

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AERONÁUTICAS**



HIDROGÊNIO: O FUTURO COMBUSTÍVEL DA AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL

FELIPE FANTE DE OLIVEIRA

GOIÂNIA
2023

FELIPE FANTE DE OLIVEIRA

HIDROGÊNIO: O FUTURO COMBUSTÍVEL DA AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

Orientador:

Prof. Esp. Andréluiz da Silva Fernandes.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Humberto César Machado.

Prof. Me. Roberto Marcio dos Santos.

GOIÂNIA

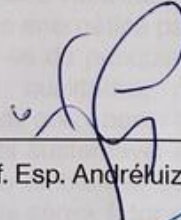
2023

RESUMO

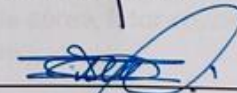
Os artigos discutidos abordam a sua importância e o papel da aviação sustentável na redução das emissões de carbono, que geram impactos ambientais significativos. A pesquisa também aborda as medidas necessárias para combater os efeitos das mudanças climáticas, incluindo a utilização de combustíveis sustentáveis e a implementação de políticas ambientais.

HIDROGÊNIO: O FUTURO COMBUSTÍVEL DA AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL


Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas, em 14/12/2023.



Orientador: Prof. Esp. André Luiz da Silva Fernandes



Prof. Dr. Humberto César Machado



Prof. Me. Roberto Marcio dos Santos

GOIÂNIA

2023

HIDROGÊNIO: O FUTURO COMBUSTÍVEL DA AVIAÇÃO SUSTENTÁVEL

Felipe Fante de Oliveira¹
Andréluiz da Silva Fernandes²

RESUMO

Os eventos climáticos adversos que vêm abalando o planeta de modo evidente nos dias atuais fizeram com que grandes instituições e governos mundiais buscassem medidas para conter ou mitigar suas causas. Esse cenário de mudanças climáticas negativas é influenciado, entre outros fatores, pela ação antrópica, em especial a relacionada ao desmatamento, à indústria e a diversas outras atividades, entre elas, a aviação, que participa na casa de 2,5% com a emissão de gases poluentes na atmosfera. Nesse sentido, ações visando a diminuição das emissões de gases do efeito estufa, bem como a necessária sustentabilidade dos meios de transporte, hoje dependentes do petróleo, configuram-se como principal vetor para a melhora nos níveis de poluição. Considerando esta realidade, essa pesquisa tem por objetivo, após retratar a evolução dos motores aeronáuticos desde o começo do século passado até os dias de hoje, salientar a busca por um combustível limpo, alternativo aos fósseis, que propicie eficiência econômica e sustentável na aviação. O hidrogênio surge nesse cenário como essa alternativa de fonte energética para uso em aeronaves. Para atingir os objetivos propostos, utilizou-se da pesquisa de natureza básica, com objetivos descritivos e abordagem qualitativa, mediante o uso de procedimentos bibliográficos. A conclusão é de que, apesar de encontrar desafios, a utilização do hidrogênio como combustível sustentável na aviação se mostra viável tanto do ponto de vista técnico como ambiental, sendo apto a mitigar a poluição atmosférica provocada pela atividade aérea, fator crucial para se ter uma aviação próspera e sem emissão de poluentes.

Palavras-chaves: Sustentabilidade. Aviação. Combustível. Hidrogênio.

HYDROGEN: THE FUTURE FUEL OF SUSTAINABLE AVIATION

ABSTRACT

The adverse climatic events that have been noticeably impacting the planet in recent days have prompted major institutions and world governments to seek measures to contain or mitigate their causes. This scenario of negative climate change is influenced, among other factors, by anthropogenic action, especially related to deforestation, industry and several other activities, including aviation, which contributes approximately 2.5% to atmospheric

¹ Graduando em Ciências Aeronáuticas pela PUC/GO. Piloto privado. E-mail: fantefelipe@gmail.com.

² Advogado; Especialista em Docência Universitária pela Universidade Católica (2005); professor Curso de Ciências Aeronáuticas na Pontifícia Universidade Católica de Goiás (2002), E-mail: andreluizfernandes64@gmail.com.

pollutant emissions. In this sense, actions aimed at reducing greenhouse gas emissions, as well as ensuring the necessary sustainability of transportation means currently reliant on oil, emerge as a key factor in improving pollution levels. Considering this reality, this research aims, after depicting the evolution of aeronautical engines from the beginning of the last century to the present day, to emphasize the quest for a clean fuel alternative to fossils that provides economic and sustainable efficiency in aviation. Hydrogen emerges in this scenario as an alternative energy source for use in aircraft. To achieve the proposed objectives, basic research with descriptive goals and a qualitative approach was employed through bibliographic procedures. The conclusion is that, despite facing challenges, the use of hydrogen as a sustainable fuel in aviation proves to be viable both from a technical and environmental aspects, being able to mitigate atmospheric pollution caused by aerial activity, a crucial factor in having a prosperous and emission-free aviation..

Keywords: Sustainability. Aviation. Fuel. Hydrogen.

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, iniciada no final do século XVIII, teve um impacto transformador na sociedade e no ambiente, marcando o início de mudanças significativas nas relações humanas com o meio natural. Esses impactos estabeleceram padrões que se intensificaram ao longo do tempo, à medida que a sociedade contemporânea evoluiu, resultando em profundas transformações negativas socioambientais.

Alguns dos principais fatores que contribuem para essas mudanças são o crescimento populacional, a industrialização, a urbanização descontrolada, a exploração intensiva de recursos naturais e os padrões de consumo insustentáveis. A aviação contribui negativamente para esse cenário à medida que faz uso de combustíveis de matriz fóssil e, desse modo, favorece as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO_x), partículas e aerossóis, além de provocar a formação de trilhas de condensação, tudo a impactar o ozônio estratosférico, necessário à preservação da vida.

Para enfrentar esses desafios, é crucial a implementação de práticas sustentáveis, a promoção da conscientização ambiental, o desenvolvimento de tecnologias limpas, a implementação de políticas ambientais eficazes e a adoção de estilos de vida mais sustentáveis em níveis globais, uma vez que tais problemas transcendem fronteiras.

Desse modo, as companhias aéreas e a indústria da aviação têm empreendido esforços para reduzir o impacto ambiental, investindo em aeronaves mais eficientes, buscando combustíveis de aviação sustentáveis e implementando medidas para otimizar rotas e reduzir as emissões. No entanto, o desafio de equilibrar a demanda crescente por viagens aéreas com a necessidade de reduzir as emissões continua sendo um grande desafio.

A evolução dos motores aeronáuticos é uma parte fundamental do progresso na aviação e, ao longo do tempo, houve avanços significativos em termos de eficiência, desempenho e sustentabilidade, partindo-se dos motores a pistão, passando pelos modelos a jato, até chegar aos atuais e modernos *by-pass* (turbofan). Logo, as novas tecnologias, como materiais compostos, motores de próxima geração e inovações aerodinâmicas, são implementadas para tornar as aeronaves mais sustentáveis.

