; e desativadores de metal, que conseguem prolongar a vida útil do combustível desativando traços de metal.

2.1. Querosene de Aviação

O principal combustível utilizado na aviação comercial é o querosene de aviação, operado majoritariamente em motores a reação, como os turbojatos e turbofans, que se utilizam de uma aceleração de gases na direção oposta ao movimento desejado para gerar propulsão. O QAV é um derivado do petróleo obtido através de um processo de refino chamado de fracionamento por destilação atmosférica, procedimento em que o petróleo é aquecido, sendo parcialmente vaporizado e se consegue extrair diversos componentes através de suas diferentes temperaturas de ebulição, como por exemplo óleos lubrificantes, diesel e o próprio querosene de aviação.

Há três diferentes tipos de querosene para motores a jato, que possuem diferentes temperaturas de ponto de congelamento e são produzidos e explorados de acordo com o ambiente ao qual serão implementados. O Quadro 1 demonstra esses diferentes tipos de querosene:

Quadro 1: Os diferentes tipos de querosene e suas características.

Nome	Ponto de Congelamento
JET A	-40°C
JET A-1	-47°C
JET B	-60°C

2.2. Gasolina de Aviação

Outro combustível utilizado na aviação, geralmente em aeronaves de pequeno porte e que usam motores a pistão, é a gasolina de aviação (AVGAS). A AVGAS, diferente da gasolina comum utilizada em carros, não possui etanol em sua composição, pelo fato de precisar de um número maior de octanas, que representa o poder antidetonante de um combustível, além disso a gasolina de aviação possui chumbo em sua composição. Assim como o querosene, a gasolina de aviação é dividida em alguns tipos, porém o que difere esses tipos é a octanagem de cada uma. A divisão dos diferentes tipos de AVGAS se dará por cores distintas, para ajudar na sua identificação conforme o Quadro 2:

Quadro 2: Os diferentes tipos de gasolina de aviação e suas características.

Cor	Octanagem
Vermelho	80 até 89
Azul	100
Verde	100 até 130
Roxa	115 até 145

3. Principais Tipos de Motores Utilizados na Aviação

3.1. Motor a Pistão

O motor a pistão é amplamente usado em aeronaves de menor porte e com forte presença na aviação geral que, de acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), são as operações de aviação civil que não se explora o transporte aéreo público de passageiros ou carga.

O princípio de funcionamento de um motor a pistão consiste na combustão de uma mistura de ar e combustível, que no contexto da aviação é usada a AVGAS, dentro de um cilindro fechado para que, ao ocorrer a ignição os gases se expandam gerando assim uma força mecânica transferida para a hélice do avião através de um eixo de manivelas.

3.2. Motor Turbojato

O motor turbojato é um tipo de motor a reação que foi projetado principalmente para voos em altitudes elevadas e no regime supersônico, ou seja, com velocidades maiores que a do som. Sua grande capacidade de aproveitar ao máximo o fluxo de ar que passa em altas velocidades faz com que ele opere de forma eficiente nesse regime de voo e gere um grande empuxo. O funcionamento básico de um motor turbojato envolve a compressão do ar admitido através de um compressor, aumentando a pressão e a temperatura do ar; a combustão, que ocorre em uma câmara onde o ar comprimido se mistura com o combustível e é inflamado; e a expulsão dos gases que, após a combustão estarão quentes, através de um bocal que irá gerar o impulso necessário para a propulsão da aeronave,

Porém, este tipo de motor apresenta limitações e desvantagens, principalmente em baixas altitudes e velocidades. Nesse regime de voo, a eficiência cai de forma significativa devido ao alto consumo de combustível em relação ao empuxo produzido, o tornando menos adequado para voos de cruzeiros em que a velocidade é subsônica, menor que a velocidade do som. Os motores turbojatos foram e continuam sendo bastante explorados em aeronaves militares de combate e bombardeiros supersônicos, mas em aeronaves civis e militares mais modernas acabaram sendo substituídos por motores que apresentavam mais eficiência. Mesmo com limitações consideráveis, motor turbojato fez parte de um importante avanço para a aviação, sendo crucial para o desenvolvimento de aeronaves que começaram a atingir velocidades e altitudes extremamente elevadas.

3.3. Motor Turbofan

O motor turbofan é uma evolução do motor turbojato, em que se adicionou um “Fan” (ventilador) na entrada do motor. Esse ventilador é capaz de resolver algumas limitações que o antigo turbojato tinha, aumentando significativamente a eficiência e a versatilidade do motor em diferentes regimes de voo. O fan trabalha direcionando parte do fluxo de ar para fora do núcleo do motor, esse processo é chamado de “bypass” (desvio de fluxo), esse desvio faz com que menos ar passe pelo núcleo do motor, onde ocorrerá a queima da mistura ar combustível, acarretando num consumo menor de combustível durante seu funcionamento. Além de um

consumo menor, esse ar que passa por fora do núcleo do motor também é capaz de gerar empuxo ao sair do motor pelo escape.

