



ANÁLISE DOS AVANÇOS DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL PARA AERONAVES

Talison Severo Ribeiro¹
Onélio Conrado da Silva²
Jairo Afonso Henkes³

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar as tecnologias emergentes voltadas para a descarbonização da aviação, com foco no desenvolvimento de motores movidos a hidrogênio e nas inovações relacionadas aos sistemas de propulsão e armazenamento de combustível. Considerando o impacto significativo da aviação nas emissões globais de gases de efeito estufa, o estudo buscou analisar o estado das pesquisas sobre motores *turbofan* movidos a hidrogênio, como o projeto HySIITE da Pratt & Whitney, e as adaptações necessárias em aeronaves para o uso de hidrogênio líquido, incluindo tanques criogênicos e sistemas de distribuição. Além disso, foram discutidos os compromissos da indústria e de outras organizações para alcançar a neutralidade de carbono até 2050, bem como os desafios técnicos e econômicos para a adoção em larga escala dessas tecnologias. A metodologia adotada foi a pesquisa bibliográfica, com análise crítica de fontes científicas, relatórios da indústria e documentos de organizações internacionais. Espera-se que os resultados do estudo contribuam para o entendimento dos avanços tecnológicos capazes de transformar a aviação, promovendo a redução das emissões e mitigando o impacto ambiental do setor. O produto final consistiu em um artigo científico destinado a subsidiar futuras pesquisas e políticas públicas relacionadas à sustentabilidade na aviação.

Palavras-chave: aviação sustentável; motores a hidrogênio; descarbonização; tecnologia aeronáutica.

¹ Acadêmico do Curso de Ciências Aeronáuticas. AEROTD. E-mail: talisonsevero3@gmail.com

² Acadêmico do Curso de Ciências Aeronáuticas. AEROTD. E-mail: onedioconrado@gmail.com

³ Mestre em Agroecossistemas (UFSC, 2006). Especialista em Administração Rural (UNOESC, 1997). Engenheiro Agrônomo (UDESC, 1986). Professor e Pesquisador nas Áreas de Gestão Ambiental, R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 6, n. 1, p.10-31, jan/fev. 2026.

ANALYSIS OF THE ADVANCES IN THE USE OF HYDROGEN AS FUEL FOR AIRCRAFT

ABSTRACT

This study aimed to analyze emerging technologies focused on the decarbonization of aviation, with an emphasis on the development of hydrogen-powered engines and innovations related to propulsion systems and fuel storage. Considering the significant impact of aviation on global greenhouse gas emissions, the research sought to examine the state of studies on hydrogen-powered turbofan engines, such as the HySIITE project by Pratt & Whitney, and the necessary adaptations in aircraft for the use of liquid hydrogen, including cryogenic tanks and distribution systems. In addition, the commitments of the industry and other organizations to achieve carbon neutrality by 2050 were discussed, as well as the technical and economic challenges for the large-scale adoption of these technologies. The methodology adopted was bibliographic research, with a critical analysis of scientific sources, industry reports, and documents from international organizations. It was expected that the results of the study would contribute to understanding the technological advances capable of transforming aviation, promoting emission reduction and mitigating the environmental impact of the sector. The final product consisted of a scientific article intended to support future research and public policies related to sustainability in aviation.

ISSN 2763-7697

Keywords: *sustainable aviation; hydrogen engines; decarbonization; aeronautical technology.*

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais provocados pelo setor aeronáutico tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. Nesse contexto, o hidrogênio surge como uma das fontes de energia mais promissoras para a aviação do futuro, especialmente por sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono quando produzido a partir de fontes renováveis. Grandes fabricantes, como a Airbus, já estão investindo em projetos para viabilizar aeronaves movidas a hidrogênio até

2035, o que evidencia uma transformação tecnológica e ambiental no setor (Benefits Beyond Borders/ATAG, 2021). Este artigo tem como objetivo geral analisar os principais avanços tecnológicos relacionados ao uso do hidrogênio como combustível na aviação, bem como investigar os desafios para sua implementação em larga escala. Foram avaliados aspectos como produção, armazenamento, eficiência energética e impacto ambiental, além das perspectivas para a descarbonização do setor aéreo. A proposta integra conhecimentos de diversas disciplinas do curso de Ciências Aeronáuticas e busca contribuir para a formação de profissionais conscientes, críticos e preparados para os desafios da aviação sustentável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas últimas décadas, a aviação registrou um crescimento significativo, especialmente na demanda por transporte de passageiros.

2.1 UM BREVE HISTÓRICO SOBRE OS AVANÇOS DA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

No início, voar era um privilégio reservado às classes mais altas. No entanto, com o objetivo de democratizar o transporte aéreo, surgiram alternativas mais acessíveis, o que atraiu um público cada vez maior, interessado em vivenciar a experiência de voar com a vantagem de preços mais baixos e maior agilidade no deslocamento (Benefits Beyond Borders/ATAG, 2021).

No contexto atual da globalização, o avião tornou-se um elemento central na redução das distâncias, promovendo rapidez tanto na locomoção de pessoas quanto na prestação de serviços. Por outro lado, o aumento expressivo no número de voos e de aeronaves, também contribuiu para o crescimento das emissões de gases de efeito estufa, gerando impactos ambientais significativos (Benefits Beyond Borders/ATAG, 2021).

