



HIDROGÊNIO COMO VETOR DE SUSTENTABILIDADE NA AVIAÇÃO:  
PERSPECTIVAS PARA O AEROPORTO DE GUARULHOS

MATHEUS FERREIRA ALVES SAY (AUTOR)

Prof<sup>a</sup>. Me. ANDREZA SANTOS FEITOZA (ORIENTADORA)

Prof. Me. EDSON DEMÉTRIO LEAL (ORIENTADOR)

**Guarulhos- SP**

**2025**



**Resumo:** O setor aéreo busca reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, estimulando alternativas energéticas mais limpas. O hidrogênio surge como opção promissora, podendo ser usado em estado gasoso, líquido ou em células de combustível, com baixa emissão de poluentes. Este estudo avalia sua viabilidade especificamente no Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos, considerando desafios técnicos, logísticos e operacionais na substituição do querosene de aviação. A análise indica que, embora ambientalmente vantajoso, o hidrogênio exige investimentos em armazenamento criogênico, ampliação de capacidade e adaptações operacionais, sendo sua implementação em grandes aeroportos complexa, porém promissora.

**Palavras-chave:** Hidrogênio de aviação; Aeroporto Guarulhos; Infraestrutura Aeroportuária

**Abstract:** *The aviation sector is under increasing pressure to reduce greenhouse gas emissions, driving the search for cleaner energy alternatives. Hydrogen emerges as a promising option, capable of being used in gaseous, liquid, or fuel cell forms, with low or zero pollutant emissions. This study evaluates its feasibility specifically at São Paulo/Guarulhos International Airport, considering the technical, logistical, and operational challenges associated with replacing aviation kerosene. The analysis indicates that, although environmentally advantageous, hydrogen requires investments in cryogenic storage, increased capacity, and operational adaptations, making its implementation at large airports complex but promising.*

**Keywords:** *Aviation hydrogen; Guarulhos Airport; Airport infrastructure*



## 1 INTRODUÇÃO

O setor de aviação global enfrenta pressões crescentes para reduzir sua pegada ambiental, principalmente devido à emissão de gases de efeito estufa (GEE). A busca por fontes energéticas sustentáveis tem motivado pesquisas em alternativas como combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), eletrificação e hidrogênio. Este último destaca-se por seu potencial de descarbonização, seja por meio de células a combustível para aeronaves elétricas ou como combustível direto, cujo subproduto da combustão é majoritariamente água. No entanto, a transição para o hidrogênio envolve desafios técnicos e logísticos substanciais, especialmente no que diz respeito ao armazenamento e manuseio em aeroportos. O Aeroporto Internacional de Guarulhos, principal hub aéreo do Brasil, consome cerca de 8 milhões de litros de QAV diariamente, representando um caso emblemático para o estudo da viabilidade de implantação de infraestrutura de hidrogênio.

Este artigo tem como objetivo analisar as condições necessárias para a adoção do hidrogênio como vetor energético no GRU, considerando requisitos de infraestrutura, impactos operacionais e marcos regulatórios. A pesquisa busca contribuir para o debate sobre a descarbonização da aviação brasileira, oferecendo uma análise técnica detalhada dos desafios e oportunidades associados à implementação do hidrogênio em um dos aeroportos mais movimentados da América Latina. Nesse sentido, o estudo também dialoga com a proposta de *Planeta Água*, ao relacionar a transição energética à preservação dos recursos naturais e à mitigação dos impactos ambientais, reforçando a importância do hidrogênio como alternativa estratégica para a sustentabilidade.

