

**AVANÇANDO PARA O AZUL: VIABILIDADE E IMPACTOS DOS AVIÕES
ZEROe DA AIRBUS MOVIDOS A HIDROGÊNIO****Edimar Dziwuylski¹****Wesler Fonseca Riberiro²****Flávio Leopoldo Basilio³****RESUMO**

Este estudo investiga a viabilidade dos aviões ZEROe da Airbus, que utilizarão hidrogênio, como combustível principal, contrastando-os com tecnologias de combustíveis fósseis tradicionais no que diz respeito a eficiência, custos e impactos ambientais. A pesquisa aborda os desenvolvimentos tecnológicos necessários para a adoção do hidrogênio na aviação, incluindo desafios de infraestrutura e barreiras regulatórias. Analisa-se a eficácia ambiental do hidrogênio, destacando sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes. A análise econômica aponta para uma eventual rentabilidade do hidrogênio, apesar dos altos custos

¹ Bacharel em Ciências Aeronáuticas pela Faculdade de Tecnologia de Sinop – FASTECH;
E-mail: edimar.dw@gmail.com

² Bacharel em Ciências Aeronáuticas pela Faculdade de Tecnologia de Sinop – FASTECH;
E-mail: weslerfr@outlook.com

³ Professor no curso de Ciências Aeronáuticas da Faculdade de Tecnologia de Sinop – FASTECH; filósofo pela faculdade Paulista São Jose, de São Paulo; Jornalista pela Faculdade Campo Limpo Paulista – FACCAMP, em São Paulo. Especialista em Gestão e Segurança de Voo pela Unyleya. Especialista em Neurociência aplicada ao processo de aprendizagem pela Faculdade Faveni. Especialista em Docência do Ensino Superior e Metodologias Ativas pela Faculdade Metropolitana de São Paulo. Especialista em Produção para TV Digital, pela Universidade Metodista de São Paulo. Pesquisador na área de neurociência e filosofia. Piloto Comercial de Aeronaves com habilitações de multimotor e voo por instrumento (IFR). Instrutor teórico e prático para os cursos de Piloto Privado e Piloto Comercial de Aviões, na OPS Escola de Aviação e Consultoria Aeronáutica, e AeroMT Escola de Aviação, ambas em Sinop/MT. E-mail: flaviofastech@gmail.com

iniciais, especialmente com o amadurecimento de tecnologias e o aumento da eficiência na produção e logística do combustível. Finalmente, discutem-se as perspectivas futuras para a aviação sustentável, enfatizando o papel vital dos governos e organizações internacionais na facilitação dessa transição energética. O estudo conclui que, enquanto existem desafios substanciais, os benefícios a longo prazo do hidrogênio como combustível promoverá, não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também oferecem economias para as operadoras aéreas.

Palavras-chave: Hidrogênio; Aviões ZEROe; Sustentabilidade; Aviação; Airbus.

MOVING TOWARDS THE BLUE: FEASIBILITY AND IMPACTS OF AIRBUS ZEROe HYDROGEN-POWERED AIRCRAFT

ABSTRACT

This study investigates the viability of Airbus' ZEROe aircraft, which will use hydrogen as the primary fuel, comparing them with traditional fossil fuel technologies in terms of efficiency, costs and environmental impacts. The research addresses the technological developments required for the adoption of hydrogen in aviation, including infrastructure challenges and regulatory barriers. The environmental effectiveness of hydrogen is analyzed, highlighting its ability to significantly reduce greenhouse gas emissions and other pollutants. The economic analysis points to the eventual profitability of hydrogen, despite the high initial costs, especially as technologies mature and efficiency in fuel production and logistics increases. Finally, the future prospects for sustainable aviation are discussed, emphasizing the vital role of governments and international organizations in facilitating this energy transition. The study concludes that, while substantial challenges remain, the long-term benefits of hydrogen as a fuel will not only promote environmental sustainability, but also offer economic for airline company.

Keywords: Hydrogen; ZEROe planes; Sustainability; Aviation; Airbus.

1 INTRODUÇÃO

Os meios de transportes desempenham um papel fundamental no século XXI. Facilitam a mobilidade de pessoas e mercadorias, seja via terra, mar ou ar, de maneira eficiente e rápida. Dos tradicionais veículos terrestres às inovações tecnológicas, a evolução dos meios tem transformado a forma como se vive e se interage com o mundo ao redor. Reduzir o tempo entre um ponto e outro tem determinado o sucesso de grandes empresas desde os séculos passados. (Kramer 2020; Yusaf *et al.*, 2023).

Iniciativas visam aperfeiçoar os meios de transportes deixando-os eficazes, modernos e seguros, através das tecnologias empregadas, seja em motor, seja no combustível. Pensando nisso, este trabalho visa analisar as características, viabilidade e impactos ambientais dos aviões ZEROe movidos a hidrogênio desenvolvidos pela Airbus, além de explorar o desenvolvimento visando uma aviação comercial sustentável, no que tange o combustível, e livre de emissões de carbono, até 2035, conforme prevê a fabricante Airbus. (Espindola *et al.*, 2022)

Pavan (2016), destaca que as companhias aéreas utilizam o querosene de aviação (QAV) como combustível, existindo, além dele, a gasolina azul para aviões (GAV), ambos derivados de petróleo, porém com distinção do tipo de avião que abastecerá. O QAV é utilizado em aviões maiores, como militares, comerciais, ou grandes empresas, além dos helicópteros com motores à reação, enquanto a gasolina de aviação, ou “gasolina azul” é utilizada por motores à pistão, ou seja, de ignição por centelha. Os aviões agrícolas usam, na sua maior parte, do Etanol, produzido do milho.

Pesquisadores do tema destacam o hidrogênio como uma benéfica alternativa de energia, vislumbrando, no futuro, uma “economia de hidrogênio”. Marchetti (1990 *apud* Brito; Henkes, 2023), destacam que “até a década de 2080, 90% da energia venha do hidrogênio”.