Em 2020, a aviação enfrentou um de seus períodos mais críticos devido à crise sanitária global, que impôs medidas de isolamento e resultou no cancelamento de milhares de voos. Aeroportos, antes movimentados, tornaram-se praticamente desertos, com saguões vazios e pistas ocupadas por aeronaves paradas, sem

previsão de retorno às atividades. Contudo, a recuperação do setor ocorreu de forma surpreendentemente rápida. Indicadores apontaram um crescimento de 67,7% em agosto de 2022 em comparação ao mesmo período de 2021. Considerando os níveis anteriores à pandemia, isso representa uma retomada de 73,7% (Benefits Beyond Borders/ATAG, 2021).

Atualmente, diante do cenário de recuperação das viagens aéreas no pós-pandemia, a fabricante norte-americana Boeing projeta, para as próximas décadas, um crescimento de 85% na frota das companhias aéreas da América Latina e do Caribe. O Brasil se destaca como o principal protagonista desse avanço, sendo responsável por 30% das novas aeronaves previstas. Esses novos aviões atenderão tanto à crescente demanda por transporte de passageiros quanto à substituição de modelos antigos, que apresentam maior consumo de combustível e elevadas emissões de dióxido de carbono (CO²) (Boeing, 2022).

Paralelamente ao aumento no número de passageiros, as tecnologias aeronáuticas também evoluíram. Os motores atuais, embora ainda emissores de poluentes, são significativamente mais eficientes e menos poluentes do que os utilizados em décadas passadas. No entanto, essa redução nas emissões ainda está longe de atingir os níveis ideais para uma aviação ambientalmente sustentável, com emissões zero de CO². O uso contínuo de combustíveis fósseis permanece como um dos grandes desafios a serem superados. A necessidade de substituí-los torna-se mais urgente a cada ano, e o desenvolvimento de combustíveis alternativos e sustentáveis vem ganhando destaque como uma das principais apostas para o futuro da aviação (Benefits Beyond Borders/ATAG, 2020).

2.2 EVOLUÇÃO DOS MOTORES AERONÁUTICOS

Em 1949, a empresa britânica Havilland lançou o DH106 Comet, a primeira aeronave comercial equipada com motores a turbojato. O modelo contava com quatro motores Halford H.2. Poucos anos depois, em 1954, a fabricante americana Boeing apresentou o Boeing 707, equipado com motores PW JT3C-6, da Pratt & Whitney. Este avião foi um marco na história da aviação civil, inaugurando a chamada “era dos jatos”. (Oliver, 2014).

A partir de então, as aeronaves passaram a atingir velocidades mais

elevadas, embora a queima de combustível em seus motores gerasse níveis visíveis de poluição atmosférica. No Brasil, companhias como a VARIG e a VASP operaram aeronaves com essa tecnologia. Entretanto os motores turbojato acabaram sendo descontinuados, em função da elevada emissão de poluentes (Oliver, 2014).

Nos cenários atuais, destaca-se a Airbus, responsável pela produção da família de aeronaves mais vendida no segmento: a linha A320. De acordo com (Engines, 2018), esses aviões são equipados com o motor PW1100G, que apresenta desempenho superior em comparação aos motores de gerações anteriores, contribuindo para a redução das emissões de gases que intensificam o aquecimento global. Toda a família A320 NEO (*New Engine Option*), composta pelas variantes A319, A320 e A321, passou a operar com esses motores a partir de 2016.

2.3 IMPACTOS DOS MOTORES AERONÁUTICOS NA EMISSÃO DE CO₂

Um tema amplamente debatido e que gera considerável controvérsia é o impacto da aviação nas mudanças climáticas, especialmente no que se refere à sua contribuição para o aquecimento global. Estima-se que a aviação seja responsável por aproximadamente 2,5% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) presentes na atmosfera. Contudo, vale destacar que cerca de 80% da população mundial não viaja de avião com frequência e muitos jamais voaram. Outro aspecto relevante é a forma como essas emissões são contabilizadas: nos voos domésticos, elas são atribuídas ao país onde ocorrem; já nos voos internacionais, especialmente os transoceânicos, as emissões são classificadas como "combustíveis de bunker", ou seja, não são atribuídas a nenhum país específico (Ritchie, 2020).

Ainda segundo Ritchie (2020), além das emissões de CO₂ e dos gases de efeito estufa listados no Acordo de Paris, há outros elementos não relacionados ao carbono denominados "forças não-CO₂", que geralmente são desconsiderados, sobretudo no caso de voos internacionais cujas emissões não entram nas estatísticas nacionais. Para fins ilustrativos, globalmente, a aviação é responsável por cerca de 2,5% das emissões de CO₂ e por aproximadamente 1,9% das emissões totais de gases de efeito estufa.

No entanto, conforme destacou o professor Stefan Gössling, coeditor do livro *Climate Change and Aviation: Issues, Challenges and Solutions*, em entrevista à

revista DW, a real contribuição da aviação para o efeito estufa pode ser, na prática, o dobro do estimado, alcançando cerca de 5% quando se consideram os impactos combinados de CO₂ e outras substâncias emitidas em altitude (Ritchie, 2020).

2.4 PERSPECTIVAS SOBRE MOTORES AERONÁUTICOS À HIDROGÊNIO

Com a chegada de uma nova era na aviação, marcada pela meta de voos com zero emissões de carbono, torna-se necessário não apenas substituir os combustíveis fósseis, mas também desenvolver novos motores para as aeronaves do futuro. Em fevereiro deste ano, a fabricante Pratt & Whitney anunciou o desenvolvimento de um motor a reação movido a hidrogênio, em parceria com o Departamento de Energia dos Estados Unidos, por meio da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada em Energia (ARPA-E) (Basseto, 2022).