A implementação do fan também torna o motor mais silencioso quando comparado com um motor turbojato. Isso ocorre porque o fluxo de ar que passa fora do núcleo do motor diminui a velocidade do jato de saída, reduzindo o ruído gerado pela interação do jato com o ar ambiente. Essa característica é importante para aeronaves comerciais que operam em aeroportos localizados em áreas urbanas com restrições de ruídos.

Sua eficiência em uma ampla gama de velocidades e altitudes se deve à combinação da alta razão de bypass, que é a proporção entre o ar que passa pelo fan e o ar que entra no núcleo do motor, com a compressão e combustão do ar no núcleo do motor. Diante dessas melhorias, o turbofan se tornou o motor padrão em aviões comerciais de médio e longo alcance, sendo altamente eficiente para velocidades acima de 600 km/h.

Apesar de sua economia e eficiência o turbofan apresenta desvantagens por não ser ideal para voos de regime supersônico, onde o turbojato ainda apresenta vantagens específicas. No entanto, sua versatilidade, economia e desempenho em velocidades típicas da aviação comercial e militar fazem do turbofan a tecnologia mais amplamente utilizada na aviação moderna.

3.4. Motor Turboélice

O motor turboélice combina a leveza de um motor a jato utilizando a eficiência da hélice, sendo consideravelmente mais leve e eficiente do que os motores convencionais a pistão, principalmente em aeronaves que necessitam de potências acima dos 400 HP. Se tornando ideal para os aviões que operam em velocidades próximas dos 600 km/h, geralmente em voos regionais ou até em aeronaves de transporte tático militar. Diante dessa faixa de velocidade, a hélice funciona de maneira eficaz proporcionando um ótimo desempenho considerando o consumo de combustível e potencial de decolagem e pouso em pistas curtas.

Embora o custo inicial de um motor turboélice seja mais elevado quando comparado com motores a pistão, sua eficiência no consumo de combustível e a maior durabilidade compensam esse custo, tornando uma escolha eficiente ao longo prazo, principalmente em operações regionais e voos de médio alcance.

Diante dos benefícios apresentados, o motor turboélice, assim como os demais motores mencionados, também possui desvantagens. Quando acima de 600 km/h, a eficiência das hélices começa a decair por conta das ondas de choque supersônicas que iniciam nas pontas das pás que giram mais rápidas do que no centro da hélice, aumentando o arrasto e reduzindo o empuxo gerado. Por esse motivo os motores turboélice são mais utilizados em voos de baixa e média velocidade, enquanto voos com aeronaves mais rápidas geralmente utilizam motores turbofans ou turbojatos.

4. Programa de Redução de Emissões

Por contribuir com grande parte das emissões de gases causadores do efeito estufa e que acarretam também nas mudanças climáticas, os diversos órgãos ligados à aviação ligaram o

alerta para contornar essas emissões e tornar a aviação um setor mais limpo. A principal forma encontrada para mitigar e até mesmo zerar as emissões da aviação foi realizar uma transição energética e colocar um fim nos combustíveis fósseis atualmente utilizados nas aeronaves.

Em 4 de outubro de 2021 a Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA) iniciou o programa Fly Net Zero, que é um acordo entre todos os membros da associação que se comprometeram a atingir zero emissões de carbono líquido na aviação comercial regular até o ano de 2050. De acordo com a IATA o projeto requer esforços conjuntos de toda a indústria aeronáutica, contando com as companhias aéreas, aeroportos, provedores da navegação aérea, fabricantes e principalmente do suporte governamental. O projeto visa atingir a emissão zero em 2050 utilizando uma combinação de esforços e pesquisas divididas em 4 aspectos.

O primeiro aspecto é o uso do combustível sustentável de aviação, um tipo de biocombustível que já está em produção e que parece mais viável no curto prazo. O segundo aspecto é a pesquisa por novas tecnologias, o uso da eletricidade e do hidrogênio como uma opção de médio a longo prazo. Outro aspecto levantado é a eficiência da infraestrutura e das operações, como rotas mais diretas para manter o avião o menor tempo possível consumindo combustível. Por fim, a compensação e captura de carbono também fazem parte da evolução para uma aviação mais verde.

O Brasil também possui um projeto para desenvolver soluções e diminuir a poluição no setor aéreo, em outubro de 2024 foi sancionada a Lei do Combustível do Futuro, em que foi instituído o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV). O programa tem como objetivo incentivar a pesquisa, produção, a comercialização e o uso energético, na matriz energética brasileira, do combustível sustentável de aviação (SAF).