Historicamente, a aviação tem dependido quase exclusivamente do QAV,

um derivado do petróleo, destacando a urgência por alternativas energéticas renováveis. A partir disso, o hidrogênio emerge como uma solução promissora, não apenas pela sua abundância e potencial de combustão limpa, mas também pelo avanço tecnológico que tem permitido sua aplicação eficaz em motores aeronáuticos, levando esta pesquisa a analisar o estudo da viabilização do hidrogênio nos aviões ZEROe, da Airbus, com prazo de implantação até 2035 (Espindola *et al.*, 2022).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

Nos primórdios da aviação a preocupação com os poluentes era a menor ou se é que existia essa preocupação, porém com o passar dos anos, a popularização da aviação, o crescimento das companhias aéreas e de suas frotas, mais aeronaves começaram a ser produzidas, as companhias aéreas compraram mais aviões, consequentemente mais aeronaves voando tiveram como resultado mais poluentes lançados no céu, a partir disso essa preocupação começou a tomar forma. As consequências das poluições vinculado com o uso de combustíveis fósseis, entre outros fatores, incentivou e motivou a pesquisa de novas alternativas mais eficientes.

Aeronaves antigas deram espaço à modernos aviões, com materiais mais leves, econômicos, e com uma taxa menor de emissão de carbono. Favaro (2024) aponta que a média mundial de carbono emitido por aeronaves é de 123 gramas de CO₂ por quilômetro rodado, ou seja, aeronaves com eficiência no consumo de combustível podem resultar em emissões de carbono mais baixas. A autora destaca, ainda, que o setor da aviação comercial responde por cerca de 5% da sobrecarga global do clima, sendo um dos maiores causadores de gás carbônico despejado na atmosfera. Um voo, por exemplo, de São Paulo a Paris pode variar de 564 a 3108 kg de CO₂ emitidos por um único passageiro (Favaro, 2024).

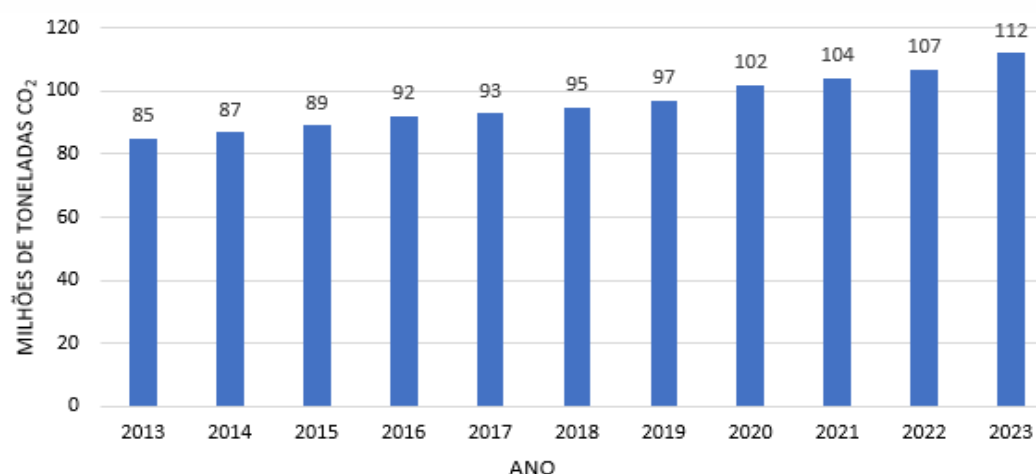
Estima-se que em alguns anos o aumento da demanda continuará, devido

ao crescimento da população mundial, e também da globalização, o que justifica a preocupação dos autores deste trabalho em abordar o tema voltado as novas tecnologias de combustíveis, notando que a população tem se mostrado mais atenciosa para com o tema e aos assuntos relacionados a preservação ambiental, o que resulta em uso de combustíveis menos agressivos. Essas medidas são claras quando se percebe as mudanças climáticas, a poluição no ar, no mar, queimadas com proporções gigantescas, além do derretimento das geleiras (Espindola *et al.*, 2022).

As emissões de CO₂, principalmente na indústria global, aumentaram mais rapidamente nas últimas décadas em comparação com as dos setores rodoviário, ferroviário e marítimo. A aviação responde por 2% a 3% das emissões globais de dióxido de carbono (Pultarova, 2024).

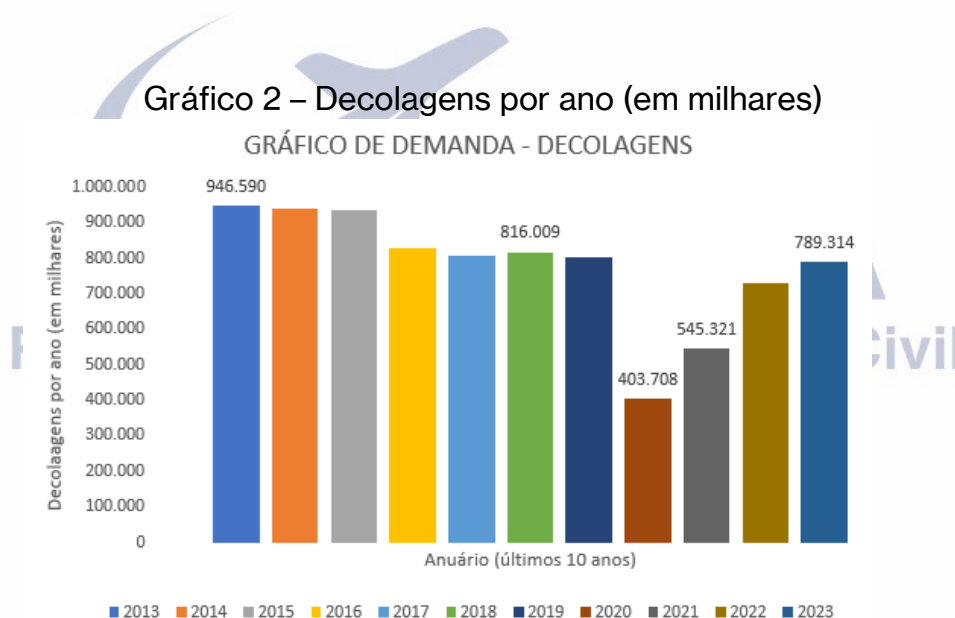
No gráfico abaixo, sobre os estudos do Anuário de Emissões da Agência Nacional de Aviação Civil (Gráfico 1), nota-se as emissões de gases CO₂ entre 2013 e 2023, sendo perceptível o aumento, em milhões de toneladas do despejo de gás carbônico na atmosfera. Percebe-se em cinco anos, de 2013 a 2018, um aumento de 89%, na emissão de gases, e progressivamente esse número aumenta até 2023 (ANAC, 2024).