O estudo está organizado em cinco seções principais, incluindo esta introdução. A seção 2 apresenta a revisão de literatura; a seção 3 descreve a metodologia utilizada; a seção 4 desenvolve a análise e a discussão dos resultados; a seção 5 traz as conclusões; a seção 6 apresenta as referências bibliográficas.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Aplicação dos combustíveis no setor aéreo

O setor aeroportuário, tanto no Brasil quanto internacionalmente, tem avançado de forma consistente na busca por fontes de energia menos poluentes, investindo em pesquisa científica e tecnológica com o objetivo de reduzir os impactos ambientais da aviação. Atualmente, a maior parte das aeronaves ainda depende do querosene de aviação (QAV) e da gasolina de aviação (AVGAS), combustíveis derivados de fontes fósseis. Embora apresentem boa eficiência de voo, ampla escalabilidade e custos de produção relativamente baixos, esses combustíveis causam significativo impacto ambiental e oferecem riscos à saúde devido à liberação de poluentes nocivos (IATA, 2025).

A aviação conta com diversas alternativas de combustíveis, cada uma com vantagens e limitações nos aspectos ambientais, econômicos e operacionais. Entre essas opções, o SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), produzido a partir de biomassa, destaca-se como a alternativa mais promissora ao QAV. Estudos apontam que o uso do SAF pode reduzir em até 65% as emissões de carbono. Apesar de algumas companhias aéreas internacionais já o utilizarem, sua produção atual atende apenas 0,15% da demanda global, sendo o elevado custo e a dificuldade de escala os principais obstáculos para sua adoção mais ampla (IATA, 2025).

O etanol é outra opção, amplamente usado na aviação agrícola no Brasil, mas seu desempenho inferior ao dos combustíveis fósseis limita sua utilização em aeronaves comerciais de médio e grande porte (Hunt et al., 2023).

No campo da eletrificação, aeronaves equipadas com baterias de íons de lítio vêm se destacando, principalmente em voos de curta distância, em aeronaves de pequeno porte e em veículos de mobilidade aérea urbana. Embora contribuam para a redução direta das emissões, esses sistemas ainda enfrentam limitações de autonomia e



impactos ambientais relacionados à fabricação e descarte das baterias (Dziwulski, Ribeiro e Basílio, 2025).

O hidrogênio também tem recebido atenção como vetor energético promissor para a aviação. Apesar de seu uso ainda ser experimental, apresenta grande potencial na redução de emissões e está sendo testado em diferentes formas de aplicação, incluindo células de combustível e combustão direta (Hunt et al., 2023).

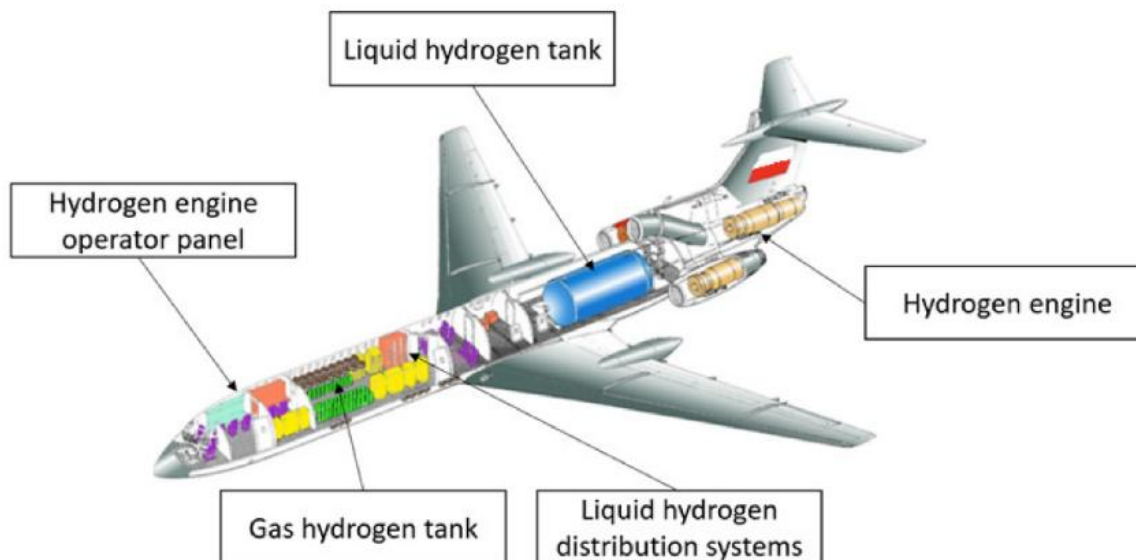
De maneira geral, a seleção de combustíveis para aviação depende de múltiplos fatores, como níveis de emissão de poluentes, autonomia de voo, exigências de manutenção, custos operacionais e conformidade regulatória. Esses critérios influenciam não apenas a viabilidade técnica, mas também a sustentabilidade econômica e ambiental das alternativas disponíveis (IATA, 2025).