Dentre os avanços tecnológicos na aviação, o hidrogênio se destaca como possível fonte de energia em alternativa aos combustíveis fósseis, com vistas a reduzir as emissões de carbono, podendo ser utilizado em motores de combustão interna, motores a jato modificados ou em células de combustível de hidrogênio que convertem o hidrogênio diretamente em eletricidade, sem a necessidade de combustão.

Dessa forma, esta pesquisa, estruturada em cinco seções, incluindo esta introdutória e as considerações finais, tem como objetivo retratar a evolução dos motores aeronáuticos desde o começo do século passado até os dias de hoje, além de evidenciar a viabilidade do uso do hidrogênio como alternativa aos combustíveis fósseis altamente poluentes e destacar os principais projetos já em fase de teste com o emprego desse elemento químico, bem como apresentar os futuros, em fase de planejamento.

Para a concretização dos objetivos, adotou-se como metodologia a pesquisa de natureza básica, descritiva e abordagem qualitativa. Os procedimentos utilizados foram bibliográficos, mediante busca realizada em materiais especializados, como livros, sítios eletrônicos e artigos hospedados no Google Acadêmico.

Ao final, verifica-se que a utilização do hidrogênio como combustível sustentável na aviação revela-se viável tanto do ponto de vista técnico como ambiental, sendo apto a mitigar a poluição atmosférica provocada pela atividade aérea, fator crucial para se ter uma aviação próspera e sem emissão de poluentes.

2 BREVE HISTÓRICO SOBRE A EVOLUÇÃO DOS MOTORES

O sonho do homem de se alçar aos céus remonta a tempos imemoráveis. Lemos (2012) nos conta que, desde os primórdios, a aspiração humana de voar é uma fonte inesgotável de experimentos que, não raras vezes, resultaram em fatalidades para os arrojados e valentes desafiadores da força da gravidade terrestre.

Nesse contexto, foi no dia 23 de outubro de 1906, no Campo de Bagatelle, em Paris, que Santos Dumont decolou com o 14 BIS, sem auxílios externos, perante uma comissão técnica e na presença do público, voando uma distância de 60 metros, na altura de 2 a 3 metros, e pousando no meio da multidão, eufórica com o épico acontecimento. Menos de um mês depois, repetiria a façanha, voando 220 metros em 12 segundos, inspirando, desse modo, o desenvolvimento da aviação ao longo dos anos seguintes (Lemos, 2012).

Paralelamente à evolução da aviação seguiu junto a dos motores movidos a gasolina, que teve grande representação na pessoa de Nikolaus Otto, que ficou conhecido pelo motor de ciclo Otto. O primeiro motor construído por Otto, ainda em 1860, foi a combustão interna, utilizando o ciclo de quatro tempos. O experimento de Otto, desenvolvido para automóveis e adotado, posteriormente, nos primeiros motores da aviação, concluiu que a admissão do combustível ocorre no primeiro movimento, quando há o recuo do pistão; depois, comprime-se o combustível no segundo movimento; no terceiro movimento, a expansão (combustão) cria a força útil; e no quarto movimento (volta do pistão) ocorre a descarga, liberação e expulsão dos resíduos da combustão (Hosch, 1998).

Anos depois, com a eclosão da Primeira Guerra Mundial encontrou o avião em uma fase de desenvolvimento em que as prioridades estavam voltadas para os

desafios de vencer distâncias, voar mais alto e aumentar velocidade. Naturalmente, o seu emprego no campo militar ensaiava os primeiros passos e, logo no início da guerra, o potencial do avião como arma tornou-se evidente e, a partir daí, o seu desenvolvimento teve um curso vertiginoso. Ao final do conflito, os aviões já emergiam como máquinas mais potentes e relativamente mais seguras, animando o homem a lançar-se na busca de desafios ainda maiores (Lemos, 2012).

De acordo com Lemos (2012), as travessias aéreas incentivam o surgimento da aviação de passageiros em 1919 e a expansão das rotas começa a reduzir o tempo das grandes viagens nacionais e internacionais até então realizadas somente por navios. Pouco antes disso, em 1911, o correio aéreo há havia iniciado as suas atividades, agilizando a entrega de correspondências e desbravando novas rotas para a aviação comercial.

Com o advento da Segunda Guerra Mundial, interrompe-se, segundo o mesmo autor (2012), o crescimento da aviação civil, e a indústria aeronáutica novamente se volta para a aviação militar, concentrando atenção e recursos na luta pelo domínio dos ares. A disputa pela supremacia aérea entre as nações beligerantes resulta em vultosos investimentos em pesquisa e desenvolvimento na aviação.

Ao final do conflito, a produção de aeronaves em grande escala facilita a recuperação da aviação civil, beneficiando a indústria aeronáutica, que sofre um grande salto tecnológico, com destaque para a evolução da propulsão a jato. Todavia, o elevado consumo de combustível e a manutenção frequente dos motores a jato – requisitos econômicos vitais na balança da aviação comercial –, ainda não atendiam aos mínimos exigidos por muitas empresas aéreas (Lemos, 2012).

Segundo Homa (2015), o motor turbojato tem seu funcionamento a partir da entrada do ar pelo duto de admissão (parte frontal) que, por sua vez, o envia para o compressor que o comprime para ser misturado ao combustível e queimado. Após a queima, o ar passa por uma seção de turbinas que converte a energia cinética dos gases em energia mecânica, acionando o conjunto compressor-caixa de acessórios, formando um ciclo. Esses motores foram substituídos na aviação

comercial pelos turbofans, que são mais silenciosos e mais econômicos, além de gerar maiores trações em baixas velocidades, tendo o turbojato sido mantido apenas na aviação militar.

A partir da década de 1980, com a introdução dos motores turbofan mais tecnológicos, econômicos e eficientes, a aviação comercial ampliou a sua consolidação como meio eficiente de transporte de pessoas e cargas. O motor turbofan tem seu princípio de funcionamento baseado também na terceira lei de Newton, assim como o seu antecessor, o turbojato. O motor é composto de um fan que complementa o fluxo de ar gerado pelos compressores de alta e baixa pressão, câmara de combustão, turbina e bocal de escapamento, conhecido também como exaustor. O ar admitido pelo motor passa por todos estes processos até sair sob alta pressão pelo exaustor, gerando, assim, o empuxo necessário para decolar a aeronave. Por ter o mesmo funcionamento em ambos os motores, o turbofan é mais econômico e viável economicamente falando, e seu índice de poluição é bem menor com relação ao turbojato (Ubiratan, 2014).

Cabe destacar que todos os motores a reação são movidos a querosene, também conhecido como JET-A1 ou QAV, derivado de petróleo e subtraído via destilação. Suas características químicas e físicas fazem com que o líquido permaneça homogêneo e resistente a altas temperaturas (Homa, 2015).