Gráfico 1 – Emissões de CO₂ por aviões no Brasil entre 2013 e 2023



Fonte: Anuário de Emissões (ANAC, 2024, adaptado pelos autores)

Já o gráfico de demandas, da ANAC, para número de decolagens, exemplificado em milhares (gráfico 2) deixa claro o aumento gradativo, com relação as emissões, ao longo de uma década. Em 2013 foram 946.590 decolagens, em todo Brasil, cinco anos depois, em 2018 esse número chegou a 816.009, apresentando uma queda, que chegou a menos 42%, o número de aeronaves que partiam, em relação a 2013. Aqui não se contempla aeronaves de taxi aéreo, nem aeronaves regionais executivas, uma vez que a ANAC não dispõe dos dados. A queda em 2020, para o número de decolagens, deu-se devido a pandemia da COVID-19. Em seguida, é evidenciado um aumento considerado, entre os anos de 2021 e 2023.



Fonte: Portal ANAC – Relatório de demanda e oferta (ANAC, 2024, adaptado pelos autores)

1.2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho constitui-se de uma revisão bibliográfica do tema, abrangendo publicações, priorizando publicações dos últimos sete anos em fontes como revistas especializadas, livros, endereços eletrônicos (*sites*) das companhias aéreas e órgãos regulatórios, sendo exploratória e descritiva com R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 27-56, jan/fev 2025.

foco em uma abordagem mista que integra análises qualitativas e quantitativas dos dados disponíveis sobre a disponibilidade e os impactos do uso de aviões movidos a hidrogênio, particularmente os modelos ZEROe, da Airbus.

Os critérios de inclusão serão focados em estudos que discutirão a aplicabilidade do hidrogênio em aeronaves, inovações tecnológicas para aviação e análises comparativas com combustíveis convencionais. Abordar-se-á outros tipos de combustíveis, porém sem tirar o foco deste trabalho que versará diretamente sobre os motores à hidrogênio para garantir a relevância e atualidade dos dados.

As discussões e análises apresentadas refletirão a interseção entre inovação tecnológica e imperativo ecológico, destacando o papel crucial das pesquisas acadêmicas no embasamento de políticas públicas e estratégias industriais para um futuro aeronáutico renovável e sustentável.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA AVIAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS

Desde o início da aviação comercial no século XX, os combustíveis aeronáuticos evoluíram significativamente, tanto em composição química quanto em impactos ambientais associados. Inicialmente, as aeronaves utilizavam motores a pistão, que queimavam gasolina de aviação. Com o desenvolvimento de motores a jato no final dos anos 1930 e especialmente durante a Segunda Guerra Mundial, o querosene tornou-se o combustível predominante devido à sua maior eficiência energética e menor custo em comparação com a gasolina de aviação (Yusaf *et al.*, 2023). Faz-se necessário lembrar que algumas aeronaves ainda são alimentadas por AVGAS.

A expansão global do tráfego aéreo nas décadas subsequentes intensificou os impactos ambientais, principalmente em termos de emissões de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), e vapor de água, que contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas. Estudos indicam

que a aviação é responsável por aproximadamente 2% das emissões globais de CO₂, um número que tem crescido com o aumento da demanda por transporte aéreo (Neto *et al.*, 2020).

Merluzzi (2022), destaca uma observação em relação a emissão de CO₂ no mundo. “China, Estados Unidos, Índia e Rússia são responsáveis por mais de 55% do dióxido de carbono emitido na atmosfera nos últimos dez anos. O Brasil ocupa a décima-segunda posição, com menos de 2%, atrás do Japão, Coreia do Sul, Indonésia, Iran, Arábia Saudita, Canadá e Alemanha, países que emitem mais CO₂. Os dados são do IEA e Banco Mundial”.

A crise do petróleo nos anos 1970 e as subsequentes flutuações nos preços do petróleo destacaram a vulnerabilidade do setor aeronáutico às dependências de combustíveis fósseis. Esta dependência energética incentivou a pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Na virada do século, conforme Brito e Henkes (2023), a introdução de biocombustíveis, misturados com querosene de aviação, começou a ser explorada como uma opção para reduzir os impactos ambientais.

A atenção tem se voltado para o hidrogênio como uma solução potencialmente revolucionária para alcançar a aviação de zero emissões. O hidrogênio pode ser utilizado tanto em células de combustível para gerar eletricidade quanto em motores a combustão, emitindo apenas vapor de água como subproduto. Contudo, sua aplicação enfrenta desafios significativos, incluindo questões de armazenamento seguro e eficiente, dado que o hidrogênio requer armazenamento em altas pressões ou em temperaturas criogênicas extremamente baixas (Espindola *et al.*, 2022; Boretti, 2021).

Essa transição, para combustíveis mais limpos e ambientalmente corretos, é complexa, envolvendo não apenas inovações tecnológicas, mas também mudanças regulatórias, econômicas e sociais, uma vez que mexe com a cultura da população e dos empresários. A implementação bem-sucedida destas tecnologias não apenas atenderá às exigências ambientais contemporâneas, mas também pavimentará o caminho para futuras inovações no campo

aeronáutico, destacando a incessante busca da indústria por soluções que conciliam eficiência operacional com responsabilidade ecológica (Hoelzen *et al.*, 2022).

2.2 TECNOLOGIAS DE COMBUSTÍVEIS ATUAIS

2.2.1 Gasolina

Conhecida como AVGAS, a gasolina de aviação é a soma de hidrocarboneto com átomos de carbono numa faixa de ebulição entre 30 e 170 graus Celsius, utilizando chumbo como melhorador para a octanagem. É predominantemente usado em aviões com motores a pistão (quatro tempos e seis fases), com ignição por centelhas, usados, também, na aviação agrícola, que particularmente tem utilizado mais o etanol à gasolina, além de aviões privados comerciais, aeronaves de escolas particulares e formação de pilotos.

Pavan (2016), destaca algumas vantagens e desvantagens. O autor cita a gasolina como sendo mais eficiente que um motor a diesel quando no arranque e desenvolvimento. A utilização de gasolina com aditivos mantém limpos os sistemas de injeção, diminuindo os desgastes das peças, deixando o motor protegido. Já uma das desvantagens é com relação ao preço, comparado a outros tipos de combustíveis, além de poluir mais o ar com as emissões de CO₂, ser fonte esgotável, dependente do petróleo.

2.2.2 Jet A, Jet A-1 e o Jet B

Jet A e Jet A-1 são combustíveis tipo querosene, com o Jet A-1 (Figuras 1 e 2) sendo o padrão internacional devido ao seu ponto de congelamento mais baixo, o que facilita o uso em voos internacionais. Jet B, uma mistura de querosene e nafta, apresenta melhor desempenho em climas frios, mas é menos usado devido à sua maior volatilidade e risco associado de inflamabilidade

(Yusaf *et al.*, 2023).