Além de eliminar as emissões de CO₂ durante o voo, essa nova tecnologia também promete reduzir em até 80% as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e diminuir o consumo de combustível das futuras aeronaves de corredor único em até 35%. O novo motor a turbina, denominado HySIITE, será alimentado por hidrogênio líquido e vapor de água, operando com injeção de vapor e sistema de inter-resfriamento. Esse ciclo termodinâmico avançado visa uma significativa mitigação das emissões de NOx, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Alinhada a esse movimento tecnológico, a fabricante CFM International, firmou no início de 2022, uma parceria com a Airbus para desenvolver e testar um motor que funcione exclusivamente com hidrogênio como fonte de energia (Basseto, 2022).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia descrita a seguir aborda a questão do tipo de pesquisa, procedimentos para a coleta de dados, análise e critérios para inclusão e exclusão de fontes, além de tabulação e categorização.

3.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa desenvolvida caracteriza-se como bibliográfica e descritiva, de R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 6, n. 1, p.10-31, jan/fev. 2026.

natureza qualitativa. Foram fundamentadas em materiais já publicados, como livros, artigos científicos, relatórios técnicos, documentos oficiais e publicações especializadas na área da aviação e sustentabilidade ambiental. A escolha por esse tipo de pesquisa justifica-se pela necessidade de reunir, analisar e interpretar dados já existentes, possibilitando a compreensão dos avanços tecnológicos relacionados ao uso do hidrogênio como combustível na aviação e dos impactos ambientais decorrentes.

3.2 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados acadêmicas e científicas, tais como Scielo, Google Acadêmico e Elsevier, além da consulta a relatórios técnicos de organizações internacionais, como a IATA (Associação Internacional de Transporte Aéreo) e a ICAO (Organização da Aviação Civil Internacional). Também foram considerados documentos técnicos e institucionais de fabricantes aeronáuticos, como Airbus e Pratt & Whitney, bem como publicações atualizadas em sites especializados no setor.

Os dados coletados foram pesquisados, organizados, analisados e sistematizados de acordo com três eixos de pesquisa: Legal/Oficial, Institucional e Acadêmico/Científico. Estratégia que visa garantir maior consistência e confiabilidade às informações apresentadas (Vantzing; Henkes, 2024).

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados desta pesquisa foi conduzida a partir do levantamento bibliográfico previamente descrito na metodologia, contemplando fontes científicas, relatórios técnicos, documentos oficiais de organismos internacionais e materiais institucionais de fabricantes aeronáuticos. O objetivo desse processo foi organizar, interpretar e discutir as informações obtidas, de modo a responder à problemática central do estudo e aos objetivos previamente estabelecidos.

3.3.1 Organização e Catalogação das Fontes

As fontes consultadas foram inicialmente catalogadas em planilha, contendo informações essenciais como autor, ano, título, tipo de documento, origem, resumo sintético e eixo de análise: Legal/Oficial, Institucional e Acadêmico/Científico (Vantzing; Henkes, 2024). Esse procedimento garantiu a sistematização dos materiais, permitindo filtragens temáticas e cronológicas, além de assegurar a rastreabilidade das informações.

3.3.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídas publicações em português e inglês, com ênfase no período de 2015 a 2025, dada a relevância da atualidade no campo investigado, embora tenham sido mantidas algumas referências históricas consideradas fundamentais. Foram priorizados artigos revisados por pares, relatórios técnicos de fabricantes, documentos de organizações internacionais e estudos acadêmicos reconhecidos. Foram excluídas fontes sem autoria identificada, de caráter meramente opinativo, redundantes ou sem contribuição adicional para o estudo.

3.3.3 Tratamento dos Dados

Os dados obtidos foram tratados de forma qualitativa e quantitativa:

Qualitativa - por meio de análise de conteúdo, destacando trechos relevantes, interpretações e implicações para a temática investigada;

Quantitativa - quando os documentos apresentaram informações numéricas, como estimativas de redução de emissões, cronogramas de implantação e indicadores de desempenho. Nestes casos, as informações foram tabuladas e, quando necessário, convertidas para unidades padronizadas, a fim de possibilitar comparações consistentes.

3.3.4 Categorização Temática

A análise foi estruturada a partir de categorias temáticas, construídas conforme a recorrência dos conteúdos nas fontes. Entre os principais eixos de categorização, destacam-se:

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 6, n. 1, p.10-31, jan/fev. 2026.

- 3.3.4.1 Produção de hidrogênio (verde, azul, cinza);
- 3.3.4.2 Armazenamento (tanques criogênicos e pressurizados);
- 3.3.4.3 Propulsão e motores (projetos como HySIITE e adaptações de turbinas convencionais);
- 3.3.4.4 Arquitetura de aeronaves (modificações estruturais para integração de novos sistemas de combustível);
- 3.3.4.5 Regulação e políticas públicas (metas estabelecidas por organismos internacionais, como a ICAO e a IATA);
- 3.3.4.6 Impactos ambientais (redução potencial de emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa);
- 3.3.4.7 Viabilidade econômica e infraestrutura (custos de implantação e rede de abastecimento);
- 3.3.4.8 Segurança operacional (riscos relacionados ao manuseio e ao armazenamento do hidrogênio).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O debate acerca da substituição dos combustíveis fósseis na aviação tem ganhado força nos últimos anos, e o hidrogênio se consolidou como uma das alternativas mais promissoras. Isso ocorre porque, além de seu elevado poder calorífico, a combustão do hidrogênio gera apenas vapor d'água como subproduto, eliminando emissões de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa (IEA, 2022).