## **2.2 Hidrogênio como Fonte de Energia para Aeronaves**

A indústria da aviação vem investigando o hidrogênio ( $H_2$ ) como fonte de energia para aeronaves, tanto em forma líquida quanto gasosa, podendo ser utilizado diretamente em turbinas ou em células a combustível para aeronaves com propostas de eletrificação parcial ou total. O hidrogênio se destaca como uma alternativa promissora na transição energética do setor aéreo, principalmente por dois motivos: sua produção e utilização não geram emissões diretas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), posicionando-o como uma opção sustentável frente aos combustíveis fósseis (Rodrigues, 2010).

Os estudos sobre o uso do hidrogênio na aviação remontam ao final da década de 1970. Em 1988, a União Soviética realizou o primeiro voo experimental da aeronave Tupolev TU-155 (Figura 1), abastecida com hidrogênio liquefeito para combustão direta em seus motores. O projeto comprovou a viabilidade técnica da solução, mas também evidenciou desafios significativos: o sistema de hidrogênio ocupava cerca de dois terços da aeronave e demandava refrigeração constante a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , destacando as dificuldades inerentes ao armazenamento criogênico (Tupolev, 2013).

Figura 1 – Diagrama do Sistema de hidrogênio do TU- 155



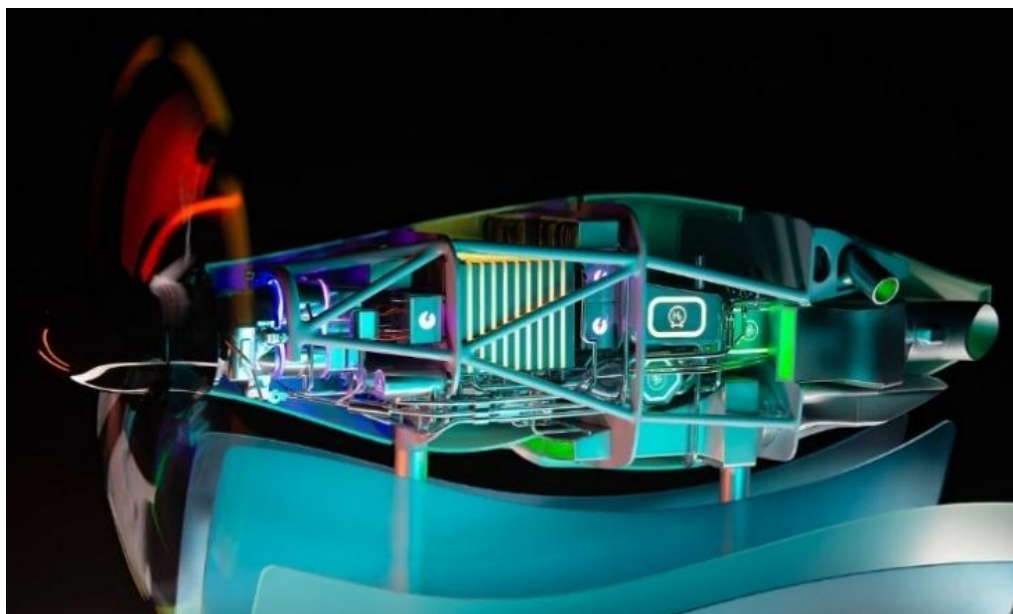
Fonte: Lukasz elt. MDPI (2024)

Atualmente, empresas como Airbus e Boeing estão desenvolvendo protótipos e realizando testes de motores híbridos e de células a combustível (EASA, 2022). A Airbus lidera a inovação tecnológica em propulsão a hidrogênio, conduzindo desde 2022 testes de motores e sistemas de combustível em uma aeronave A-380 adaptada. Os motores, projetados em parceria com a Safran e a General Electric Aviation, combinam tecnologia híbrida, utilizando hidrogênio liquefeito como combustível e células de combustível (Airbus, 2022).