Segundo Garay (2022, s.d.), a queima desse combustível fóssil libera os chamados gases do efeito estufa (GEE)³, responsáveis pelos danos à camada de

³ A emissão de GEE na atmosfera pelas aeronaves em elevadas altitudes são representadas, segundo Robles (2023) pelos rastros brancos que permanecem no céu na passagem de um avião. Esses rastros deixados pelas aeronaves são chamados de trilhas de condensação, caracterizada por uma nuvem formada pela condensação dos gases que saem dos motores das aeronaves em grandes altitudes (acima de 8.000 metros). Nesse sentido, quando esses gases entram em contato com o ar extremamente frio do ambiente circundante (abaixo de cerca de -40 °C), o vapor d'água no ar se resfria rapidamente e se condensa, formando pequenas gotas de água. Entretanto, embora sejam constituídos majoritariamente por cristais de gelo, os rastros também podem conter outros componentes provenientes da exaustão das aeronaves, como fuligem e dióxido de enxofre. Vários estudos afirmam que os rastros de nuvens contribuem com o aquecimento do planeta ao capturarem calor, somando-se ao dióxido de carbono (CO₂) lançado em grandes quantidades pelo escapamento dos aviões. Em 2019, um estudo publicado na revista *Atmospheric Chemistry and Physics*, e desenvolvido pelo Instituto de Física Atmosférica do Centro Aeroespacial Alemão (DLR), alertou que o impacto climático dos rastros de aviões poderá triplicar até 2050 e se caso permanecerem por longo tempo no céu, "prenderão" o calor dentro da atmosfera da Terra (Robles, 2023).

ozônio, sabendo-se que as emissões dos aviões se dão principalmente pela liberação do dióxido de carbono (CO₂), dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e pelas esteiras de condensação, que liberam, notadamente, o dióxido de carbono (CO₂), os hidrocarburetos gasosos e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Ritchie (2020) traduz essa realidade em números: estima-se que a aviação seja responsável por emitir cerca de 2,5% de todo o CO₂ presente na atmosfera.

Estudo produzido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (mundialmente conhecido como MIT) afirma que “as emissões da aviação civil comercial contribuem de forma cada vez mais significativa para as mudanças climáticas antropogênicas”, e acrescenta que “as emissões de dióxido de carbono (CO₂) atribuíveis à aviação aumentaram em média 2,6% por ano nos últimos 25 anos (de acordo com dados de 2017 da Agência Internacional de Energia)” estimando-se que “a aviação comercial já responda por cerca de 5% da sobrecarga global do clima” (Garay, 2022, s.p.).

Quanto à aviação particular, dados levantados pelo grupo europeu de defesa ambiental Transporte e Meio Ambiente, “a emissão média de gases do efeito estufa por passageiro em aviões particulares é 5 a 14 vezes maior que a média por passageiro em aviões de carreira”. A liberação de gases estufa, a partir da queima do combustível, é cerca de duas toneladas (Poder 360, 2022).

Todo esse cenário revela uma participação considerável da aviação para as mudanças climáticas, especialmente as relacionadas ao aquecimento global. Logo, o grande desafio que a indústria aeronáutica tem enfrentado é o desenvolvimento de novas tecnologias e novos combustíveis capazes de descarbonizar o setor (Ritchie, 2020).

3 O HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL

O interesse pelo hidrogênio despontou no início na década de 90, quando a poluição atmosférica e as mudanças climáticas tornaram-se evidentes e preocupantes (Benemann, 1996). O hidrogênio é considerado o combustível dos “sonhos”, por proporcionar benefícios sociais, econômicos e ambientais à medida

que possibilita a eliminação da dependência do petróleo e, de efeito, o fim das emissões de carbono no setor dos transportes. Assim, o hidrogênio contribuiria para a redução dos impactos ambientais causados pela queima de combustíveis (Kotay; Das, 2008).

O hidrogênio é o átomo mais simples que existe, formado por apenas um próton e um elétron. É encontrado, frequentemente, na forma gasosa compondo o gás H₂, o qual é incolor e inodoro (Gomes Neto, 2005). Segundo Wang, Wan e Wang (2009), é um gás muito leve quando comparado aos combustíveis comumente usados e, assim, se configura como vantajoso para o uso em jatos e foguetes, já que estes precisam de um combustível leve.

Por essas razões, tem sido considerado como a energia limpa do futuro, pois a sua combustão resulta somente em vapor e água, sem qualquer emissão de monóxido e do dióxido de carbono, gases emitidos pela queima do petróleo e, como já dito, uns dos responsáveis pelo efeito estufa. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias com o seu uso em larga escala solucionaria o problema da emissão de CO₂ a médio e longo prazos, característica que o coloca na frente das demais fontes de energia (Dewan, 2021).

A produção do hidrogênio pode ser adquirida por três processos. O primeiro, é o de reforma a vapor, que envolve uma reação do gás natural (CH₄) com vapor de água a altas temperaturas, usando uma superfície de platina como catalisador. Ou seja, utiliza altas temperaturas para separar os átomos de hidrogênios presentes no metano (CH₄), tendo como subproduto o CO (monóxido de carbono) e o CO₂ (dióxido de carbono) (De Sá; Camarotan; Ferreira-Leitão, 2014).

A produção de hidrogênio pela reforma do gás natural tem um rendimento de 75% e 120 L min⁻¹ (Santos; Santos, 2005), porém, trata-se de um processo em que há a dependência de uma fonte não renovável de energia e em que ocorre a produção do CO₂, o maior causador do efeito estufa e, conseqüentemente, do aquecimento global. Dewan (2021) denomina o hidrogênio extraído mediante esse processo de hidrogênio cinza.

A oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados, sua segunda forma de obtenção, é muito usada. Nesse processo, o combustível reage com uma

quantidade limitada de oxigênio e parte dele sofre total combustão, liberando uma grande quantidade de energia capaz de elevar a temperatura para 1300-1500 °C; após todo o consumo do oxigênio, a energia liberada pela primeira reação é usada para a segunda etapa de reações para que o hidrocarboneto que não foi consumido reaja com os produtos da primeira etapa (H_2 , O e CO_2) (De Sá; Camarotan; Ferreira-Leitão, 2014). Segundo Dewan (2021), essa forma de extração dá origem ao hidrogênio azul.

A eletrólise da água, terceira forma de obtenção do elemento, consiste na quebra da molécula de H_2O em H_2 e O_2 com a passagem de eletricidade, apresentando um rendimento de 95% (Santos; Santos, 2005). A passagem de uma corrente elétrica contínua na água quebra as ligações covalentes entre os átomos de hidrogênio e oxigênio formando íons H^+ e OH^- (hidroxila). O H^+ é descarregado no cátodo (pólo negativo), formando H_2 por uma reação de redução, enquanto o OH^- é descarregado no ânodo (pólo positivo) por uma reação de oxidação produzindo O_2 . Assim, o H_2 se concentra no cátodo e o O_2 produzido se concentra no ânodo. Dewan (2021) intitula o hidrogênio obtido sob essa modalidade de hidrogênio verde, sendo este o utilizado na aviação para gerar energia.