A lei brasileira também institui que os operadores aéreos serão obrigados a reduzir as emissões de gases do efeito estufa em suas operações domésticas por meio do uso do SAF a partir de 2027 em que deverão usar pelo menos 1% do combustível sustentável durante o ano. Esse valor será aumentado de forma gradativa em 1% ao ano, até chegar em 2037 com as empresas utilizando pelo menos 10% do SAF em suas atividades.

Outro programa criado para contribuir com a redução de emissões de gases do efeito estufa foi o Airbus Hydrogen Hubs at Airports, feito pela fabricante Airbus que serve para promover a expansão global de hidrogênio para garantir que se possa suportar voos movidos à hidrogênio. Essa iniciativa reúne diversas companhias aéreas, aeroportos, participantes do setor, fornecedores de energia e especialistas em tecnologia para abordar as principais questões relacionadas à produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio que no futuro irá compor grande parte do combustível utilizado na aviação. De acordo com a Airbus o programa conta com mais de 220 aeroportos como parceiros, demonstrando a força e empenho em transformar a aviação mundial.

5. Tipos de Biocombustíveis na Aviação

Os biocombustíveis são derivados de biomassa renovável, que é todo material orgânico de origem animal ou vegetal que pode ser usado como uma fonte de energia e que é capaz de se regenerar em um curto período, podendo ser reabastecida naturalmente ou por meio de

práticas sustentáveis, diferentemente dos combustíveis fósseis. Os biocombustíveis são capazes de substituir, de forma parcial ou total, os combustíveis derivados do petróleo e gases naturais. A pesquisa e o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis na aviação é uma parte fundamental para a descarbonização do setor aéreo. Atualmente, existem dois tipos de biocombustíveis que se destacam na aviação, um que já está em produção e utilização, representando um grande potencial no curto e médio prazo, enquanto o outro está em fase de pesquisas e avanço de tecnologias para sua implementação e produção em larga escala, mas que pode significar o futuro da aviação. Estes biocombustíveis são, respectivamente, o Combustível Sustentável de Aviação e o Hidrogênio.

6. Combustível Sustentável de Aviação (SAF)

O combustível sustentável de aviação, de sigla SAF (Sustainable Aviation Fuel), é uma alternativa tecnologicamente mais avançada para a substituição do querosene de aviação convencional. O SAF diferente do QAV, que é produzido a partir do petróleo, é feito de matérias-primas renováveis, como por exemplo resíduos agrícolas, algas, óleos vegetais, gorduras animais e até resíduos sólidos urbanos. Sendo assim, indo contra os combustíveis fósseis, o combustível sustentável de aviação é desenvolvido para ter uma pegada de carbono, que é a quantidade total de gases do efeito estufa emitida de forma direta ou indireta, muito menor ao longo do seu ciclo de vida, o que contribui para a diminuição das emissões desses gases na aviação.

6.1. Produção e Funcionamento

Por se tratar de um biocombustível, sua produção pode ser realizada de diversos processos, existem 11 rotas certificadas pelo sistema da Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA) chamado de ISCC (Certificação Internacional de Sustentabilidade e Carbono), criado para avaliar e certificar a produção do SAF, porém, existem três tipos que são mais utilizados ao redor do mundo. O método mais utilizado é o chamado processo HEFA-SPK (Hydroprocessed Ester and Fatty Acids), de forma sintetizada, esse processo utiliza óleos vegetais e gorduras animais hidrogenados para produzir hidrocarbonetos, compostos químicos formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrogênio, semelhantes aos que estão presentes no querosene de aviação. Esse processo é considerado uma das formas mais consolidadas entre os processos de obtenção do SAF, por ser mais viável comercialmente e por possuir um potencial de redução de emissões de até 80% no ciclo de vida do combustível quando comparado com o QAV de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, ANP e a Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária, EMBRAPA.

Outra forma de se alcançar o SAF é por meio do processo FT-SPK (Fischer-Tropsch), no qual é possível converter biomassa (matéria orgânica como plantas, árvores, restos agrícolas e até resíduos animais) ou resíduos sólidos (lixo doméstico, industrial, hospitalar, entre outros) em gás síntese, que é uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), que depois se liquefazem em combustíveis líquidos. Uma grande vantagem desse processo é a quase infundável matéria-prima utilizada.