Durante o Airbus Summit 2025, foi apresentado um dos motores em desenvolvimento (Figura 2), um turboélice híbrido composto por quatro mini motores elétricos, alimentados pela energia gerada pelas células de combustível, que recebem hidrogênio liquefeito armazenado em tanques criogênicos. Este sistema é capaz de gerar 1,3 MW de potência, permitindo à Airbus operar aeronaves de até 100 passageiros com autonomia igual ou superior a 1.000 milhas náuticas. A empresa projeta realizar testes em uma aeronave totalmente operada com motor a hidrogênio entre 2027 e 2028, com a

meta de fabricar aeronaves de emissão zero entre 2030 e 2035 (Dziwulski, Ribeiro e Basílio, 2025).

Figura 2 – Motor turboélice híbrido desenvolvido pela Airbus



Fonte: travelnewsasia (2025)

Segundo a avaliação da EASA, o hidrogênio líquido oferece vantagens significativas na redução de emissões, mas apresenta limitações quanto ao espaço necessário para armazenamento e à complexidade da infraestrutura requerida. Por outro lado, o hidrogênio gasoso, embora mais fácil de manusear, exige tanques de maior volume e sistemas de compressão avançados (EASA, 2022). Os resultados dessa análise foram sintetizados no Quadro 1, apresentando visualmente os níveis de benefício de cada forma de hidrogênio.

Quadro 1 – Diagrama dos benefícios do H<sub>2</sub>

|                                                                                                                | Emissão de CO <sub>2</sub>                                                         | Volume de combustível                                                                | Infraestrutura e Logística                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Célula de hidrogênio líquido.                                                                                  |   |   |   |
| Hidrogênio Líquido para combustão                                                                              |   |   |   |
| Célula de hidrogênio gasoso.                                                                                   |   |   |   |
| Hidrogênio Gasoso para combustão                                                                               |  |  |  |
| Legenda de cores: Verde (benefício elevado), Amarelo (benefício moderado) e vermelho (benefício insuficiente). |                                                                                    |                                                                                      |                                                                                      |

Fonte: Adaptada de EASA (2022)

Sob o ponto de vista energético, o hidrogênio apresenta elevada densidade por massa, atingindo 120 MJ/kg, em comparação com os 44 MJ/kg do querosene de aviação (QAV). Entretanto, quando convertido para o estado líquido, essa vantagem diminui consideravelmente: o hidrogênio líquido alcança apenas 23,7% da eficiência energética por litro do QAV, configurando-se como um dos principais desafios para sua aplicação em voos de média e longa distância (Camargo, 2021).

Goldmann et al. (2018) realizaram um estudo comparativo entre o combustível fóssil Jet A-1 e os eletrocombustíveis destinados à aviação (Quadro 2), considerando como critério principal a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Nesse contexto, o hidrogênio (H<sub>2</sub>) se destaca pelo seu potencial de descarbonização, embora sua baixa densidade de energia volumétrica represente um obstáculo para o armazenamento. As estratégias mais viáveis para superar essa limitação incluem a compressão do gás ou sua liquefação.