Figura 1 – JET A1 – querosene para aviação



Fonte: Indiamart (online, 2024).

No entanto, as desvantagens ambientais destes combustíveis são notáveis. A queima destes combustíveis libera diversos poluentes, incluindo CO₂, NO_x, hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono, óxidos de enxofre e material particulado, todos contribuindo para o aquecimento global e problemas de qualidade do ar local (Khan *et al.*, 2022).

Figura 2 – Estação de abastecimento



Fonte: Passafaro (online, 2024).

Dada a crescente preocupação ambiental, a indústria começou a adotar o Combustível de Aviação Sustentável (*Sustainable Aviation Fuel* - SAF), que inclui biocombustíveis produzidos a partir de recursos renováveis, como óleos de

cozinha usados e outras gorduras não derivadas.

2.2.3 – Sustainable Aviation Fuel – SAF

Os SAFs podem reduzir as emissões de carbono em até 80% ao longo de seu ciclo de vida, em comparação com o *jet fuel* (combustível para aviões a jato), convencional, dependendo da matéria-prima e do método de produção utilizados. É importante frisar que o uso de SAF é limitado pela disponibilidade, pelos custos maiores e pela necessidade de desenvolvimentos tecnológicos e logísticos para sua produção em grande escala (Khan *et al.*, 2022).

2.3 INOVAÇÕES EM COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

No contexto atual de busca por sustentabilidade na aviação, diversas inovações em combustíveis alternativos têm sido desenvolvidas e estudadas, destacando-se o bioquerosene e as tecnologias elétricas. O bioquerosene, particularmente, é produzido a partir de fontes renováveis como óleos vegetais, gorduras animais e resíduos agrícolas, podendo reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis tradicionais (Espindola *et al.*, 2022).

O bioquerosene se integra aos esforços globais de redução de carbono por ser capaz de utilizar a infraestrutura de abastecimento já existente, o que facilita sua adoção sem necessidade de grandes modificações logísticas. Além disso, estudos indicam que esse combustível pode diminuir em até 80% as emissões de carbono ao longo de seu ciclo de vida, dependendo de sua fonte e método de produção (Yusaf *et al.*, 2023).

Já a eletrificação da aviação apresenta um paradigma promissor, com desenvolvimentos significativos nos últimos anos. Aeronaves totalmente elétricas estão em fase de testes e prometem uma operação completamente livre de emissões diretas de poluentes, porém ainda enfrentam desafios como o

peso das baterias e o alcance limitado (Brito; Henkes, 2023).

Em 2023 foi anunciado a primeira aeronave elétrica, com certificação tipo, do mundo, a homologada pela *European Union Aviation Safety Agency* (EASA). (AEROIN, site 2022). A aeronave Velis Electro (Figura 3), da Pipistrel, fabricante eslovena, foi projetado para operar com duas baterias, uma à frente da cabine e outras atrás, sendo capaz de se manter em voo de cruzeiro com apenas uma em pleno funcionamento em caso de falha da outra. É esperado que a bateria consiga fornecer 3000 ciclos, variando de acordo com temperatura ambiente.

Figura 3 - Velis Electro



Fonte: Pipistrel, 2024.

Esses caminhos exigem investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento. A colaboração entre governos, indústrias e instituições de pesquisa é essencial para viabilizar essas inovações, promovendo uma transição efetiva para uma aviação mais verde e ambientalmente correta.

2.4 HIDROGÊNIO

O hidrogênio foi liquefeito pela primeira vez por James Dewar, em 1898, ao usar resfriamento regenerativo, no ano seguinte produziu o hidrogênio sólido. A primeira vez que o gás de hidrogênio foi utilizado para voo ocorreu no ano de

1783 (Figura 4), quando Jacques Charles fez o enchimento do primeiro balão que provia de maneira confiável a viagem aérea (Pavan, 2015).

Figura 4 - Ilustração do voo de Jacques Charles em 1783. Gravura de 1887



Fonte: National Geographic, 2024 (adaptado, online).

2.5 INTRODUÇÃO AO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL

O hidrogênio é considerado o “combustível do futuro”, devido ao seu potencial de emissão zero e alta eficiência energética. Considerado um elemento importante no universo, emerge como um candidato promissor para substituir os combustíveis fósseis na aviação devido à sua alta eficiência energética e ao potencial de emissão zero de carbono quando utilizado em células de combustível, despontando desde a década de 90 quando a poluição atmosférica, e as mudanças climáticas, tornaram-se evidentes e preocupantes (Oliveira, 2023 *apud* Benemann, 1996).

O uso de hidrogênio em aeronaves, como combustível, envolve duas abordagens principais: a combustão direta de hidrogênio em motores a jato e o uso de células, de combustível, para converter hidrogênio em eletricidade, que então alimenta motores elétricos (Boretti, 2021).

Boretti, 2021, destaca ainda que a combustão de hidrogênio em motores a jato funciona de maneira semelhante à combustão de querosene, mas com modificações para acomodar as propriedades únicas do hidrogênio, que incluem

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 27-56, jan/fev 2025.

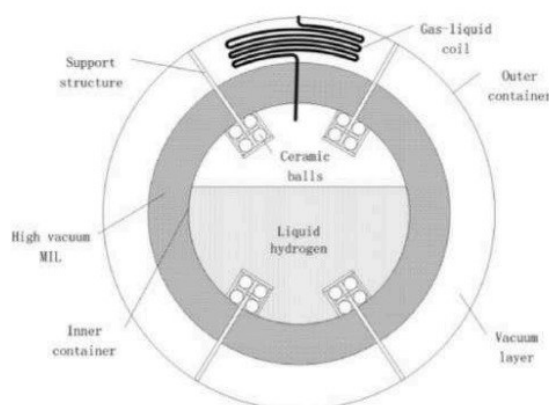
um ponto de ignição mais baixo e uma velocidade de combustão mais alta.

O processo de produção de hidrogênio pela eletrólise da água é simples e rápido, mas apresenta custo relativamente alto, pois necessita de uma quantidade maior de energia para ocorrer (Oliveira, 2023 *apud* Botton, 2007).

Apesar dos seus benefícios significativos, o uso de hidrogênio como combustível aeronáutico enfrenta vários desafios técnicos, sendo um dos principais o armazenamento seguro e eficiente de hidrogênio, que deve ser mantido a temperaturas criogênicas (-253°C) para permanecer líquido, exigindo tanques de armazenamento especializados e sistemas de distribuição robustos. Caso isso não aconteça ele evaporaria (Espindola *et al.*, 2022).