4.1 AVANÇOS TECNOLÓGICOS RELACIONADOS AO USO DO HIDROGÊNIO

Um dos principais avanços tecnológicos nesse campo refere-se ao desenvolvimento de motores a turbina, adaptados para o uso do hidrogênio líquido. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), testes realizados em protótipos de aeronaves demonstraram que o desempenho desses motores pode ser equiparado ao do querosene de aviação, mas com impacto ambiental muito inferior. Essa adaptação envolve mudanças significativas na concepção dos motores e dos tanques de armazenamento, já que o hidrogênio deve ser mantido a temperaturas

criogênicas em torno de -253°C para garantir maior densidade energética.

Outro avanço relevante está no campo das células a combustível, que convertem energia química diretamente em energia elétrica. Esse sistema, quando aplicado a aeronaves de menor porte, possibilita a propulsão elétrica com elevada eficiência e zero emissão de poluentes. Segundo estudo *da Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH JU) aeronaves movidas à células a combustível já foram testadas em voos experimentais, comprovando a viabilidade dessa tecnologia para a aviação regional e executiva (FCH JU, 2021).

Além disso, grandes fabricantes de aeronaves têm anunciado projetos ambiciosos com foco no hidrogênio. A Airbus, por exemplo, apresentou em 2020 o programa ZEROe, cujo objetivo é lançar até 2035 a primeira aeronave comercial movida a hidrogênio. A empresa defende que “o hidrogênio tem um potencial significativo para reduzir a pegada de carbono da aviação, uma vez que pode ser usado tanto em turbinas a gás modificadas quanto em células a combustível” (AIRBUS, 2021, p. 4).

No campo do armazenamento, os avanços em tecnologias criogênicas têm sido fundamentais. Conforme destacam Bicer e Dincer (2018), a utilização do hidrogênio líquido, em vez do hidrogênio gasoso comprimido, permite maior autonomia dos voos e viabiliza sua aplicação em aeronaves de médio e grande porte. Essa inovação é considerada um divisor de águas, pois amplia as possibilidades de uso do combustível em rotas mais longas e competitivas.

Portanto, os avanços tecnológicos observados até o momento desde motores adaptados, até células a combustível e sistemas de criogenia, indicam que a aviação movida a hidrogênio deixou de ser apenas um conceito futurista. Começa a se consolidar como uma solução real para os próximos anos.

4.2 DESAFIOS PARA SUA IMPLEMENTAÇÃO

Embora os avanços tecnológicos sejam significativos, a implementação do hidrogênio como combustível na aviação em larga escala ainda enfrenta inúmeros desafios técnicos, econômicos, regulatórios e infraestruturais. O primeiro desafio refere-se ao armazenamento e transporte do hidrogênio (Bicer; Dincer, 2018).

Por ser a molécula mais leve da tabela periódica, o hidrogênio apresenta

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 6, n. 1, p.10-31, jan/fev. 2026.

baixa densidade energética em seu estado gasoso, exigindo que seja liquefeito a temperaturas extremamente baixas (cerca de -253°C) (Bicer; Dincer, 2018). Esse processo não apenas demanda alta tecnologia, mas também eleva os custos operacionais. Bicer e Dincer (2018, p. 106) afirmam que “os custos de liquefação e o consumo de energia associados ao armazenamento criogênico constituem obstáculos relevantes para a competitividade do hidrogênio no setor de transporte aéreo”.

Outro ponto crítico diz respeito à infraestrutura aeroportuária. Para viabilizar o abastecimento de aeronaves a hidrogênio, seria necessário adaptar aeroportos em todo o mundo com tanques criogênicos, sistemas de segurança e novas normas de manuseio (Bicer; Dincer, 2018). A Agência Internacional de Energia (IEA, 2021) destaca que esse investimento pode chegar a bilhões de dólares, tornando-se um entrave especialmente em países em desenvolvimento.

Além disso, a produção de hidrogênio verde ainda é um dos maiores gargalos. Atualmente, a maior parte do hidrogênio disponível é obtida a partir do gás natural, processo que emite grandes quantidades de CO_2 . Para que seja uma alternativa realmente sustentável, é preciso ampliar a produção por meio da eletrólise da água utilizando fontes de energia renovável. Contudo, esse processo ainda apresenta custos elevados. Segundo a IEA (2021, p. 38), “a produção de hidrogênio renovável é em média, duas a três vezes mais cara, que o hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis”.

Há também barreiras relacionadas à regulação e certificação. A introdução de novas tecnologias na aviação requer a aprovação de órgãos internacionais como a EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) e a FAA (*Federal Aviation Administration*), o que demanda longos processos de avaliação e certificação para garantir padrões de segurança. Su-ungkavatin, Tituta-Barna e Hamelin (2023) ressaltam que a aceitação do hidrogênio dependerá de protocolos rigorosos que assegurem sua operação em todas as fases do voo.

Por fim, a questão econômica desempenha papel central. A viabilidade do hidrogênio dependerá da redução dos custos de produção, transporte e armazenamento, além de políticas públicas que incentivem investimentos em pesquisa e infraestrutura.

Sem essas medidas, sua aplicação em larga escala poderá se limitar a

iniciativas isoladas. Dessa forma, verifica-se que a adoção do hidrogênio como combustível na aviação é uma possibilidade real, mas sua concretização dependerá de um esforço coletivo envolvendo governos, indústria aeronáutica e setor energético, com foco em inovação tecnológica, segurança e viabilidade econômica (Bicer; Dincer, 2018).