Mais uma rota para se obter o combustível sustentável de aviação é chamado de ATJ-SPK (Alcohol to Jet), é uma opção estratégica que converte álcoois, principalmente o etanol,

em querosene parafínico sintético, o SPK citado nas siglas anteriores. Durante esse processo, ocorre a desidratação do etanol, produzindo o etileno, que posteriormente será transformado em cadeias moleculares mais longas para alcançar o tamanho ideal como o do querosene de aviação pelo processo de oligomerização. Após alcançado essa cadeia mais longa, irá ocorrer um processo de hidrogenação, em que essas novas cadeias receberão hidrogênio para garantir a estabilidade e a qualidade exigida pelas normas da aviação. A grande vantagem deste modelo de produção é a capacidade de aproveitar a infraestrutura de produção de etanol presente em diversas partes do mundo, transformando um biocombustível terrestre, o etanol, em um combustível aéreo.

O modelo de funcionamento em motores do combustível sustentável de aviação é do tipo "drop-in", que significa que é possível misturá-lo diretamente com o combustível atualmente usado, o querosene de aviação convencional, sem a necessidade de transformação ou modificação tanto dos motores das aeronaves que recebem o SAF quanto da infraestrutura de abastecimento já existente. Por ser quimicamente semelhante ao querosene, o SAF funciona de maneira idêntica nos motores a jato, atendendo as rigorosas normas da aviação e oferecendo o mesmo desempenho em termos de potência e segurança.

6.2. *Uso Global e no Brasil*

De acordo com dados fornecidos pela IATA (Associação Internacional do Transporte Aéreo) em 2024, o volume de produção do SAF alcançou 1,3 bilhões de litros, dobrando os 600 milhões de litros produzidos em 2023, o que representou cerca de 0,3% do combustível produzido para aviões a jato naquele ano. A produção foi significativamente abaixo do que se esperava para a projeção para o ano de 2024 feita pela IATA que deveria ser de 1,9 bilhões de litros. Para 2025, é esperado que a produção do SAF chegue a 2,7 bilhões de litros ou 0,7% do combustível total feito para aeronaves a jato.

Para contornar a baixa produção e alcançar as metas estabelecidas no programa Fly Net Zero, a União Europeia e o Reino Unido implementaram em janeiro de 2025 os primeiros mandatos globais para o uso de SAF, estabelecendo a obrigatoriedade de que fornecedores de combustível misturem no mínimo 2% de SAF ao querosene de aviação. Com a previsão desse percentual aumentar de forma progressiva ao decorrer do tempo, chegando a 32% na União Europeia e 22% no Reino Unido até 2040. Já os Estados Unidos decidiram incentivar o uso do combustível sustentável de aviação através de subsídios diretos e créditos fiscais ao invés de mandatos de uso.

O Brasil possui um grande potencial para se tornar um líder na produção de SAF devido a experiências em biocombustíveis como o etanol e o biodiesel. Contando ainda com uma infraestrutura agrícola robusta, o que se encaixa bem para a produção em larga escala do combustível sustentável de aviação. Por parte das companhias aéreas brasileiras, a Gol, Latam e Azul têm realizado voos experimentais com o novo combustível. Em 2021 a Gol Linhas Aéreas realizou um voo com uma mistura de 10% de SAF, marcando um passo importante na adoção do biocombustível no Brasil. Em outro aspecto, o governo brasileiro tem mostrado interesse em apoiar a produção do SAF, com parcerias com a indústria e a academia para desenvolver tecnologias locais que possam ser escaladas para produção industrial.

O último grande salto em busca de um futuro mais limpo na aviação brasileira foi atingido recentemente. Em outubro de 2025, a Refinaria Duque de Caxias (REDUC), no Rio de Janeiro, se tornou a primeira refinaria no Brasil a ser certificada para produzir e comercializar o SAF, utilizando a rota HEFA de processamento. A previsão é de que nos próximos meses a refinaria inicie a produção para comercializar até 50 milhões de litros por mês do combustível. Outro marco alcançado é o início de testes para a produção de SAF na Refinaria Henrique Lage (REVAP), em São José dos Campos.

7. Hidrogênio

Para se falar do hidrogênio como uma forma de transição energética na aviação, é preciso pensar no futuro, pois ainda não se tem voos comerciais utilizando o H₂ pelo mundo. Ainda que em fase de pesquisa, apresenta forte capacidade de desenvolvimento para alcançar a aviação comercial e ser capaz de contribuir de forma direta na descarbonização do setor aéreo, atingindo as metas da descarbonização e redução das emissões em longo prazo no setor aeronáutico.

Existem dois fatores relevantes que colocam o H₂ como uma solução tão interessante. A primeira é o fato de ser possível produzi-lo e consumi-lo sem emitir o gás carbônico, principal gás causador do efeito estufa no planeta, enquanto a segunda vantagem, consiste no fato do hidrogênio estar disponível em grande quantidade na água.