Manter uma temperatura tão baixa requer tanques de armazenamento muito específicos (Figura 5), que consistem em um tanque interno dentro de outro externo ligeiramente maior, com vácuo entre eles e um material específico, como um MLI (*Multi-Layer Insulation*), para minimizar a transferência de calor por radiação.

Figura 5 – ilustração de um tanque criogênico, suas estruturas e divisões

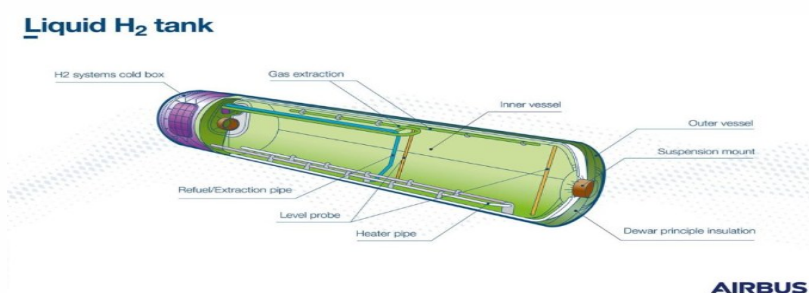


Fonte: Pavan *et al.*, XU (2015).

A infraestrutura de reabastecimento também representa um desafio, pois a produção, o transporte e o abastecimento de hidrogênio devem ser geridos de

forma segura e econômica para tornar o hidrogênio uma alternativa viável ao querosene. Isso inclui a necessidade de novas instalações de reabastecimento em aeroportos e uma cadeia de suprimentos confiável para entregar hidrogênio nos pontos de uso (Figura 6) (Khan *et al.*, 2022).

Figura 6 - Liquid H₂ Tank - Airbus



Fonte: AeroIn (online, 2024).

Apesar desses desafios, o potencial do hidrogênio para revolucionar a indústria da aviação é indiscutível. A integração do hidrogênio na aviação promete transformar radicalmente o impacto ambiental do transporte aéreo. As soluções inovadoras em armazenamento, transporte e infraestrutura de reabastecimento são essenciais para viabilizar essa transição, com o objetivo final de alcançar integração do hidrogênio como combustível para aeronaves (Hoelzen *et al.*, 2022; Butenas; Madi, 2024).

Figura 7 – Concepção tanque de combustível pela Lufthansa



Fonte: AeroIn (online, 2024).

Na Figura 7, nota-se a concepção de um tanque de combustível, desenvolvido pela Lufthansa, para uma aeronave Airbus, e a plataforma de estoque a ser criada para viabilização do hidrogênio. Utilizar hidrogênio em motores de combustão ou em células de combustível para gerar eletricidade representa duas das principais metodologias exploradas atualmente.

Segundo Wang, Wan e Wang (2009), o hidrogênio é um gás leve quando comparado aos combustíveis comumente usados e, assim, se torna vantajoso para o uso em jatos e foguetes, já que precisam ter um combustível leve. Tecnicamente, as células de combustível de hidrogênio representam uma fronteira de inovação, convertendo hidrogênio em eletricidade com eficiência e silêncio operacional, aspectos particularmente benéficos para aeronaves utilizadas em rotas urbanas ou curtas distâncias.

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 (Airbus, 2022c).

Pavan (2015) destaca que o hidrogênio líquido é excelente para ser usado durante voos em altas altitudes, e com longo alcance. A desvantagem está para o reservatório, ou chamado tanque, que tem que ser resistente e com isolamentos térmicos.

Enquanto o hidrogênio oferece uma promessa substancial para reduzir o impacto ambiental da aviação, seus desafios técnicos e infraestruturais requerem soluções inovadoras e colaboração global. Incentivos regulatórios e o desenvolvimento de normas internacionais serão essenciais para facilitar a transição para essa tecnologia promissora (Butenas; Madi, 2024).

2.6 OS PRIMEIROS VOOS A HIDROGÊNIO

Um dos mais importantes avanços, apontados na corrida pela implantação do hidrogênio como combustível na aviação, partiu da *startup* britânica, ZeroAvia, que desenvolve soluções com motores limpos com um ato histórico na aviação (Oliveira, 2023 *apud* ZeroAvia, 2023). Com um Dornier 228, da fabricante Dornier GmbH, abastecido com hidrogênio, a empresa realizou, em 19 de janeiro de 2023, um voo de teste de 10 minutos em completa segurança, porém foi necessário que a empresa modificasse um dos dois motores Dornier, quando substituiu o esquerdo por um motor de propulsão elétrica, com bateria e célula de combustível cheia de hidrogênio.

O motor direito ficou abastecido com querosene, devido a necessidade de garantir a segurança, durante o teste (Oliveira, 2023 *apud* ZeroAvia, 2023). A Figura 8 mostra o projeto denominado *HyFlyer II*, com desenvolvimento dos motores a hidrogênio, chamado de *Lightning McClean*, da fabricante Bombardier, que possam sustentar uma aeronave de até 19 passageiros, como é o caso da Dornier 228 (OLIVEIRA, 2023 *apud* ZeroAvia, 2023).

Outra empresa que também explora a aviação sustentável é a Universal Hydrogen, startup que realizou um voo de teste em 2 de março de 2023, de um avião movido a célula de hidrogênio, sendo – até então – o maior avião a usar o combustível limpo como sistema de propulsão. Oliveira (2023), menciona que 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.

Em 2023 foi apresentado pela Alaska Airlines, a empresa ZeroAvia, o turboélice regional (Figura 7), 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.

Figura 8 – Aeronaves em voos de teste utilizando hidrogênio como combustível



Fonte: Oliveira (2023) *apud* ZeroAvia (2023), adaptado pelos autores).

3 AIRBUS

Para a Airbus (*online*, 2020), o hidrogênio é um componente crucial para o futuro da aviação sustentável. É uma tecnologia de descarbonização mais promissora para a aviação, com potencial de ser um dos principais combustíveis para aeronaves no futuro, especialmente se levar em consideração a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e combater as mudanças climáticas.

Nesse sentido que a empresa francesa atinge uma série de marcos tecnológicos e de testes, avançando em direção à sua ambição de lançar no mercado, até 2035, uma aeronave comercial movida a hidrogênio. O projeto, que leva o nome de ZEROe, ou zero emissões, visa explorar essa gama de configurações e tecnologias.