4.3 ASPECTOS DA PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DO HIDROGÊNIO PARA A AVIAÇÃO

A viabilidade do hidrogênio como combustível na aviação depende diretamente de três eixos fundamentais: produção em escala sustentável, armazenamento seguro e eficiente, além de sistemas de distribuição compatíveis com a infraestrutura aeroportuária. Esses fatores são interdependentes e representam tanto oportunidades quanto desafios para o setor aéreo. No que diz respeito à produção, o hidrogênio pode ser obtido por diferentes rotas tecnológicas (IEA, 2021).

Atualmente, a maior parte da produção mundial provém do reformador a vapor de gás natural, processo conhecido como hidrogênio cinza, que apresenta baixo custo, mas emite grandes quantidades de dióxido de carbono (IEA, 2021). Para tornar a aviação mais sustentável, é necessário ampliar a produção do chamado hidrogênio verde, gerado por meio da eletrólise da água com o uso de fontes renováveis, como energia solar e eólica. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021, p. 37), “a eletrólise associada a energias renováveis pode reduzir significativamente as emissões, mas os custos ainda permanecem elevados em comparação com métodos convencionais”.

No que se refere ao armazenamento, que se trata de um dos pontos mais críticos para a aviação. O hidrogênio apresenta baixa densidade energética em volume, exigindo soluções como a compressão a altas pressões ou a liquefação a temperaturas criogênicas de aproximadamente $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Bicer; Dincer, 2018). Os autores destacam ainda que o armazenamento em estado líquido é mais adequado para o setor aéreo, uma vez que garante maior autonomia de voo e ocupa menos espaço a bordo, embora demande elevados custos energéticos para manter as condições criogênicas. “A criogenia representa uma condição indispensável para o

uso do hidrogênio em longas distâncias, mas sua viabilidade dependerá de avanços tecnológicos que reduzam perdas energéticas” (Bicer; Dincer, 2018, p. 106).

Quanto à distribuição, os desafios estão relacionados tanto ao transporte do hidrogênio até os aeroportos quanto à sua manipulação em escala operacional. A criação de uma rede de abastecimento segura exige investimentos em infraestrutura de dutos, terminais de armazenamento e estações de abastecimento específicas. Segundo o relatório da FCH JU (2021), a adaptação da infraestrutura aeroportuária para o hidrogênio será complexa e custosa, pois exigirá a implementação de normas de segurança rigorosas e o treinamento de profissionais especializados no manuseio desse combustível.

4.4 A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E O IMPACTO AMBIENTAL DO USO DO HIDROGÊNIO NA AVIAÇÃO

A análise da eficiência energética e do impacto ambiental do hidrogênio como combustível aeronáutico é um dos aspectos mais relevantes para compreender seu potencial como alternativa sustentável ao querosene de aviação. De modo geral, o hidrogênio apresenta alto poder calorífico, cerca de 120 megajoules por quilograma (MJ/kg), quase três vezes superior ao do querosene (aproximadamente 43 MJ/kg), o que o torna extremamente eficiente em termos de energia por massa (IEA, 2021).

Entretanto, sua baixa densidade volumétrica e a necessidade de armazenamento criogênico reduzem parte dessa vantagem, já que exigem tanques maiores e mais pesados. Conforme afirmam Bicer e Dincer (2018), “embora o hidrogênio possua um poder energético elevado por unidade de massa, os desafios de armazenamento e transporte em estado líquido ou comprimido acabam diminuindo a eficiência global do sistema” (p. 10613). Dessa forma, a eficiência total depende não apenas do combustível em si, mas de toda a cadeia envolvida produção, armazenamento, transporte e conversão em energia mecânica.

Quando se considera a eficiência do ciclo completo (*well-to-wake*), que abrange desde a geração de energia até a propulsão da aeronave, o desempenho do hidrogênio varia conforme a tecnologia empregada. Em motores de turbina modificados, a eficiência pode ser semelhante à dos motores convencionais, mas em sistemas baseados em células a combustível, ela pode ser superior, chegando a

até 60% de conversão da energia química em elétrica (FCH JU, 2020). Essa característica torna o hidrogênio particularmente interessante para aeronaves de pequeno e médio porte, nas quais o peso e a eficiência energética têm impacto direto sobre o alcance e o consumo.

Do ponto de vista ambiental, os benefícios do hidrogênio são evidentes. A combustão do hidrogênio não libera dióxido de carbono (CO_2), o principal gás de efeito estufa, produzindo apenas vapor d'água e pequenas quantidades de óxidos de nitrogênio (NO_x), dependendo das condições de queima (IEA, 2022). Em sistemas de célula a combustível, as emissões são ainda menores, praticamente nulas, já que não há processo de combustão direta. Segundo a Airbus (2021, p. 5), “a adoção do hidrogênio tem potencial para eliminar até 75% das emissões de gases de efeito estufa do setor aéreo até 2050, quando produzido a partir de fontes renováveis”.

Além da redução de poluentes, o uso do hidrogênio também contribui para a diminuição do ruído aeronáutico, já que os motores elétricos alimentados por células a combustível geram vibrações e sons muito menores que as turbinas convencionais (FCH JU, 2021). Essa característica representa um avanço importante para a operação de aeroportos localizados próximos a centros urbanos, reduzindo o impacto sonoro sobre as comunidades.