O processo de produção de hidrogênio pela eletrólise da água é um processo simples e rápido, mas apresenta custo relativamente alto quando comparado a outras metodologias de produção de H_2 , já que necessita de grande quantidade de energia para ocorrer (Botton, 2007).

Viri e Teixeira Jr. (2021), no mesmo sentido, ponderam que esse processo ainda custa caro, uma vez que sua extração provém de fontes inteiramente renováveis. Assim, muito embora seja o elemento mais abundante da Terra, o gás não está disponível em sua forma pura, apresentando-se sempre associado a outros elementos, como oxigênio, nitrogênio e carbono. Desse modo, seus custos de obtenção podem variar de acordo com o custo da energia renovável de cada região.

Para que o hidrogênio possa ser utilizado como fonte energética, ele deve ser separado desses elementos e usado na sua forma molecular, H_2 (hidrogênio

gasoso), ou seja, ele demanda um processo de manufatura do mesmo modo que ocorre com a produção da gasolina, originada a partir do petróleo (De Sá; Camarotan; Ferreira-Leitão, 2014).

Entretanto, apesar de ainda dispendioso, trata-se, como visto, de uma fonte de energia limpa, com zero emissão de poluentes, renovável e inesgotável, razão pela qual a aviação tem investido fortemente em tecnologias voltadas para seu uso. Sobre esses projetos, passa-se a discorrer.

4 OS AVANÇOS E PROJETOS COM O HIDROGÊNIO NAS AERONAVES

Alguns importantes avanços podem ser destacados na corrida pela implementação do hidrogênio como combustível na aviação.

Na expectativa de tornar a aviação global mais sustentável, a ZeroAvia, *startup* britânica que desenvolve soluções em motores limpos, realizou um ato histórico na aviação mundial. Com um Dornier 228, da fabricante Dornier GmbH, abastecido com hidrogênio, realizou, em 19 de janeiro de 2023, um voo de teste de 10 minutos em completa segurança. Para tanto, a empresa modificou um dos dois motores do Dornier, substituindo o esquerdo por um de propulsão elétrica, com bateria e célula de combustível recheada de hidrogênio, e mantendo o motor direito, um turboélice convencional abastecido com querosene. Com financiamento misto entre capital privado e o governo britânico, o projeto, denominado HyFlyer II, tem nessa primeira fase o desenvolvimento de motores a hidrogênio que consigam sustentar uma aeronave de até 19 passageiros, como é o caso do Dornier 228 (ZeroAvia, 2023).

Com essa configuração de teste, o *powertrain* hidrogênio-elétrico abriga duas pilhas de células a combustível⁴, com as baterias de íon-lítio fornecendo suporte de pico de potência durante a decolagem e adicionando redundância adicional para testes seguros. Tanques de hidrogênio e sistemas de geração de energia com células de combustível foram alojados dentro da cabine, o que demandou a remoção dos assentos para esse exercício (ZeroAvia, 2023).

⁴ Conceito detalhado adiante.

Outra empresa que saiu na frente para explorar a aviação sustentável é a também *start up* Universal Hydrogen, que realizou um voo de teste bem-sucedido, em 2 de março de 2023, de um avião movido a célula de hidrogênio, sendo, até o momento, a maior aeronave de passageiros a usar o combustível limpo em seu sistema de propulsão. O Lightning McClean, um avião regional para 40 passageiros da fabricante Bombardier, decolou do Aeroporto Internacional de Grant County (KMWH) e voou por 15 minutos, atingindo uma altitude de 3.500 pés acima do nível do mar. Durante o voo de teste, um dos motores de turbina do avião foi substituído pelo trem de força elétrico da classe megawatt da Universal Hydrogen, enquanto o outro motor – convencional – foi mantido, para garantir a segurança de voo (Gundry, 2023).

A aeronave se comportou perfeitamente, e o ruído e as vibrações do trem de força com célula de combustível foram significativamente mais baixos do que os do motor de turbina convencional. O propulsor de movimento da Universal Hydrogen é construído a partir de células de combustível especialmente modificadas para uso na aviação. O sistema dispensa bateria, pois as células de combustível acionam o motor elétrico diretamente, o que reduz o peso e o custo de implantação da tecnologia. Nesse sentido, o hidrogênio é armazenado em um tanque a bordo da aeronave, que pode ser reabastecido com hidrogênio líquido ou gasoso, dependendo do sistema de armazenamento escolhido (Gundry, 2023).

Em 2021, a Alaska Airlines firmou uma parceria, investindo na ZeroAvia para apoiar o desenvolvimento de tecnologia de propulsão com emissões zero para aeronaves regionais. Na posição de quinta maior companhia aérea dos EUA, dotada de uma grande rede regional, a companhia tem uma oportunidade única de apoiar o desenvolvimento de tecnologia de propulsão com emissões zero para aeronaves regionais. Dessa forma, ao estabelecer a viabilidade de aeronaves de tamanho regional, ambas as empresas ajudarão a promover a tecnologia de emissões zero em toda a indústria (ZeroAvia, 2023).

Assim, em 2023, a Alaska Airlines apresentou à ZeroAvia o turboélice regional Bombardier Dash 8-Q400, de 76 lugares, que será adaptado com um sistema de propulsão elétrico a hidrogênio em um esforço para expandir o alcance

e a aplicabilidade da tecnologia de voo com emissões zero. O motor elétrico a hidrogênio da ZeroAvia usa células de combustível para gerar eletricidade a partir do combustível de hidrogênio, antes de usar essa eletricidade para alimentar os motores elétricos que giram as hélices da aeronave. O sistema ZA2000 certificável incluirá células de combustível PEM de alta temperatura da ZeroAvia e armazenamento de combustível de hidrogênio líquido, essencial para fornecer a densidade de energia necessária para operações comerciais de grandes turbohélices regionais (ZeroAvia, 2023).

A Figura 1 exibe os modelos dessas três aeronaves, que já fazem o uso do hidrogênio em voos de teste.

Figura 1 – Aeronaves (em voos de teste) que utilizam hidrogênio como combustível



Fontes: ZeroAvia, 2023; Universal Hydrogen, 2023; ZeroAvia, 2023.

A Airbus, por sua vez, vê o hidrogênio como uma das tecnologias de descarbonização mais promissoras para a aviação e importante para o alcance da ambição de trazer ao mercado uma aeronave comercial de baixo carbono até 2035. A fabricante o entende como uma tecnologia de elevado potencial com uma massa específica de energia por unidade três vezes superior à do combustível de aviação tradicional. Gerado a partir de energia renovável por meio de eletrólise, como já explanado, o hidrogênio permite que a energia renovável alimente as aeronaves de grande porte em longas distâncias, mas sem o subproduto indesejável das emissões de CO₂ (Airbus, 2020).