7.1. Produção e Funcionamento

Assim como o biocombustível de aviação, o hidrogênio também possui diversas maneiras de ser produzido. O hidrogênio final possui uma cor para caracterizá-lo a partir de como ele foi produzido. O H₂ cinza e azul são produzidos a partir do gás natural através da reforma a vapor do metano ou da reforma autotérmica, estes tipos são os mais encontrados em indústrias. O hidrogênio turquesa foi produzido através da pirólise do metano, processo em que é separado o gás natural em gás hidrogênio e carbono sólido. O hidrogênio verde é o mais limpo de todos, dividindo a água em oxigênio e gás hidrogênio através do processo da eletrólise e utilizando energia proveniente de fontes renováveis como a energia solar e eólica, o que não emite gás carbônico durante toda a sua produção.

O funcionamento de motores à hidrogênio pode ocorrer de duas formas, da queima do H₂ em sua forma gasosa, ou, da forma mais eficiente encontrada e a que está em constante evolução e estudo, utilizando células de combustível. Essas células de combustível em um motor de um avião funcionariam da seguinte forma: o hidrogênio ficaria armazenado em tanques refrigerados para manter sua forma líquida e alimentaria o motor até chegar à célula de hidrogênio, local em que transformaria o hidrogênio agora em sua forma gasosa em eletricidade através de uma reação química, fazendo com que o motor gire e forneça tração para acelerar o avião. O resultado dessa reação, ou seja, o seu subproduto, seria apenas a água, que seria expelida pela exaustão do motor diretamente na atmosfera, sem causar poluentes.

7.2. Pesquisa e Desenvolvimento

O grande potencial do uso de hidrogênio como um biocombustível na aviação tem chamado a atenção até mesmo de grandes empresas que fabricam aviões para seus futuros projetos. A Airbus, um dos grandes fornecedores de aeronaves do mundo, principalmente na aviação comercial regular, está desenvolvendo aeronaves movidas a hidrogênio, focando na tecnologia de células de combustível de hidrogênio para propulsão, com o objetivo de lançar um modelo comercial até o começo da década de 2030. A União Europeia também se coloca bastante presente quando se trata da descarbonização na aviação, sendo uma das principais investidoras em inovação e desenvolvimento do hidrogênio como um biocombustível usável na aviação mundial.

Um avanço importante nas pesquisas que deixam o uso do hidrogênio em aviões mais viável é a utilização das células de combustível de hidrogênio citada anteriormente. Estas células são dispositivos que convertem a energia química do hidrogênio e do oxigênio em eletricidade, formando apenas água como subproduto. A empresa ZeroAvia, desenvolvedora de motores aeronáuticos que funcionam com o hidrogênio, usa células de combustível para implementar suas inovações e oferecer o melhor desempenho e menor custo para as empresas que escolherem um futuro mais limpo com os seus motores.

A empresa Airbus, grande fabricante de aeronaves comerciais espalhadas pelo mundo todo, tem uma ambição de lançar uma aeronave comercial movida a hidrogênio. O projeto chamado de ZEROe foi lançado em 2020 e estudava a viabilidade de duas tecnologias principais de propulsão a hidrogênio, a combustão de H₂ e as células de combustível de hidrogênio. De acordo com a empresa, a aeronave ZEROe contará com um sistema de propulsão a hélice elétrica alimentado por células de combustível de hidrogênio, que transformam o hidrogênio em eletricidade por meio de uma reação química. A projeção de ter a aeronave pronta é para o ano de 2035.

8. Resultados e Discussão

8.1. Vantagens dos Biocombustíveis

O SAF apresenta grandes vantagens quando comparado com o querosene de aviação. A primeira vantagem é a redução de emissões de carbono, ele é capaz de reduzir de forma significativa os gases que causam o efeito estufa, contribuindo para mitigar as mudanças climáticas, melhorando a qualidade do ar e ainda ajuda a alcançar as metas de redução de emissões globais. A segunda grande vantagem é a sua sustentabilidade, já que esse combustível pode ser produzido a partir de diversas fontes renováveis, como resíduos agrícolas e óleos vegetais, ele é capaz de promover uma economia circular e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, promovendo o uso sustentável de recursos que seriam descartados.

Outra vantagem é o que o SAF representa como inovação e desenvolvimento tecnológico global, estimulando pesquisas e desenvolvimentos de novas tecnologias e processos sustentáveis para alcançar um futuro cada vez mais limpo. Vale destacar que o SAF pode criar oportunidades para agricultores e promover práticas agrícolas sustentáveis, apoiando assim a agricultura sustentável. Mas a principal característica desse biocombustível que o faz

se destacar quando comparado com outros biocombustíveis é a sua compatibilidade com a infraestrutura já existente tanto nos aeroportos quanto nas aeronaves, sem a necessidade de modificações significativas, o que significa menos custos na sua implementação.