3.1 OS AVIÕES ZEROe DA AIRBUS

Os aviões ZEROe da Airbus representam uma inovação significativa no setor aeronáutico, visando a sustentabilidade ambiental através da utilização de hidrogênio como principal combustível. Estes modelos são parte de um esforço

mais amplo da Airbus para desenvolver tecnologias que reduzam as emissões de carbono e outros poluentes. O motor de hidrogênio (Figura 9), não emite poluentes, porque produz apenas vapor de água (Brito; Henkes 2023).

Figura 9 - Modelo (A380 MSN1) de motor de célula a combustível ZEROe



Fonte: Hervé Gousse/Airbus, 2024.

Os modelos ZEROe incluem variações como o turbofan, o turboprop, e o conceito de asa mista, cada um destinado a atender diferentes necessidades de mercado e perfis de missão, como o turbofan ZEROe (Figura 10), que é o primeiro projeto com uma capacidade de transporte de até 200 passageiros e um alcance de aproximadamente 2.000 milhas náuticas, o que equivale a aproximadamente 3.700 quilômetros.

Este modelo utilizaria dois motores turbofan híbridos, que são alimentados por hidrogênio, do tipo líquido, armazenado em tanques criogênicos. A especificação técnica chave deste modelo é sua capacidade de operar em rotas de médio alcance sem emissões de CO₂, o que o torna uma opção atraente para companhias aéreas focadas na redução de sua pegada de carbono (Brito; Henkes 2023).

Figura 10 - Turbofan Airbus de hidrogênio híbrido



Fonte: Airbus (online, 2024).

O modelo turboprop ZEROe, ou turboélice (Figura 11) é adequado para operações de curto alcance, com capacidade para menos de 100 passageiros e um alcance de até 1.000 milhas náuticas, cerca de 1852 quilômetros. Ela possuiria dois motores turboélice de hidrogênio híbrido, que acionam hélices de oito pás, que fornecem impulso. A eficiência energética, combinada com reduções significativas em emissões, posiciona o turboprop ZEROe como uma alternativa viável e sustentável dentro do espectro de aviação regional (Yusaf et al., 2023).

Figura 11 - Turboélice de hidrogênio e híbrido



Fonte: Airbus (online, 2024).

O conceito de asa mista, descrita pela Airbus (2023a) como Corpo de Asa Mista, ou *Blended-Wing Body* (BWB), (figura 12), tem alcance de 2000 milhas náuticas (3.700 km) e capacidade para 200 passageiros e dois motores turbofan de hidrogênio híbrido. Teria um interior amplo, projetado para múltiplas opções para armazenamento e distribuição de hidrogênio. Ainda em estágios iniciais de desenvolvimento, promete revolucionar o design aerodinâmico ao integrar as asas ao corpo da aeronave, maximizando o desempenho aerodinâmico e a eficiência do combustível (Boretti, 2021).

Figura 12 - Airbus - Corpo de asa mista (BWB)



Fonte: Airbus (online, 2024).

Por fim, a *Full Electric Concept* (Figura 13) traz o conceito elétrico, com alcance de 1000 milhas náuticas e capacidade para 100 passageiros. É baseada em um sistema de propulsão totalmente elétrico por células de combustível de hidrogênio. A Figura 9 ilustra os modelos.

Os estágios de desenvolvimento dos modelos ZEROe variam desde o design conceitual até testes iniciais de componentes específicos, como sistemas de células de combustível e motores adaptados ao hidrogênio. A Airbus tem realizado testes em terra e espera iniciar testes de voo na próxima década, com o objetivo de colocar estes aviões em serviço comercial até 2035.

Figura 13 – Airbus - Full Eletric Concept



Fonte: Airbus (online, 2024).

Em termos de expectativas de desempenho, a Airbus projeta que os aviões ZEROe - não só atendam às regulamentações ambientais, mas também ofereçam uma redução significativa nos custos operacionais relacionados ao combustível, dada a previsão de aumento nos preços do petróleo e a maior eficiência do hidrogênio como combustível. Essas aeronaves estão sendo desenvolvidas com o objetivo de não apenas cumprir, mas superar os padrões de emissões, destacando-se em um mercado cada vez mais focado na sustentabilidade (Espindola *et al.*, 2022).

Os aviões ZEROe da Airbus representam um avanço promissor na busca por uma aviação mais limpa. Com várias configurações em desenvolvimento, estes aviões têm o potencial de transformar a indústria, oferecendo soluções práticas e eficientes que atendem tanto às necessidades operacionais quanto às ambientais das companhias aéreas modernas.

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, na Alemanha e Espanha para trabalhar em tanques, motores e sistemas de combustível criogênico (AIRBUS, 2023a)

Cada um desses modelos está em diferentes estágios de desenvolvimento, desde a concepção inicial até testes de componentes

específicos. A Airbus planeja começar os testes de voo dos protótipos ZEROe dentro dos próximos anos, com a intenção de iniciar a comercialização antes de 2035. Para Khan *et al.*, (2022) esses testes são cruciais para validar as tecnologias envolvidas, especialmente os sistemas de propulsão a hidrogênio e os tanques de armazenamento criogênicos, que são fundamentais para a viabilidade dos voos de zero emissões

As expectativas de desempenho para os aviões ZEROe são altamente positivas, com a Airbus antecipando não apenas uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa, mas também uma operação mais eficiente e menos custosa em termos de combustível, uma vez que os aviões ZEROe da Airbus representam uma evolução notável na busca por um futuro de aviação sem emissões de carbono. Estes modelos não só cumprirão com os rigorosos requisitos ambientais futuros, mas também oferecerão novas possibilidades para as companhias aéreas reduzirem as emissões de carbono enquanto mantêm a eficácia operacional.

3.2 VIABILIDADE ECONÔMICA DO HIDROGÊNIO

A viabilidade econômica do hidrogênio como combustível para aviação compreende múltiplos aspectos, desde os custos de produção e infraestrutura até a comparação com combustíveis tradicionais como o querosene. A implementação do hidrogênio requer investimentos significativos em infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição, especialmente para adaptar ou construir novos sistemas de abastecimento nos aeroportos. (Espindola *et al.*, 2022).

Do ponto de vista ambiental, o hidrogênio promete reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e poluentes locais. Em termos de emissões diretas, o uso de células de combustível de hidrogênio em aeronaves resultaria em zero emissões de CO₂ e NO_x muito reduzidas, uma melhoria substancial em relação aos motores a combustão tradicionais. De

acordo com Khan *et al.*, 2022, site:

A eficiência energética do hidrogênio também é superior, o que contribui para um menor consumo energético por distância voada, reduzindo ainda mais o impacto ambiental quando comparado com combustíveis fósseis.