Como o hidrogênio tem uma densidade de energia volumétrica mais baixa, a aparência visual das futuras aeronaves provavelmente mudará, para melhor acomodar as soluções de armazenamento do elemento químico, que serão mais volumosas que os tanques de armazenamento de combustível de aviação atualmente existentes (Airbus, 2020).

A empresa francesa está, assim, atingindo uma série de marcos tecnológicos e de testes à medida que avança em direção à sua ambição de lançar no mercado, até 2035, uma aeronave comercial movida a hidrogênio. Muitos desses marcos giram em torno do estabelecimento de meios de propulsão, seja por meio de células de combustível híbridas de hidrogênio-elétricas, seja por combustão direta de hidrogênio (Airbus, 2023a).

Nesse sentido, o projeto da Airbus denominado ZEROe deve explorar essa variedade de configurações e tecnologias, bem como preparar o ecossistema que irá produzir e fornecer o hidrogênio. No caso da combustão, as turbinas a gás com injetores de combustível e sistemas de combustível modificados são alimentadas com hidrogênio de uma forma semelhante à forma como as aeronaves são alimentadas hoje. Já no método com uso de células a combustível⁵ de hidrogênio, estas geram energia elétrica que, por sua vez, alimenta motores elétricos, girando a hélice. Este é um sistema de propulsão totalmente elétrico, bastante diferente do sistema de propulsão das aeronaves atualmente em serviço (AIRBUS, 2023a).

Originalmente inventadas por Sir William Grove em 1838, as células de combustíveis geram eletricidade de forma muito eficiente através de uma reação eletroquímica, e não através de combustão. Eles também diferem das baterias porque requerem uma fonte contínua de combustível e oxigênio (geralmente do ar), enquanto em uma bateria a energia química vem de substâncias já presentes em seu interior. As células de combustível podem, portanto, produzir eletricidade

⁵ Células a combustível, ou células de hidrogênio, são equipamentos que produzem energia elétrica e vapor de água, combinando o oxigênio do ar com o hidrogênio armazenado. A geração de energia não emite gás carbônico (CO₂) na atmosfera, tornando esse processo limpo. A principal vantagem das células a combustível está na capacidade de armazenar o hidrogênio e funcionam como uma espécie de “bateria” recarregável, onde ocorre o reabastecimento de hidrogênio para manter a reação eletroquímica que produz eletricidade (Azevedo, 2023).

continuamente, enquanto houver fornecimento de combustível e oxigênio (Airbus, 2022c).

A tecnologia mais promissora para aplicações móveis é chamada Proton Exchange Membrane (PEM). Neste tipo de célula, o hidrogênio é utilizado como “combustível” para gerar eletricidade diretamente e seus únicos subprodutos são calor e água. Ter esta tecnologia a bordo de uma aeronave é particularmente atraente, uma vez que não há geração de CO₂, NO_x e, potencialmente, não forma rastros ou eles são muito limitados. Para aproveitar esta vantagem em toda a sua extensão, é preciso uma aeronave movida a eletricidade e, portanto, de capacidade de célula de combustível suficiente a bordo para gerar energia suficiente a um nível de peso aceitável (Airbus, 2022c).

Como uma única célula de combustível tem apenas alguns milímetros de espessura e é aproximadamente do tamanho de um envelope de carta, ela não libera muita energia. Portanto, para obter níveis de potência suficientes para uso em uma aeronave, centenas dessas células precisam ser conectadas eletricamente em série para formar uma “pilha”. Posteriormente, várias dessas pilhas são combinadas em múltiplos “canais” de células a combustível. Com esta abordagem modular, os níveis de potência em megawatts – necessários para uma aeronave elétrica – são alcançáveis (Airbus, 2022c).

Cabe pontuar, de acordo com a Airbus (2022b), que, embora as células de combustível já sejam utilizadas em alguns automóveis, elas não atendem aos rigorosos requisitos necessários para uso aeronáutico. Desse modo, fazia sentido para a empresa procurar na indústria automóvel um potencial parceiro e fornecedor, com quem pudesse levar as células de combustível para o próximo nível – para produzir pilhas de células de combustível especialmente adaptadas e industrializá-las para a indústria da aviação.

Nesse sentido, a Airbus estabeleceu uma *joint venture* entre a Airbus Aerostack e o fornecedor automotivo ElringKlinger AG, para desenvolver pilhas de células de combustível de hidrogênio no centro de um sistema de propulsão elétrica (Airbus, 2023a).

A Airbus também se uniu com a Safran e o ArianeGroup num projeto de investigação conjunto denominado HyPERION⁶, com o apoio do Programa de Investimentos para o Futuro (PIA) do governo francês. O objetivo do HyPERION é explorar soluções técnicas seguras e eficientes de propulsão de hidrogênio que pudessem oferecer uma alternativa ao combustível fóssil para a aviação comercial até 2035 (Airbus, 2023c).

De acordo com a Airbus (2023c), o HyPERION permitiu avanços significativos na definição de sistemas de propulsão a hidrogênio para aeronaves comerciais, conferindo um elevado grau de segurança, e na identificação das diversas tecnologias que ainda necessitam ser desenvolvidas. O estudo abrangeu todo o processo desde a saída do combustível dos tanques até a ejeção dos gases inflamados. A definição do circuito de distribuição baseou-se fortemente na experiência do ArianeGroup, no comportamento do combustível nos lançadores Ariane.⁷

Logo, o ArianeGroup concluiu com sucesso uma prova de conceito de um “sistema de condicionamento” de hidrogênio, adaptado para alimentar um motor de turbina de aeronave. Dado que o hidrogênio tem de ser armazenado a uma temperatura entorpecente de -253°C , ele precisa de ser “condicionado” para atingir uma temperatura e pressão aceitáveis para combustão no motor da aeronave. O projeto HyPERION foi viabilizado ainda pelo reaproveitamento de equipamentos projetados para aplicações espaciais e é um alicerce essencial do roteiro da tecnologia H₂C até 2035 (Airbus, 2023b).

Como fruto dessas parcerias, a Airbus vem desenvolvendo, no âmbito do projeto intitulado ZEROe, quatro conceitos de aeronaves com emissão zero, movidos a células de hidrogênio (ou células a combustível). O primeiro trata-se de uma aeronave turbofan com alcance de mais de 2.000NM e capacidade para cerca de 200 passageiros. A aeronave teria dois motores turbofan de hidrogênio híbrido para fornecer impulso e sistema de armazenamento e distribuição do hidrogênio localizado atrás da antepara de pressão traseira.

⁶ O nome do projeto é a sigla francesa para ‘hidrogênio para propulsão de aviação ambientalmente responsável’.