Por outro lado, o hidrogênio oferece grandes vantagens, principalmente quando comparado com alternativas de combustíveis sustentáveis para a aviação. Ao contrário das baterias elétricas, que são pesadas e limitam a capacidade de carga das aeronaves, o hidrogênio quase não pesa, possuindo uma densidade energética por massa muito maior. Isso significa que ele pode fornecer a mesma quantidade de energia para a aeronave, mas com menos peso, o tornando mais eficiente para voos de longa distância. Além disso, quando utilizado em células de combustível, o hidrogênio gera eletricidade com a emissão de apenas vapor d'água, eliminando praticamente todas as emissões de carbono durante toda a operação.

Quando comparado com o SAF, o H₂ também se destaca pela leveza, mas adicionalmente pelo fato de possuir um método de produção que é capaz de deixar de gerar por completo o gás carbônico, o que o deixa na frente pois o processo de produção do biocombustível de aviação acaba gerando o CO₂. Fazendo com que o hidrogênio seja ainda mais eficiente e interessante para acabar com as mudanças climáticas geradas a partir da poluição derivada das aeronaves consumindo seus combustíveis.

De acordo com a empresa fabricante de motores movidos à hidrogênio chamada ZeroAvia, a troca de combustíveis fósseis pelo hidrogênio é capaz de acabar com 95% dos impactos nas mudanças climáticas gerados no seu consumo. Adiciona ainda que os motores que utilizam o hidrogênio possuem um custo de manutenção significativamente mais baixos pois apresentam uma extensão de horas de voo entre serviços de manutenção principais.

8.2. Desafios Para a Inserção dos Biocombustíveis na Aviação

O custo é o principal motivo para sua lenta implementação. Atualmente, o SAF é entre três e cinco vezes mais caro do que o querosene de aviação convencional. Essa diferença de preço se deve aos desafios de tornar a produção mais econômica por meio do aumento da escala de produção. Enquanto isso, o preço do combustível de aviação de origem fóssil se mantém artificialmente baixo devido algumas isenções fiscais ainda implementadas por vários países.

Tanto as companhias aéreas quanto os produtores de combustível têm intensificado a pressão por maior apoio financeiro dos governos, com o objetivo de ampliar a produção do SAF e diminuir seus custos para que sejam alcançadas as metas estabelecidas. Em março de 2025, os CEOs da Ryanair, do International Airline Group (IAG), da Lufthansa e da Air France-KLM declararam ser impossível cumprir a meta da União Europeia de exigir 6% de SAF até 2030 devido ao alto custo e à escassez do combustível.

O SAF ainda enfrenta outros desafios, a escalabilidade de sua produção, ou seja, sua produção em grandes quantidades sofre por conta da capacidade de produção ainda ser muito baixa. Por fim, as emissões indiretas do biocombustível de aviação ainda levantam questionamentos, pois embora ele reduza as emissões diretas, a produção e o transporte do combustível podem gerar emissões adicionais dependendo das práticas utilizadas.

Já o hidrogênio enfrenta desafios tecnológicos e por isso a principal forma de desenvolvimento no cenário atual é o avanço de pesquisas e estudos voltados especialmente para a questão do armazenamento do combustível dentro das aeronaves e a necessidade de elaborar uma estrutura de produção e distribuição em grande escala. Entre os desafios tecnológicos de armazenamento, o hidrogênio apresenta uma baixa densidade volumétrica e precisa ser armazenado em temperaturas muito baixas, a cerca de -253°C , o que exige tanques mais volumosos e tecnologias mais avançadas.

O H_2 possui menor densidade energética por volume do que o querosene de aviação, ou seja, para que ambos tenham a mesma energia para fornecer à aeronave, o hidrogênio precisa ocupar mais espaço, como se precisasse de um tanque maior. Por esse motivo é necessário armazenar um volume maior de combustível a bordo das aeronaves em comparação com o QAV. Os volumes dos tanques de combustíveis existentes só permitiriam percorrer distâncias muito curtas com o hidrogênio e a localização desses tanques sendo nas asas dos aviões não permitem seu armazenamento na forma líquida ou gasosa de acordo com a Agência de Segurança na Aviação da União Europeia (EASA).

Além disso, a infraestrutura e a logística de abastecimento necessária para garantir a disponibilidade de H_2 nos aeroportos são elementos a serem considerados antes da realização de serviços regulares. Por esses motivos, não é possível utilizar a estrutura física de armazenamento já existente, tornando fundamental a criação de uma infraestrutura para garantir a produção de hidrogênio em larga escala de forma segura e desenvolver centros de abastecimento em aeroportos capazes de suprir as necessidades do hidrogênio.