Por outro lado, o impacto ambiental indireto deve ser considerado, especialmente quando o hidrogênio é produzido a partir de fontes fósseis. O chamado hidrogênio cinza continua associado a altas emissões de carbono, e mesmo o hidrogênio azul, produzido com captura e armazenamento de carbono (CCS), ainda depende de tecnologias caras e limitadas. Assim, apenas o hidrogênio verde, obtido por eletrólise com energia renovável, pode garantir um ciclo verdadeiramente sustentável (IEA, 2021).

Lieuwen *et al.*, (2021) observam que a transição para o hidrogênio exigirá políticas públicas e investimentos consistentes em fontes renováveis, pois o potencial de descarbonização total do hidrogênio está diretamente ligado à origem da energia usada em sua produção. Portanto, o impacto ambiental positivo só será alcançado se houver uma mudança estrutural na matriz energética global.

O hidrogênio representa uma das alternativas mais promissoras para reduzir as emissões e aumentar a eficiência energética na aviação. No entanto, sua plena sustentabilidade depende da expansão da produção verde, do aperfeiçoamento das

tecnologias de armazenamento e do fortalecimento das políticas internacionais voltadas à transição energética no setor aéreo.

4.5 PERSPECTIVAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR AÉREO

A descarbonização é um conceito central na atual agenda ambiental global e se refere ao processo de redução ou eliminação das emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de atividades humanas, especialmente aquelas associadas à geração de energia e transporte. No setor aéreo, essa transição é particularmente desafiadora devido à elevada demanda energética das aeronaves e à dependência histórica do querosene de aviação, derivado do petróleo (IEA, 2022). Assim, a busca por tecnologias e combustíveis de baixo carbono tornou-se uma prioridade estratégica para garantir o crescimento sustentável da aviação e o cumprimento das metas climáticas internacionais estabelecidas pelo Acordo de Paris (2015).

De acordo com a Agência Internacional de Energia - IEA (2021), a aviação é responsável por cerca de 2,5% das emissões globais de dióxido de carbono, mas sua participação tende a crescer significativamente nas próximas décadas, impulsionada pelo aumento do transporte aéreo mundial. Diante desse cenário, a descarbonização do setor aéreo depende da combinação de diferentes estratégias: o uso de combustíveis sustentáveis, como o hidrogênio e os biocombustíveis avançados; a adoção de tecnologias de propulsão elétrica; e a otimização da eficiência operacional das aeronaves.

Entre as alternativas em estudo, o hidrogênio se destaca como um vetor energético essencial para a transição. Segundo o relatório *Hydrogen-powered Aviation* (FCH JU, 2021). O hidrogênio possui potencial para reduzir até 75% das emissões totais da aviação até 2050, quando produzido a partir de fontes renováveis. A Airbus (2021) reforça essa visão ao afirmar que o desenvolvimento de aeronaves movidas a hidrogênio como o projeto ZEROe representa uma das soluções mais promissoras para a descarbonização de voos comerciais de média distância.

Outra frente de inovação é o uso de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF – *Sustainable Aviation Fuels*), produzidos a partir de matérias-primas como

resíduos orgânicos, algas e óleos vegetais. Esses combustíveis podem ser utilizados em motores convencionais com poucas modificações, o que os torna uma alternativa viável no curto e médio prazo. No entanto, conforme destacam *Lieuwen et al. (2021)*, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) podem reduzir as emissões de CO² em até 80%, embora sua disponibilidade e custo ainda representem limitações para a aplicação em larga escala”.

Além dos avanços relacionados aos combustíveis, a descarbonização também envolve melhorias na eficiência energética das aeronaves. A incorporação de materiais mais leves, o uso de designs aerodinâmicos otimizados e a digitalização dos processos operacionais contribuem para a redução do consumo de combustível. De acordo com a IEA (2022), a eficiência operacional pode reduzir até 10% das emissões sem a necessidade de substituição do tipo de combustível, o que reforça a importância de uma abordagem integrada. No Quadro 1 pode se observar estratégias do setor aéreo.



RBAC & CIA
**Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas**
ISSN 2763-7697

Quadro 1 – Perspectivas e Estratégias para a descarbonização do Setor Aéreo até 2050

Eixo de Ação	Descrição / Estratégia	Benefícios Ambientais	Desafios Principais	Horizonte de Implementação
Hidrogênio Verde	Uso de hidrogênio produzido via eletrólise com energia renovável em turbinas adaptadas ou células a combustível.	Redução de até 75% das emissões de CO₂ quando produzido com energia limpa.	Alto custo de produção, armazenamento o criogênico e necessidade de infraestrutura aeroportuária.	Médio e longo prazo (2035–2050).
Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF)	Produção de biocombustíveis a partir de resíduos orgânicos, óleos vegetais e algas.	Redução de 60% a 80% das emissões em motores convencionais.	Escassez de matéria-prima e custo elevado de produção.	Curto e médio prazo (2025–2040).
Propulsão Elétrica e Híbrida	Aplicação de motores elétricos movidos por baterias ou células a combustível em aeronaves leves.	Emissão zero de CO₂ e redução significativa do ruído.	Baixa autonomia e densidade energética limitada.	Curto prazo para voos regionais (até 2035).
Eficiência Operacional e Aerodinâmica	Uso de materiais leves, otimização de rotas e digitalização de sistemas.	Redução de até 10% das emissões sem troca de combustível.	Custos de adaptação e modernização de frota.	Curto prazo (2025–2035).
Políticas e Cooperação Internacional	Incentivos fiscais, investimentos públicos e metas de neutralidade de carbono da IATA e ICAO.	Estímulo global à aviação sustentável e inovação tecnológica.	Desigualdade de recursos entre países e falta de padronização.	Contínuo (2025–2050).