Contudo, a adoção do hidrogênio enfrenta barreiras significativas, tanto técnicas quanto econômicas e regulatórias. Tecnicamente, os desafios incluem o armazenamento seguro e eficiente de hidrogênio em forma líquida a temperaturas criogênicas, a adaptação dos motores de aeronaves para usar hidrogênio e o desenvolvimento de infraestrutura de abastecimento nos aeroportos. Economicamente, os altos custos iniciais de investimento e a necessidade de uma cadeia de suprimentos totalmente nova são consideráveis. Já Hoelzen *et al.*, (2022, site), mencionam que “a aviação, regularmente, com hidrogênio exigirá novas normas e certificações que garantam a segurança e eficácia dessas tecnologias emergentes”.

As perspectivas futuras para a aviação sustentável com hidrogênio são promissoras, com expectativas de que as inovações tecnológicas e a diminuição dos custos de produção de hidrogênio verde acelerem sua adoção. Governos e instituições internacionais desempenham papéis cruciais através da formulação de políticas que incentivem o uso de combustíveis alternativos e através do financiamento de pesquisas em tecnologias de hidrogênio. A colaboração internacional será essencial para harmonizar regulamentos e fomentar um mercado global para a aviação de baixo carbono, com o hidrogênio no centro desta transformação (Butenas; Madi, 2024).

Embora haja desafios substanciais, as vantagens do hidrogênio como combustível para aviação, tanto em termos de impacto ambiental quanto de sustentabilidade a longo prazo, alinham-se com os objetivos globais de redução de emissões. A continuação do desenvolvimento tecnológico, acompanhada de apoio regulatório e colaboração internacional, será fundamental para realizar o potencial completo do hidrogênio na aviação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão deste estudo abrangente sobre a viabilidade e implementação de aeronaves movidas a hidrogênio, especificamente os modelos ZEROe da Airbus, destaca o potencial transformador deste combustível alternativo frente aos desafios ambientais, técnicos e econômicos contemporâneos na aviação. O hidrogênio, ao ser comparado com os combustíveis fósseis tradicionais, apresenta vantagens incontestáveis em termos de eficiência energética e impactos ambientais, marcando um avanço significativo rumo a uma aviação sustentável e de baixo carbono.

A transição para o hidrogênio como principal fonte de combustível para aviões não é apenas uma medida ambientalmente prudente, mas também uma evolução tecnológica inevitável para enfrentar as crescentes pressões regulatórias e as exigências por maior sustentabilidade no transporte aéreo. Os modelos ZEROe da Airbus, com suas diferentes configurações projetadas para atender a variados perfis de missão, são pioneiros nesta frente, demonstrando que é possível alcançar emissões zero de carbono em operações aéreas sem comprometer o desempenho e a segurança.

Os desafios técnicos relacionados ao armazenamento e manuseio do hidrogênio em condições criogênicas, a necessidade de infraestrutura especializada para abastecimento e a alta inicial de capital para desenvolvimento e implementação são consideráveis. No entanto, estes são superáveis com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, aprimoramento das tecnologias de produção de hidrogênio verde e cooperação internacional para estabelecer normas regulatórias que facilitem essa transição.

Economicamente, embora o custo inicial do hidrogênio seja maior em comparação aos combustíveis convencionais, as projeções a longo prazo sugerem uma redução nos custos operacionais, principalmente devido à diminuição dos gastos com combustíveis e manutenção. Além disso, a adesão ao hidrogênio pode oferecer vantagens competitivas significativas para as

companhias aéreas, principalmente em regiões com rígidas regulamentações ambientais que possam impor taxas sobre as emissões de carbono.

Ambientalmente, a substituição de combustíveis fósseis por hidrogênio nos aviões reduzirá drasticamente as emissões de gases de efeito estufa e poluentes locais, contribuindo significativamente para os esforços globais de combate às mudanças climáticas e melhorando a qualidade do ar ao redor dos aeroportos e rotas aéreas. Esta mudança não apenas alinha a indústria da aviação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS - da ONU, mas também melhora a percepção pública e a responsabilidade corporativa das companhias aéreas.

Este estudo, portanto, conclui que o hidrogênio possui o potencial não apenas de revolucionar a aviação com uma diminuição na emissão de carbono, mas também de gerar economias significativas em termos de custos operacionais. As perspectivas futuras para a aviação movida a hidrogênio são amplamente positivas, com expectativas de que avanços tecnológicos continuados e a queda nos preços do hidrogênio, à medida que as cadeias de suprimento se tornam mais robustas e eficientes, acelerem sua adoção. O papel dos governos e das instituições internacionais será crucial em moldar políticas que incentivem o uso de combustíveis alternativos, ofereçam incentivos fiscais e subsidiem a infraestrutura necessária, garantindo que a transição para o hidrogênio seja não apenas viável, mas também benéfica para todos os envolvidos.

Enquanto o caminho para uma aviação movida a hidrogênio está repleto de desafios, o compromisso contínuo com a inovação e a sustentabilidade por parte de fabricantes de aeronaves, companhias aéreas, governos e reguladores internacionais pode muito bem definir o futuro do transporte aéreo. Esta transição não apenas ajudará a mitigar os impactos ambientais associados à aviação, mas também reforçará a resiliência e a sustentabilidade de longo prazo da indústria aeronáutica global.

Embora existam desafios significativos a serem superados, o hidrogênio

possui um enorme potencial para transformar a indústria da aviação, oferecendo um caminho sustentável para o futuro com impactos ambientais minimizados. A colaboração entre a indústria, governos e instituições acadêmicas será crucial para resolver as questões técnicas e econômicas e para estabelecer um quadro regulatório que facilite esta transição.

REFERÊNCIAS

AEROIN. **O desafio de ter hidrogênio a -253°C nos aviões da próxima geração.** Disponível em: <https://aeroin.net/o-desafio-de-ter-hidrogenio-a-253c-nos-avioes-da-proxima-geracao/> Acesso em: 05 set. 2024.

AEROIN. **A única aeronave elétrica certificada no mundo conquista mais uma certificação** Disponível em: <https://aeroin.net/a-unica-aeronave-eletrica-certificada-no-mundo-conquista-mais-uma-certificacao/> Acesso em: 05 set. 2024.