Quadro 2: Comparação entre Combustível Jet A-1 e Hidrogênio

| Propriedade                | Jet A-1        | H <sub>2</sub> |
|----------------------------|----------------|----------------|
| Emissão de CO <sub>2</sub> | Insatisfatório | Excelente      |
| Energia Específica         | Satisfatório   | Excelente      |
| Densidade Energética       | Excelente      | Insatisfatório |
| Armazenamento              | Excelente      | Insatisfatório |
| Toxicidade                 | Satisfatório   | Excelente      |
| Propriedade de Combustão   | Excelente      | Excelente      |
| Capacidade de Drop-in      | Excelente      | Desafiador     |
| Potência de saída          | Satisfatório   | Excelente      |
| Considerações estruturais  | Satisfatório   | Desafiador     |

Fonte: Adaptado de Goldmann, et.al. MDPI A Study on Electrofuels in Aviation (researchgate.net) Disponível online: [https:// www.mdpi.com/](https://www.mdpi.com/)

Segundo Santos (2023), para alcançar a mesma eficiência energética de um litro de querosene de aviação, seriam necessários 3.000 litros de hidrogênio gasoso ou apenas quatro litros de hidrogênio liquefeito.

### 2.3 Desafios de Armazenamento de Hidrogênio em Aeroportos

Conforme apontam Tashie e Nnabuife (2021), o armazenamento de hidrogênio (H<sub>2</sub>) é um fator crítico no processo de conversão em energia, e cada forma do gás apresenta vantagens e limitações específicas. O hidrogênio pode ser armazenado nos estados gasoso, líquido ou sólido, sendo que cada condição demanda infraestrutura distinta, especialmente em relação à temperatura e pressão. Dessa forma, a escolha do método de armazenamento deve equilibrar viabilidade técnica e econômica com critérios rigorosos de segurança operacional.

Nesse contexto, dois desafios principais se destacam para a implementação do hidrogênio em aeroportos: o elevado volume necessário para armazenamento e as exigências de refrigeração no caso do hidrogênio líquido. Isso exige tecnologias avançadas de isolamento térmico entre os tanques e o ambiente externo, capazes de suportar temperaturas criogênicas extremas e ciclos térmicos sazonais (Hunt et al., 2023).

No estado líquido, a principal limitação é o alto consumo energético contínuo necessário para manter a refrigeração a -253 °C. Os tanques precisam de barreiras espessas com



proteção criogênica para evitar perdas por evaporação (boil-off) e impedir o congelamento de partículas atmosféricas em contato com a superfície externa. Em contraste, combustíveis fósseis como o querosene de aviação (QAV) permanecem estáveis em temperatura ambiente e exigem apenas energia para bombeamento durante a distribuição (Hunt et al., 2023).

Em maior escala, duas alternativas de armazenamento têm sido estudadas. A primeira consiste no armazenamento gasoso, por meio da compressão em tanques subterrâneos ou cavernas de sal, que necessitam de paredes resistentes e isolamento para suportar altas pressões e controlar o aquecimento. A segunda alternativa envolve a conversão do hidrogênio em amônia, que facilita transporte e armazenamento devido à maior densidade energética e estabilidade em estado líquido. Entretanto, essa rota apresenta desvantagens significativas, como alto consumo de energia nos processos de síntese e craqueamento, além da toxicidade e corrosividade da amônia, exigindo medidas rigorosas de segurança ocupacional e ambiental (Hunt et al., 2023).

Paralelamente às pesquisas sobre métodos de armazenamento, iniciativas de infraestrutura já estão sendo implementadas no setor. A Airbus (2022) firmou duas parcerias estratégicas para impulsionar o programa ZEROe, voltado ao desenvolvimento de aeronaves movidas a hidrogênio. A primeira, com a Ariane Group, especializada no uso de hidrogênio na indústria aeroespacial, prevê a instalação de uma estação de abastecimento para o A380 adaptado no Aeroporto de Toulouse, França (Figura 3). A segunda parceria, com a Kansai Airports, responsável pela gestão de três aeroportos no Japão, busca transformar o Aeroporto Internacional de Kansai em um hub de hidrogênio, com capacidade de armazenamento potencialmente na ordem de centenas de toneladas. Em ambos os casos, informações detalhadas sobre volume armazenado, sistemas de refrigeração e consumo específico ainda não foram divulgadas.