Fonte: Adaptado de IEA (2021, 2022); FCH JU (2020); Airbus (2021); Lieuwen *et al.*, (2021).

No longo prazo, as perspectivas para a descarbonização da aviação estão diretamente associadas ao desenvolvimento de uma infraestrutura global de

hidrogênio verde, ao avanço das células à combustível de alta densidade energética e à cooperação internacional entre governos, indústrias e instituições de pesquisa. Isso inclui incentivos fiscais, políticas de subsídios e regulamentações que estimulem o investimento em tecnologias limpas e a redução progressiva do uso de combustíveis fósseis (IEA, 2022). Contudo, essa transição não será imediata. Conforme aponta a Airbus (2021), “a transformação do setor aéreo é um processo de longo prazo, que exigirá um equilíbrio entre viabilidade econômica, segurança operacional e sustentabilidade ambiental”. A expectativa é que, até 2050, a aviação alcance um modelo híbrido, combinando diferentes fontes de energia hidrogênio, eletricidade e combustíveis sintéticos em um ecossistema sustentável e de baixo carbono. Segundo Brito e Henkes (2023, p. 176):

Os projetos e pesquisas na tecnologia das células a combustível e de hidrogênio seguem em frente, registrando importante evolução que será seguida também nas próximas etapas, com comprometimento ambiental e sustentabilidade, além de se projetar motores igualmente eficazes. Se identificam diferentes estratégias nas empresas e organizações, em uma corrida pela inovação. A Airbus optando por plataformas grandes, mas também com grandes custos, se mostra disposta a aplicar tal tecnologia o quanto antes. Não distante e com estratégias diferentes, uma das maiores fabricantes aeronáuticas do mundo e que é uma empresa Brasileira, a Embraer se mostra muito bem posicionada neste quesito, com bons projetos para a utilização do hidrogênio objetivando a redução de emissões de carbono.

A descarbonização do setor aéreo representa não apenas uma exigência ambiental, mas também uma oportunidade de inovação tecnológica e reposicionamento estratégico para as empresas do setor. O hidrogênio desponta como um dos pilares dessa transformação, capaz de redefinir o futuro do transporte aéreo e contribuir de forma decisiva para a mitigação das mudanças climáticas globais (IEA, 2022).

É importante destacar que a integração entre produção, armazenamento e distribuição deve ser pensada de forma sistêmica. Como ressaltam Lieuwen *et al.*, (2021, p. 25), a transição energética no setor aéreo só será possível se houver “um ecossistema integrado que envolva usinas de hidrogênio verde, infraestrutura aeroportuária adaptada e aeronaves certificadas para operação segura”. Dessa forma, a aviação poderá se beneficiar de um ciclo de fornecimento contínuo e

sustentável, capaz de atender à crescente demanda do transporte aéreo global.

Assim, observa-se que a avaliação desses três aspectos é fundamental para compreender a real possibilidade de utilização do hidrogênio em larga escala. A produção deve evoluir para métodos sustentáveis e economicamente viáveis; o armazenamento precisa superar os entraves técnicos relacionados à criogenia; e a distribuição dependerá de forte investimento em infraestrutura e padronização global.

Diante dos aspectos analisados que abrangem os avanços tecnológicos, os desafios de implementação, as questões de produção e armazenamento, a eficiência energética, o impacto ambiental e as perspectivas de descarbonização, espera-se que os resultados deste estudo contribuam para uma compreensão mais ampla sobre o papel do hidrogênio na transformação do setor aéreo.

O objetivo geral, de analisar os principais avanços tecnológicos relacionados ao uso do hidrogênio como combustível na aviação, bem como investigar os desafios para sua implementação em larga escala, visa oferecer uma visão integrada dos fatores técnicos, econômicos e ambientais que determinam sua viabilidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste estudo evidenciou que o hidrogênio desponta como uma das soluções mais promissoras para a transição energética no setor aéreo, representando um marco importante no caminho rumo à sustentabilidade e à redução das emissões de gases de efeito estufa. O objetivo geral deste trabalho foi de analisar os principais avanços tecnológicos relacionados ao uso do hidrogênio como combustível na aviação, bem como investigar os desafios para sua implementação em larga escala foi alcançado ao demonstrar que, embora ainda existam barreiras técnicas, econômicas e infraestruturais, existem progressos significativos que tornam essa alternativa cada vez mais viável. Ao avaliar aspectos como produção, armazenamento, eficiência energética e impacto ambiental, e descrever as perspectivas para a descarbonização do setor aéreo, o trabalho demonstrou que o hidrogênio representa uma alternativa concreta e estratégica para a redução das emissões

de carbono e para o avanço rumo a uma aviação mais sustentável, inovadora e ambientalmente responsável.

Os resultados apontam que os avanços tecnológicos em motores adaptados, sistemas criogênicos e células a combustível têm ampliado a viabilidade do hidrogênio como vetor energético limpo. Além disso, a produção sustentável de hidrogênio verde, obtido por eletrólise com o uso de fontes renováveis, surge como elemento essencial para assegurar um ciclo de baixo carbono. Contudo, os desafios de armazenamento, transporte e infraestrutura aeroportuária ainda exigem investimentos expressivos e cooperação global para que sua aplicação em larga escala se torne realidade.