AEROIN. **Lufthansa technik se volta à nova realidade do voo a hidrogênio: vai usar um Airbus A320.** Disponível em: <https://aeroin.net/lufthansa-technik-se-volta-a-nova-realidade-do-voo-a-hidrogenio-vai-usar-um-airbus-a320/>. Acesso em: 05 set. 2024

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2019**, volume único, 1ª edição. Disponível em https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf. Acesso em: 09 jun. 2024.

BORETTI, Alberto. **The hydrogen economy is complementary and synergetic to the electric economy.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, n. 78, p. 38959-38963, 2021.

BORETTI, Alberto. **Progress of hydrogen subsonic commercial aircraft.** Frontiers in Energy Research, v. 11, p. 1195033, 2023.

BORETTI, Alberto. **Perspectives of hydrogen aviation.** Advances in aircraft and spacecraft science, v. 8, n. 3, p. 199-211, 2021.

BUTENAS, Amanda; MADI, Ana Paula Lang Martins. **Sustentabilidade no setor aéreo brasileiro: Sustainability in the brazilian airline sector.** Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas, v. 4, n. 1, p. 101-131, 2024.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 27-56, jan/fev 2025.

BBC. 2023. **A aviação pode se tornar sustentável um dia?** disponível em <https://www.bbc.com/portuguese/articles/crgn8ny2e8xo>. Acesso em: 23 de ago. de 2024.

COP28: **aviação quer combustíveis sustentáveis, o problema é que não há o suficiente.** Disponível em <https://forbes.com.br/forbesagro/2023/12/cop28-aviacao-quer-combustiveis-sustentaveis-o-problema-e-que-nao-ha-o-suficiente/>. Acesso em: 03 de jun. de 2024.

BRITO, Ricardo de; HENKES, Jairo Afonso. **Um estudo sobre combustíveis para aviação: hidrogênio e célula a combustível: A study on aviation fuel: Hydrogen and fuel cells.** Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas, v. 3, n. 2, p. 159-182, 2023.

ESPINDOLA, Gustavo Gomes *et al.*, **Problema ambiental e escassez do petróleo:** alternativas possíveis na aviação. 2022.

FAVARO, Mariana, 2024. **Quanto carbono sua viagem vai emitir?** Disponível em <https://redeglobo.globo.com/sp/eptv/epagro/noticia/quanto-carbono-a-sua-viagem-vai-emitir.ghtml>. Acesso em: 05 set. 2024.

FERNANDES, André Luiz da Silva *et al.*, **Hidrogênio: o futuro combustível da aviação civil.** 2023.

HAMBURG, Aviation. ZEROe: **A caminho de um voo com impacto neutro no clima.** Disponível em <https://www.hamburg-aviation.de/en/hamburg-aviation-green/airbus-zeroe-en.html>. Acesso em: 31 maio 2024.

HOELZEN, Julian *et al.* **Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure–Review and research gaps.**, v. 47, n. 5, p. 3108-3130, 2022.

KRAMER, David. **Hydrogen-powered aircraft may be getting a lift.** Physics Today, v. 73, n. 12, p. 27-29, 2020.

KHAN, M.; ANWAR H. *et al.*, The emissions of water vapour and NO_x from modelled hydrogen-fuelled aircraft and the impact of NO_x reduction on climate compared with kerosene-fuelled aircraft. **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1660, 2022.

LIMA, J. M.; HENKES, J. A.; GIORDANI, L. E. P. **Estudo de viabilidade do uso de aviões a propulsão elétrica na formação de pilotos, e seus possíveis impactos: Feasibility study of the use of electric propulsion airplanes in pilot training, and possible impacts.** Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 63–87, 2022. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/100>. Acesso em: 05 set.

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 27-56, jan/fev 2025.

2024.

MENDES GOMES, Ana Isabel. **Indústria Aeronáutica mais ecológica**. 2023. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Gestão. Disponível em https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/50192/1/Tese_AnaGomes_VF.pdf. Acesso em: 06 set. 2024.

MERLUZZI, Orlando. **A eletrificação e a emissores de CO2 na Atmosfera. Óleo diesel na veia**. Disponível em <https://oleodieselnaveia.com/2022/08/12/a-eletrificacao-e-os-emissores-de-co2/>. Acesso em: 23 ago. 2024.

MICHAELIS, **Dicionário online**, 2024. Disponível em <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/combust%C3%ADvel> acesso em 05 de setembro de 2024.

NASLAUSKI, Matteo Grimberg; HENKES, Jairo Afonso. Fontes alternativas de energia para a aviação: Uma análise sobre o uso de energias renováveis: Alternative energy sources for aviation: An analysis on the use of renewable energies. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, v. 1, n. 1, p. 103-126, 2021.

NETO, Sá *et al.*, **A evolução dos motores a reação e seu impacto no meio ambiente**. 2020. Monografia de conclusão de curso. Disponível em <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/306>. Acesso em: 12 set. 2024.

OLIVEIRA, Felipe Fante. **Hidrogênio: o futuro combustível da aviação sustentável**. Monografia Ciências Aeronáuticas. Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2023. Disponível em <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/6800/1/TCC%20FELIPE%20FANTE%20.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

PETRESCU, Rely Victoria et al. Home at airbus. **Journal of Aircraft and Spacecraft Technology**, v. 1, n. 2, 2017.

PULTAROVA, Tereza. **Pesquisadores querem produzir combustíveis de aviões sustentáveis por meio da agricultura**. Disponível em <https://esginsights.com.br/pesquisadores-querem-produzir-combustiveis-de-avioes-sustentaveis-por-meio-da-agricultura/#:~:text=%E2%80%99CO%20maior%20problema%20nos%20combust%C3%ADveis,em%20terras%20marginais%20e%20degradadas.%E2%80%99D>. Acesso em: 03 jun. 2024.

TURCIO, Filipe. **O hidrogênio como opção futura de combustível de aeronaves**. Artigo científico de bacharelado. Pontifícia Universidade Católica de

Goiás – PUC, 2022. 21p. Disponível em <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/5504>, Acesso em: 05 set. 2024.

YUSAF, Talal *et al.*, **Sustainable hydrogen energy in aviation–A narrative review**. International Journal of Hydrogen Energy, 2023.

YANG, Boning; MANE, Muharrem; CROSSLEY, William A. **An Approach to Evaluate Fleet Level CO2 Impact of Introducing Liquid-Hydrogen Aircraft to a World-Wide Network**. In: AIAA Aviation 2022. Forum. 2022. p. 3313.