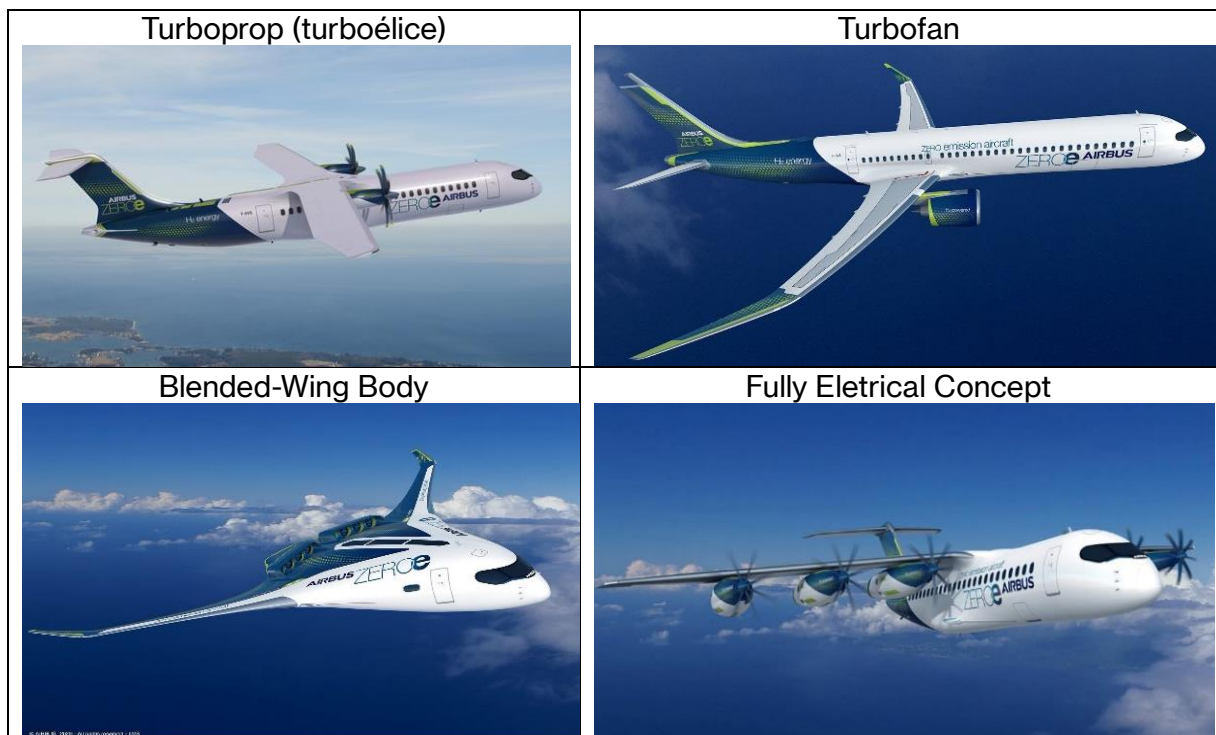
⁷ Lançadores de satélites do Ariane Group.

Outra aeronave é a turboélice, com alcance de mais de 1.000NM e capacidade para cerca de 100 passageiros. Ela possuiria dois motores turboélice de hidrogênio híbrido, que acionam hélices de oito pás, que fornecem impulso; seu sistema de armazenamento e distribuição de hidrogênio líquido está localizado atrás da antepara de pressão traseira (AIRBUS, 2023a).

A terceira aeronave é descrita pela Airbus (2023a) como Corpo de Asa Mista, ou Blended-Wing Body (BWB), com alcance de mais de 2.000NM e capacidade para cerca de 200 passageiros e dois motores turbofan de hidrogênio híbrido. Seu interior, excepcionalmente amplo, é projetado para múltiplas opções para armazenamento e distribuição de hidrogênio, com os tanques de armazenamento de hidrogênio líquido localizados embaixo das asas.

Por fim, a última, de conceito totalmente elétrico, tem alcance de 1.000NM e capacidade para cerca de 100 passageiros. Essa aeronave é baseada em um sistema de propulsão totalmente elétrico movido por células de combustível de hidrogênio. A Figura 2 ilustra os quatro modelos.

Figura 2 – Projetos das Aeronaves Airbus ZEROe



Fonte: Airbus, 2023a.

Enquanto as quatro aeronaves concebidas no projeto ZEROe são desenvolvidas, a Airbus já vem testando as tecnologias de combustão de hidrogênio e de propulsão por células de combustível em seus Centros de Desenvolvimento localizados na França, no Reino Unido, a Alemanha e em Espanha para trabalhar em tanques, motores e sistemas de combustível criogénico (Airbus, 2023a).

O primeiro teste ocorreu no centro E-Aircraft Systems, perto de Munique, a maior instalação desse tipo da Europa. Ao longo de seis meses de testes em solo, as equipes de especialistas uniram forças para alcançar o marco emocionante de operar a célula de combustível com potência máxima: 1,2 megawatts (MW). Este é o teste de célula de combustível mais poderoso já realizado na aviação até hoje, e uma excelente plataforma para aprender. Desse modo, a Airbus é a única na indústria da aviação a alcançar essa “cadeia” de energia, acoplando 12 células de combustível para atingir a produção necessária para uso comercial (Airbus, 2023b).

O teste de 1,2 MW em solo foi realizado usando vários canais de potência acoplados em uma única hélice, ajudando a Airbus a aplicar os aprendizados no projeto e, em última análise, na fabricação de aeronaves. Talvez ainda mais significativo, o teste ajuda a Airbus a desenvolver ainda mais o seu próprio conhecimento sobre células de combustível, em apoio às metas de certificação para futuras aeronaves movidas a hidrogênio (Airbus, 2023b).

O teste em voo está previsto para ocorrer entre 2027-2028 na aeronave A380 MSN1 da Airbus⁸, que está assumindo a liderança no teste dessas tecnologias que serão vitais para trazer ao mercado uma aeronave comercial movida a hidrogênio (Airbus, 2023a).

De acordo com a Airbus (2022a), o A 380 será modificado externamente para receber o motor de célula de combustível, e dentro da fuselagem traseira da aeronave a empresa instalará um tanque criogénico exclusivo para conter o hidrogênio liquefeito. Para este demonstrador de prova de conceito, o hidrogênio líquido do tanque criogénico é convertido em estado gasoso e distribuído para a

⁸ Aeronave comercial com capacidade para 500 passageiros.

célula de combustível através de linhas de abastecimento que partem do tanque e através de uma estrutura de suporte aerodinâmica e de suporte de carga externa até a interface do pilar do motor. O A380 foi a escolha óbvia como “hospedeiro” para o demonstrador do motor de célula de combustível a hidrogênio. “Ele tem muito espaço interno – portanto, não há restrições em termos de acomodar tudo o que precisamos, bem como a capacidade de testar múltiplas configurações”, afirma Mathias Andriamisaina, Chefe de Demonstradores e Testes ZEROe da Airbus.

Embora a maior parte do equipamento seja instalada fora da aeronave, um compartimento especial no interior da aeronave pode alojar até quatro tanques criogênicos com hidrogênio líquido. Durante os testes de voo, o ar real dentro do compartimento terá a mesma pressão que fora da aeronave. Ou seja, o equipamento instalado no interior desta tenda apenas “verá” o ambiente atmosférico despressurizado. Isto inclui as linhas de abastecimento de hidrogênio do tanque, que é encaminhado diretamente da tenda para o stub e depois para a cápsula montada externamente (Airbus, 2022a).