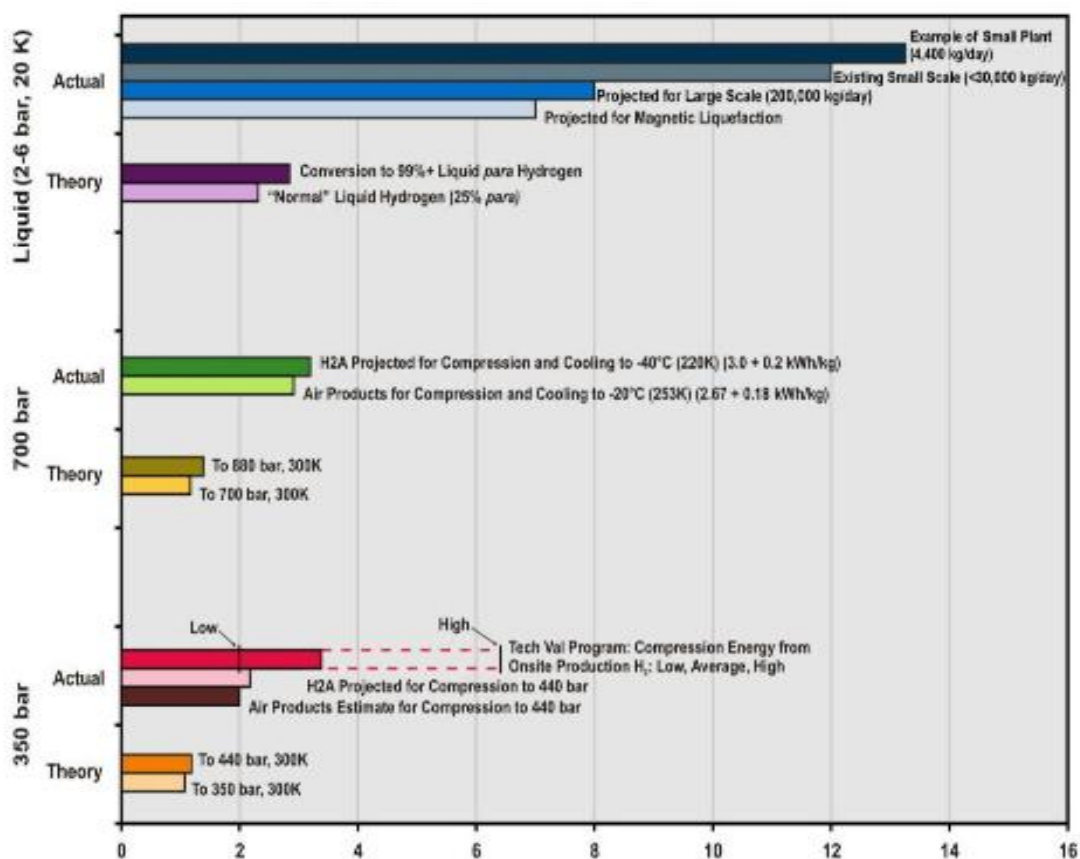
Figura 3: Conceito da estação de abastecimento desenvolvido pela Ariane Group



Fonte: Airbus/ArianeGroup (2022)

Outro aspecto importante na utilização do hidrogênio na aviação é o elevado consumo energético envolvido em seu processamento. Segundo Hunt et al. (2023), a liquefação do hidrogênio requer aproximadamente 14 kWh por quilograma (Figura 4). No entanto, esse consumo tende a diminuir gradualmente à medida que a escala de produção aumenta, indicando que projetos de maior porte podem alcançar ganhos significativos de eficiência.