9. Conclusão

Esta pesquisa foi capaz de demonstrar o grande potencial que os combustíveis sustentáveis representam no futuro próximo da aviação global, identificando as possíveis rotas para a produção de combustíveis como o SAF e o hidrogênio em aeronaves usadas comercialmente. Mostrando também como é o funcionamento de cada um e adicionalmente apontando quais são as grandes vantagens e os desafios de implementação, pesquisa e produção.

O trabalho deixa claro também a preocupação mundial em diminuir e futuramente até zerar as emissões de gases do efeito estufa na aviação por conta dos projetos criados tanto por órgãos internacionais, quanto empresas privadas que visam um desenvolvimento maior do setor em relação à transição energética mais limpa. Ainda que de forma lenta, a implementação do SAF e as pesquisas do hidrogênio chamam a atenção dos governos que, como foi descrito, estão tentando impulsionar de alguma forma esse desenvolvimento através de decretos de uso ou compensação em taxas federais.

Ainda, embora não tenha sido objeto deste estudo, vale destacar que os motores elétricos também podem ser uma alternativa para diminuir a emissão de gases poluentes na aviação. Porém, grandes desafios como a dimensão da bateria, a demora de carregamento, a autonomia e a garantia de segurança da própria bateria para atender aos requisitos da aviação afastam os motores elétricos de serem implementados nas aeronaves.

Portanto esta pesquisa acadêmica foi capaz de alcançar o seu objetivo principal de entender melhor os principais combustíveis sustentáveis da aviação e entender que o setor aeronáutico está caminhando e evoluindo cada vez mais para um futuro mais limpo, garantindo a segurança e a eficiência das aeronaves.

10. Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).: Combustíveis sustentáveis para a aviação. Acesso em 12 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/combustiveis-sustentaveis-para-a-aviacao>

Redação Pensamento Verde.: Qual é o setor que mais emite gases do efeito estufa? Acesso em 19 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/qual-e-o-setor-que-mais-emite-gases-do-efeito-estufa/>

123 Ecos. Redação.: Combustível Sustentável de Aviação (SAF) – O que é? Acesso em 03 de outubro de 2025; Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/combustivel-sustentavel-de-aviao/>

KPMG International.: Net Zero Readiness Report 2023. Acesso em 18 de outubro de 2025; Disponível em: <https://kpmg.com/pt/pt/home/insights/2023/11/net-zero-readiness-report.html>

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).: Com mais de 112 milhões de passageiros, setor aéreo tem melhor ano desde o início da pandemia. Acesso em 04 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2024/com-mais-de-112-milhoes-de-passageiros-setor-aereo-tem-melhor-ano-desde-o-inicio-da-pandemia>

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).: Conexão SAF – fórum informal para produção e consumo de combustíveis sustentáveis de aviação. Acesso em 15 de setembro de 2025; Disponível em: <https://hotsites.anac.gov.br/conexaosaf/>

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).: Produção e uso de combustível sustentável de aviação (SAF) vai à sanção presidencial. Acesso em 22 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2024/producao-e-uso-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao-saf-vai-a-sancao-presidencial>

International Civil Aviation Organization (ICAO): States adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations. Acesso em 09 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).: Sanção do Combustível do Futuro consolida o Brasil como líder mundial da transição energética. Acesso em 13 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/sancao-do-combustivel-do-futuro-consolida-o-brasil-como-lider-mundial-da-transicao-energetica>

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).: Conexão SAF reúne instituições públicas e privadas para debater viabilidade dos combustíveis sustentáveis de aviação. Acesso em 17 de outubro de 2025; 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>

Aeroflap.: Combustíveis dos aviões. Acesso em 21 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.aeroflap.com.br/combustiveis-dos-avioes/>

Araújo, D. S.: Motores a pistão aeronáuticos, um panorama. Autoentusiastas; acesso em 26 de setembro de 2025; Disponível em: <https://autoentusiastas.com.br/2014/08/motores-a-pistao-aeronauticos-um-panorama/>

Hangar MMA.: Motores a pistão. Acesso em 14 de outubro de 2025; Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/motores-a-pistao/>

HANGAR MMA.: Motor Turboélice. Acesso em 11 de outubro de 2025; Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/motor-turboelice/>

HANGAR MMA.: Motor Turbofan. Acesso em 23 de setembro de 2025; Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/motor-turbofan/>

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).: Biocombustíveis de aviação. Acesso em 08 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis-de-aviacao>

Modal Connection.: Combustíveis sustentáveis de aviação. Acesso em 16 de outubro de 2025; Disponível em: <https://modalconnection.com.br/sustentabilidade/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao/>