Observa-se que o motor de combustão a hidrogênio é uma parte fundamental do programa de demonstração ZEROe. Nesse sentido, os fabricantes de motores têm trabalhado lado a lado com a Airbus em programas de demonstração há décadas, o que se repetirá com o programa ZEROe não será exceção. A CFM International, uma *joint venture* firmada entre a GE e a Safran, deverá desenvolver o motor de combustão a hidrogênio e prepará-lo para testes. Especificamente, a empresa modificará o combustor, o sistema de combustível e o sistema de controle de um turbofan GE Passport™ para funcionar com hidrogênio. O motor foi selecionado devido ao seu tamanho físico, turbo maquinário avançado e capacidade de fluxo de combustível (Airbus, 2022b).

De acordo com a Airbus (2022b), o hidrogênio, frisa-se, deve ser mantido muito frio e armazenado a -253°C , permanecendo nessa temperatura de forma consistente durante todo o voo, mesmo quando os tanques estiverem esgotados. Os tanques de armazenamento para uma aeronave movida a hidrogênio são,

portanto, componentes absolutamente essenciais e completamente diferentes dos encontrados em aeronave tradicional.

Este tanque não é apenas inovador tecnicamente: ele também representa um afastamento dos processos tradicionais de produção. Abraçando uma metodologia de trabalho dinâmica e ágil, as equipes adotaram uma abordagem de codesenvolvimento em que, para progredirem rapidamente, aceitaram a necessidade de inovar, testar, falhar rapidamente e adaptar-se. Em síntese, as equipes vão direto para a fabricação de um protótipo que testam e aprendem antes de desenvolver um protótipo melhorado, em vez de dispendir muito tempo trabalhando em planos teóricos (Airbus, 2022b).

Logo, de acordo com a Airbus (2022b), o próximo passo é olhar para o protótipo com um olhar crítico e perguntar o que se pode fazer de melhor. A partir de todos os *insights* e os dados de teste coletados, parte-se para o projeto de um segundo protótipo, a ser preenchido com hidrogênio. Nessa fase, a empresa pretende maximizar o espaço, melhorar o desempenho e simplificar o processo de fabricação, com as obras do segundo tanque já em andamento, e levarão cerca de mais um ano para serem construídos e testados. Dessa forma, o objetivo final é ter um tanque pronto para ser instalado no demonstrador do A380 até 2026-2028, a fim de conseguir colocar o programa ZEROe nos ares.

A partir do aqui considerado, é esperado que esse combustível seja uma alternativa para diversas indústrias, e na aviação isso não deve ser exceção, pois estima-se que o hidrogênio tenha potencial para reduzir as emissões de CO₂ da aviação em até 50%. Desse modo, a Airbus colabora com uma variedade de intervenientes da indústria, incluindo fornecedores de energia e aeroportos, para garantir que o uso do hidrogênio impacte a empresa na adoção de medidas significativas no sentido da descarbonização da aviação (AIRBUS, 2020).

Contudo, a Airbus (2023a) alerta que a corrida pela aviação comercial movida a hidrogênio começa no solo, uma vez que esse combustível deve ser produzido, transportado e armazenado na quantidade certa e no momento, local e custo certos. A sua produção e utilização devem ser, ainda, regulamentadas e certificadas. A empresa, assim, acredita que a implantação de infraestruturas de

hidrogênio nos aeroportos é um pré-requisito para apoiar a expansão generalizada e a adoção de aeronaves que utilizarão esse combustível, estabelecendo, dessa forma, parcerias entre produtores e distribuidores de hidrogênio em todo o mundo e entre aeroportos e companhias aéreas, com vistas a construir o ecossistema certo para operar uma aeronave movida a hidrogênio até 2035.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou evidenciar, inicialmente, como os motores aeronáuticos, mesmo que em constante evolução, ainda influenciam nas mudanças climáticas, liberando parcela considerável de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera e produzindo, desse modo, um impacto ambiental indesejável.

Foi possível observar que a aviação mundial atual ainda é dependente dos combustíveis fósseis, que produzem relevantes danos ambientais e, por serem finitos, criariam um hiato no qual o futuro da aviação estaria ameaçado. Dessa forma, a busca por soluções pressiona todos os setores envolvidos a encontrarem uma alternativa que confirme a potencialidade de uso de um combustível limpo e compatível com os objetivos de desenvolvimento sustentável da sociedade humana como um todo.

A partir desse cenário, o estudo destacou o emprego do hidrogênio como essa alternativa ao uso de combustíveis fósseis na aviação, relatando suas características físico-químicas e especificações técnicas, e apresentou diversos projetos em desenvolvimento e em testes conduzidos pelas *startups* ZeroAvia e Universal Hydrogen, em parceria com construtoras como Dornier GmbH, Bombardier e Airbus.

Essas desenvolvedoras de aeronaves parecem estar empenhadas na busca de uma aviação sustentável longe das emissões de CO₂ e em desenvolver, para tanto, aeronaves sustentáveis com o uso do hidrogênio de emissão zero já para a próxima década, a exemplo do projeto ZEROe da Airbus, que prevê, até 2035, o lançamento de uma aeronave totalmente concebida para operar com o

combustível. Antes disso, o A380 da fabricante dará início aos voos de testes, previstos para 2027-2028.

Por outro lado, os empecilhos dessa implementação em grande escala residem, especialmente, na complexidade e nos custos do processo de separação do elemento químico de outros a que ele está associado na natureza, o que torna sua obtenção cara, e na necessidade de desenvolvimento de fuselagens compatíveis com essa modalidade de combustível, além do desafio da confiabilidade, segurança, eficiência e economia, sem os quais a aviação não se sustenta.

Seu armazenamento em aeronaves também é um desafio devido à sua baixa densidade volumétrica e seus métodos de armazenamento, que incluem tanques de alta pressão, tanques criogênicos e materiais de adsorção. Além disso, a distribuição e o abastecimento de hidrogênio nos aeroportos também exigiriam uma infraestrutura significativa. Assim, a transição do uso dos combustíveis fósseis para o hidrogênio na aviação dependerá do progresso contínuo em tecnologias, infraestrutura e aceitação do mercado.

Conclui-se, portanto, que o processo para a implementação do hidrogênio como combustível para a aviação exige contínuos estudos e investimentos substanciais, na expectativa de respostas eficientes que tragam certezas para um futuro desejável, sabendo-se que o emprego de fontes de energia limpa propiciam não somente benefícios ao setor aéreo, como também a toda a população do planeta, que depende de um ambiente saudável e equilibrado para sua sobrevivência e para a manutenção das futuras gerações.

REFERÊNCIAS

AIRBUS. **ZEROe**: Towards the world's first zero-emission commercial aircraft. 2020. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen>. Acesso em: 1 out. 2023.

AIRBUS. **The ZEROe demonstrator has arrived**. 2022[a]. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>. Acesso em: 1 nov. 2023.