Figura 4 – Energia necessária para o armazenamento do hidrogênio em diferentes estados



Fonte: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2009

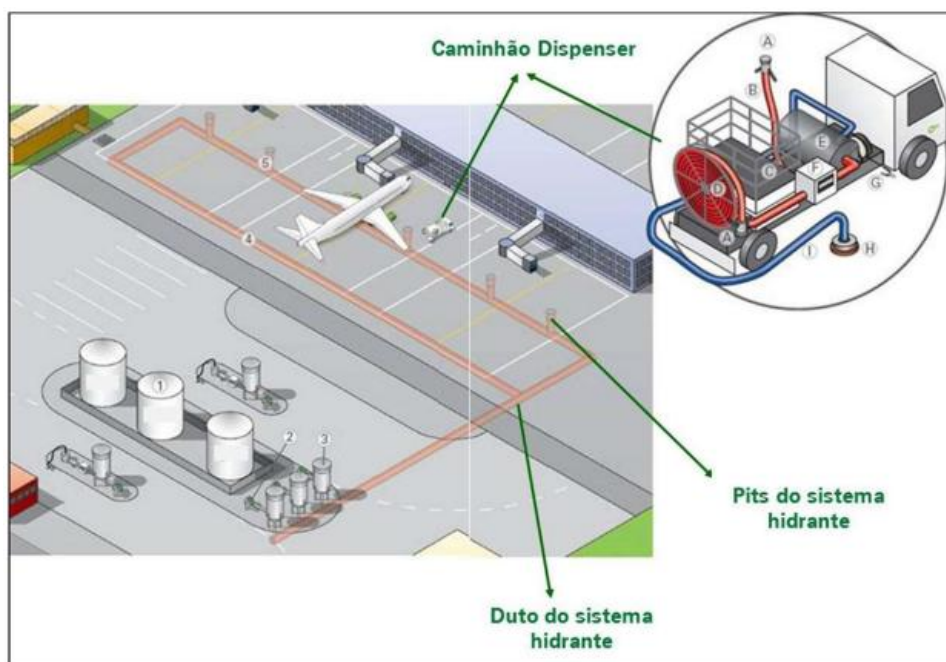
## 2.4 ABASTECIMENTO DE AERONAVES NO AEROPORTO DE GUARULHOS

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (GRU) conta atualmente com uma infraestrutura consolidada para o abastecimento de querosene de aviação (QAV), incluindo uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 55 milhões de litros distribuídos em sete tanques no centro de distribuição, localizado próximo à cabeceira da pista 10R, ocupando uma área de cerca de 13.500 m<sup>2</sup> (CNT, 2018; GRU Airport, 2023).

O aeroporto também possui um sistema de hidrantes (SVR) com 188 pontos de

conexão (pits) para fornecimento direto às aeronaves (Figura 4), interligados por uma rede de 9,5 km de dutos subterrâneos que conectam o centro de armazenamento às posições de estacionamento (CNT, 2018).

Figura 4 - Ilustração do sistema servidores de hidrante SVR



Fonte: Associação das Distribuidoras de Combustíveis, Lubrificantes, Logística e Conveniência - Plural / Diretoria de Aviação (2019)

De acordo com a regulamentação vigente, o GRU deve manter um estoque estratégico de combustível equivalente a três dias de operação, totalizando cerca de 32 milhões de litros, garantindo resiliência frente a eventuais falhas no fornecimento (CNT, 2018). O abastecimento das aeronaves é realizado por caminhões-tanque abastecedores (CTAs), com capacidade de 28 mil litros, abastecidos no centro de distribuição e transportados até os aviões, além do fornecimento direto pelo sistema de hidrantes (SVR) (CNT, 2018).

A substituição desse sistema pelo uso de hidrogênio representa um desafio logístico considerável, especialmente devido à diferença de densidade energética volumétrica entre o QAV e o hidrogênio líquido. Estima-se que seriam necessários



aproximadamente 96 milhões de litros de hidrogênio líquido para suprir o estoque estratégico de três dias do GRU, exigindo a instalação de até oito tanques criogênicos de grande porte, semelhantes aos utilizados pela NASA, com capacidade de 4.300 m<sup>3</sup> cada (NASA, 2022). O Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (2017) projeta uma demanda de 300.000 m<sup>3</sup> de hidrogênio, e a Kawasaki (2020) anunciou dois projetos de armazenamento de grande escala: um tanque esférico de 30 m de altura por 30 m de diâmetro, com capacidade para 10.000 m<sup>3</sup>, e outro cilíndrico de 60 m de altura por 50 m de diâmetro, com capacidade de 50.000 m<sup>3</sup>.