Toda Matéria.: Biocombustíveis. Acesso em 20 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/biocombustiveis/>

Camara, E.: O que é biocombustível? Produção, benefícios, impactos, etc. Acesso em 12 de outubro de 2025; Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/o-que-e-biocombustivel/>

Senado Federal.: Lei que incentiva ‘combustíveis do futuro’ é sancionada com vetos. Acesso em 24 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/10/10/lei-que-incentiva-combustiveis-do-futuro-e-sancionada-com-vetos>

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).: Combustíveis de aviação. Acesso em 14 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>

Petrobras.: Querosene de Aviação. Acesso em 10 de outubro de 2025; Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/querosene-de-aviacao>

Autor desconhecido.: Color coding and markings on fuel equipment. Acesso em 22 de setembro de 2025; Disponível em: https://4.bp.blogspot.com/-iYcpeB1jn6I/UkgOVnL7h8I/AAAAAAAAAWE/jklkkE_djRU/s1600/color+coding+and+markings+on+fuel+equipment.jpg

HANGAR MMA.: Motor Turbojato. Acesso em 13 de outubro de 2025; Disponível em: <https://hangarmma.com.br/blog/motor-turbojato/>

Martinez, L.: Pegada de carbono – como calcular e por que é importante? Acesso em 16 de setembro de 2025; Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/pegada-de-carbono/>

Petrobras.: Petrobras tem a primeira refinaria do país certificada para produção de SAF. Acesso em 20 de outubro de 2025; 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>

Agena, E. K.: SAF - Combustível Sustentável de Aviação. Acesso em 19 de setembro de 2025; Disponível em: <https://negocios.cimm.com.br/porta/publicacao/807-saf-combustivel-sustentavel-de-aviacao>

InfoAmazonia.: O que você precisa saber sobre o combustível sustentável para aviação (SAF). Acesso em 24 de setembro de 2025; Disponível em: <https://infoamazonia.org/2025/06/18/o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-combustivel-sustentavel-para-aviacao-saf/>

International Air Transport Association (IATA).: Fly Net Zero – Our commitment to net-zero by 2050. Acesso em 17 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>

Petrobras.: SAF: veja como investimos em tecnologia rumo ao futuro dos combustíveis sustentáveis. Acesso em 20 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/saf-veja-como-investimos-em-tecnologia-rumo-ao-futuro-dos-combustiveis-sustentaveis>

International Air Transport Association (IATA).: Disappointingly Slow Growth in SAF Production. Acesso em 22 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03/>

International Air Transport Association (IATA).: Sustainable Aviation Fuel (SAF) – Developing Sustainable Aviation Fuel. Acesso em 14 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>

International Air Transport Association (IATA): European aviation falling behind, green fuel targets risk being missed, CEOs say. Acesso em 21 de setembro de 2025; Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/european-aviation-falling-behind-risks-missing-green-fuel-targets-ceos-say-2025-03-27/>

Brasil.: Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Acesso em 24 de outubro de 2025; Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm

Henkes, A. J.: A Aviação Civil E O Uso Do Hidrogênio Como Combustível. Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas (RBAC). Acesso em 25 de outubro de 2025; Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/334/367>

CITOPendia.: Quais os principais desafios do hidrogênio como combustível aéreo? Acesso em 13 de outubro de 2025; Disponível em: <https://citopendia.pt/quais-os-principais-desafios-do-hidrogenio-como-combustivel-aereo/>

HypeScience.: Desafios e avanços: O papel do hidrogênio na descarbonização da aviação. Acesso em 18 de outubro de 2025; Disponível em: <https://hypescience.com/desafios-e-avancos-o-papel-do-hidrogenio-na-descarbonizacao-da-aviacao/>

European Union Aviation Safety Agency (EASA).: Hydrogen and its potential in aviation. Acesso em 15 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation>

ZeroAvia.: ZA2000. Acesso em 27 de outubro de 2025; Disponível em: <https://zeroavia.com/za2000/>

Endress+Hauser.: Como hidrogênio produzido (“Producing sustainable green hydrogen”). Acesso em 19 de outubro de 2025; Disponível em: <https://www.br.endress.com/pt/sustentabilidade-mercados-industriais/como-hidrogenio-produzido/>

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante Gustavo Santos Rodrigues do Curso de Ciências Aeronáuticas matrícula 20212004700010, telefone: 62 98119-6623 e-mail gustavo.sr321@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado Combustíveis Sustentáveis na Redução de Emissões na Aviação, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 30 de Setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO SANTOS RODRIGUES
Data: 03/10/2025 11:42:31-0900
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Gustavo Santos Rodrigues



Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: Roberto Márcio dos Santos