AIRBUS. **The cold heart that powers our ZEROe aircraft.** 2022[b] Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-11-the-cold-heart-that-powers-our-zeroe-aircraft>. Acesso em: 1 out. 2023.

AIRBUS. **Could hydrogen fuel-cell systems be the solution for emission-free aviation?** 2022[c]. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-11-could-hydrogen-fuel-cell-systems-be-the-solution-for-emission-free>. Acesso em: 2 nov. 2023.

AIRBUS. ZEROe. **Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft.** 2023[a] Disponível em: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>. Acesso em: 22 out. 2023.

AIRBUS. At **Airbus, hydrogen power gathers pace.** 2023[b]. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-06-at-airbus-hydrogen-power-gathers-pace>. Acesso em: 12 nov. 2023.

AIRBUS. **Successful HyPERION pilot project paves the way for civil aviation hydrogen propulsion.** 2023[c]. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-06-successful-hyperion-pilot-project-paves-the-way-for-civil-aviation>. Acesso em: 10 nov. 2023.

AZEVEDO, J.. **O que é hidrogênio verde e qual sua importância?** s.d. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-verde/>. Acesso em: 16 out. 2023.

BENEMANN JR. **Hydrogen biotechnology: progress and prospects.** Nat. Biotechnol., v. 14, p. 1101-1103, 1996. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nbt0996-1101>. Acesso em: 11 out. 2023.

BOTTON, J. P. **Líquidos iônicos como eletrólitos para reações eletroquímicas.** Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10033>. Acesso em: 7 out. 2023.

DEWAN. A. **Hidrogênio verde pode ser o combustível do futuro.** Mas ainda não deve resolver todos os problemas. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/o-hidrogenio-verde-pode-ser-o-combustivel-do-futuro-mas-ainda-nao-deve-resolver-todos-os-problemas/>. Acesso em: 4 out. 2023.

GARAY, C. C. **Como as emissões de gases de efeito estufa dos aviões afetam a qualidade do ar?** National Geographic, 2022. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/10/como-as-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-dos-avioes-afetam-a-qualidade-do-ar>. Acesso em: 10 out. 2023.

GOMES NETO, E. H. **Hidrogênio, evoluir sem poluir**: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. BrasilH2 Fuel Cell Energy, 2005. Disponível em: <https://www.disal.com.br/produto/1927329-Hidrogenio-Evoluir-Sem-Poluir-AEra>. Acesso em: 20 out. 2023.

GUNDRY, K.. **Universal Hydrogen Successfully Completes First Flight of Hydrogen Regional Airliner**. 2023. Disponível em: <https://www.businesswire.com/news/home/20230302005768/en/Universal-Hydrogen-Successfully-Completes-First-Flight-of-Hydrogen-Regional-Airliner>. Acesso em: 10 set. 2023.

HOMA, J. **Aeronaves e Motores**: conhecimentos técnicos. 35. ed. São Paulo-SP: ASA, 2015. 188 p. Disponível em: <https://www.abul.org.br/biblioteca/62.pdf>. Acesso em: 4 out. 2023.

HOSCH, WILLIAM L. **Nikolaus Otto, German engineer**. 1998. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Nikolaus-Otto>. Acesso em: 4 out. 2023.

KOTAY, S. M.; DAS, D. Biohydrogen as a renewable energy resource: prospects and potentials. Int. **J. Hydrogen Energy**, v. 33, p. 258-263, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222619463_Biohydrogen_as_a_renewable_energy_resource-Prospects_and_potentials. Acesso em: 10 out. 2023.

LEMOS, V.. **História da aviação**. 2012. Disponível em: <https://repositorio-api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/a6a5b374-6c83-45a7-a171-0ad6f76165f3/content>. Acesso em: 14 out. 2023.

PODER360. **Mais de 400 jatinhos levam ativistas pró-clima para COP27**. 2022. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/meio-ambiente/mais-de-400-jatinhos-levam-ativistas-pro-clima-para-cop27/#:~:text=A%20emiss%C3%A3o%20m%C3%A9dia%20de%20gases,%C3%A9%20cerca%20de%20duas%20toneladas>. Acesso em:

RITCHIE, H. **Climate change and flying**: what share of global CO2 emissions come from aviation?. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>. Acesso em: 29 out. 2023.

ROBLES, T.. **Rastros de aviões: fenômeno considerado prejudicial ao clima pode ser evitado com ajuda da inteligência artificial**, 2023. Disponível em: <https://www.tempo.com/noticias/actualidade/rastros-de-avioes-fenomeno-considerado-prejudicial-ao-clima-pode-ser-evitado-com-ajuda-da-inteligencia-artificial.html>. Acesso em: 15 out. 2023.

SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. O combustível “hidrogênio”. **Rev. Educ., Ciênc. Tecnol.**, n.º 31, 2005. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/260/26046651010.pdf>. Acesso em: 29 out. 2023.

UBIRATAN, E.. **Evolução a jato**. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/evolucao-jato_1498.html. Acesso em: 4 out. 2023.

VIRI, N.; JUNIOR, S. T. **O que é o hidrogênio verde** – e porque ele promete ser o combustível do futuro. 2021. Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/transicao-energetica/hidrogenio/o-que-e-o-hidrogenio-verde-e-por-que-ele-promete-ser-o-combustivel-do-futuro/>. Acesso em: 5 out. 2023.

WANG, B.; WAN, W.; WANG, J. Effect of ammonia concentration on fermentative hydrogen production by mixed cultures. **Biores. Technol.**, v. 100, p. 1211-1213, 2009. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9485808/>. Acesso em: 20 out. 2023.

ZEROAVIA. **Alaska Airlines and ZeroAvia developing world's largest zero-emission aircraft**. 2023. Disponível em: <https://zeroavia.com/alaska-airlines-zero-emission-q400/>. Acesso em: 7 out. 2023.

ZEROAVIA. **ZeroAvia Makes Aviation History, Flying World's Largest Aircraft Powered with a Hydrogen-Electric Engine**. 2023. Disponível em: <https://zeroavia.com/do228-first-flight/>. Acesso em: 15 out. 2023.

Contato: (62) 99602-2865
E-mail: fantefelipe@gmail.com



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1069 • Setor Universitário
Caixa Postal 86 • CEP 74605-010
Goiânia • Goiás • Brasil
Fone: (62) 3946.1000
www.pucgoias.edu.br • reitoria@pucgoias.edu.br

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante Felipe Fante de Oliveira
do Curso de Ciências Biomédicas, matrícula 2020.1.0047.0031-7
telefone: (62) 99602-2865 e-mail fantefelipe@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
Hidrogênio: o futuro combustível da energia sustentável
, 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, 14 de dezembro de 2023.

Assinatura do autor: Felipe Fante de Oliveira

Nome completo do autor: Felipe Fante de Oliveira

Assinatura do professor-orientador: [Assinatura]

Nome completo do professor-orientador: André Luiz S. Fernandes