Em relação à eficiência energética, constatou-se que o hidrogênio possui um poder calorífico superior ao do querosene de aviação, o que o torna energeticamente vantajoso, especialmente quando utilizado em células a combustível. Do ponto de vista ambiental, o combustível destaca-se por não emitir dióxido de carbono durante a combustão, contribuindo de forma significativa para a descarbonização da aviação e para o cumprimento das metas climáticas internacionais.

As perspectivas futuras indicam que o processo de descarbonização do setor aéreo dependerá de uma combinação de soluções, incluindo o hidrogênio, os combustíveis sustentáveis (SAFs), a eletrificação e melhorias na eficiência operacional das aeronaves. Assim, o hidrogênio se consolida não apenas como uma inovação tecnológica, mas como um instrumento estratégico para o futuro da aviação, capaz de equilibrar desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

Portanto, conclui-se que a transição para o uso do hidrogênio como combustível na aviação é um caminho gradual, porém inevitável, impulsionado pela necessidade de reduzir o impacto ambiental e construir um modelo de transporte aéreo mais limpo e sustentável. Este estudo, ao atingir seus objetivos, reforça a importância de políticas públicas, investimentos contínuos em pesquisa e cooperação internacional, para tornar o hidrogênio um pilar fundamental na construção de um futuro aéreo livre de carbono.

REFERÊNCIAS

AIRBUS. ZEROe: **Towards the world's first zero-emission commercial aircraft.** 2021. Disponível em: <https://www.airbus.com>. Acesso em: 10 set. 2025.

AVIATION BENEFITS BEYOND BORDERS. **Aviation: Benefits Beyond Borders.** 2020. Disponível em: <https://aviationbenefits.org/downloads/aviation-benefits-beyond-borders-2020/>. Acesso em: 10 mai. 2025.

BASSETO, M. **EUA escolhe Pratt & Whitney para criar revolucionário motor aeronáutico a hidrogênio e vapor.** 2022. Disponível em: <https://aeroin.net/eua-escolhe-pratt-whitney-paracriar-revolucionario-motor-aeronautico-a-hidrogenio-e-vapor/>. Acesso em: 26 mai. 2025.

BICER, Y.; DINCER, I. Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A techno- economic investigation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 23, p. 106- 107, 2018.

BOEING. **Boeing prevê que a frota de aeronaves da américa latina quase dobrará nos próximos 20 anos – Brasil lidera essa demência.** 2022. Disponível em: <https://www.boeing.com.br/noticias-e-sala-deimprensa/releases/2022/outubro/boeingprev%C3%AA-que-a-frota-de-aeronaves-da-am%C3%A9rica-latina-quase-dobrar%C3%A1-nos-pr%C3%B3ximos-20-anos.page?>. Acesso em: 20 mai. 2025.

BRITO, R. de .; HENKES, J. A. (2023). Um estudo sobre combustíveis para a aviação: Hidrogênio e célula a combustível. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, 3(2), 159–182. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/134> . Acesso em: 28 out.2025.

ENGINES, Pratt & Whitney. **PW1100G-JM: Powering The Airbus A320NEO.** USA: [s. n.], 2018.

FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING (FCH JU). **Relatório Anual de Atividades 2020.** Bruxelas: FCH 2 JU, 2021. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/237843/FCH_CAAR_2020.pdf. Acesso em: 01 nov.2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVIAÇÃO. **Fabricante de aeronaves apresenta três conceitos de aviões movidos a hidrogênio para 2035.** 2020. Disponível em: <https://institutoaviacao.org/noticia/fabricante-de-aeronaves-apresenta-tra-s-conceitos-de-aviaes-movidos-a-hidrogenio-para-2035#:~:text=Tanque%20criog%C3%AAnico&text=Os>. Acesso em: 25 mai. 2025.

INSTITUTO DE ENGENHARIA. **Aviões a hidrogênio prometem aviação livres de emissões.** 2021. Disponível em:

<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2021/12/08/avioes-a-hidrogenio-prometemaviacao-livres-def-emissoes/>. Acesso em: 10 mai. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Hydrogen**. Paris: IEA, 2021. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Hydrogen in aviation**. Paris: IEA, 2022.

LIEUWEN, Tim C. *et al.* **Hydrogen-powered aviation: A path toward zero-emission flight**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

OLIVER, S. A primeira geração de jatos. **Revista Aero Magazine**, São Paulo-SP, 246, p. 12- 14, nov. 2014.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. **Emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa**. Our World in Data, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 01 nov. 2025.

SU-UNGKAVATIN, P.; TIRUTA-BARNA, L.; HAMELIN, L.. Biocombustíveis, eletrocombustíveis, eletricidade ou hidrogênio?: Uma análise dos sistemas de aviação sustentável atuais e emergentes. **Progresso na Ciência da Energia e da Combustão**. Volume 96 ,maio de 2023, 101073. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101073>. Acesso em: 28 set. 2025.

VALDUGO. F. **Airbus abre duas unidades para produzir tanques criogênicos de hidrogênio**. 2021. Disponível em: <https://www.cavok.com.br/airbus-abre-duas-unidades-paraproduzir-tanques-criogenicos-de-hidrogenio>. Acesso em: 25 mai. 2025.

VANTZING, W. de P.; HENKES, J. A. (2024). Uma análise da Reforma Tributária em tramitação no Congresso Nacional e as possíveis conseqüências na Aviação Civil. **Revista Brasileira De Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, 4(4), 236–259. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/284>. Acesso em: 29 set. 2025.