Para uma eventual transição ao hidrogênio, duas abordagens principais podem ser consideradas:

a)

Adaptação do sistema existente: Modificação da infraestrutura atual de SVR para operar com hidrogênio, incluindo substituição de materiais para compatibilidade com o combustível, instalação de sistemas adicionais de refrigeração e pressurização e implementação de protocolos de segurança específicos (Hunt et al., 2023);

b) Sistema dedicado em paralelo: Desenvolvimento de infraestrutura exclusiva para hidrogênio, operando em paralelo com o sistema de QAV durante o período de transição.

Independentemente da abordagem adotada, o abastecimento de aeronaves movidas a hidrogênio apresenta desafios operacionais importantes. O tempo de abastecimento tende a ser maior devido às condições de baixa temperatura e alta pressão, impactando os tempos de turnaround das aeronaves. Além disso, a operação requer treinamento especializado das equipes de solo e a criação de procedimentos operacionais padronizados, garantindo segurança e eficiência durante o processo (EASA, 2022).



### **3. METODOLOGIA**

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa e bibliográfica, baseada em uma revisão sistemática da literatura técnica e científica. Foram consultadas bases de dados como Google Scholar e SciELO, além de relatórios de entidades setoriais, como ICAO, IATA, ANAC, e fabricantes aeronáuticos. A análise seguiu uma abordagem temática, estruturada em quatro eixos principais:

- a) A sustentabilidade e transição energética na aviação;
- b) hidrogênio como fonte alternativa de energia;
- c) Viabilidade técnica e logística no contexto aeroportuário brasileiro;
- d) Perspectivas e desafios para o Aeroporto de Guarulhos.

A metodologia também incluiu análise comparativa de estudos de caso internacionais, modelagem de requisitos de infraestrutura com base em parâmetros técnicos da literatura, e avaliação dos impactos operacionais por meio da simulação de diferentes cenários. Foram realizados cálculos para dimensionamento da infraestrutura considerando o consumo atual de QAV do aeroporto e as características técnicas do hidrogênio, em diferentes estados de armazenamento (líquido e gasoso) e eficiências de conversão energética.

A ausência de dados primários junto a gestores do aeroporto e distribuidoras de combustível constitui uma limitação da pesquisa, restringindo a análise a fontes secundárias. Ainda assim, a sistematização das informações disponíveis possibilita uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades relacionados à implementação do hidrogênio no Aeroporto de Guarulhos.

### **4. Análises de Resultados e Discussão**

Os resultados deste estudo evidenciam que a infraestrutura aeroportuária global ainda apresenta limitações significativas para a adoção plena do hidrogênio em suas operações, apesar



de o combustível se configurar como uma alternativa promissora para a descarbonização da aviação. O hidrogênio impõe desafios relevantes que demandam avanços contínuos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e infraestrutura especializada.

As tecnologias de células a combustível estão mais desenvolvidas, porém sua aplicação atual é restrita a aeronaves de pequeno porte, que, no curto prazo, não conseguem atender à demanda de aeronaves maiores, limitando a viabilidade de adoção imediata em voos comerciais de média e longa distância.

O Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos (GRU) consome cerca de 8 milhões de litros de QAV por dia (CNT, 2018). Considerando a conversão volumétrica, a utilização equivalente de hidrogênio líquido demandaria aproximadamente 32 milhões de litros por dia. Além disso, a regulamentação exige que o aeroporto mantenha um estoque estratégico para três dias de operação, o que implicaria cerca de 144 milhões de litros de  $H_2$  líquido ou 144 mil metros cúbicos, enquanto a capacidade de armazenamento atual é de apenas 55 milhões de litros de QAV. A tabela 1 sintetiza essas informações.

Tabela 1 – Comparação do consumo e estoque do QAV e H<sub>2</sub> no Aeroporto de Guarulhos

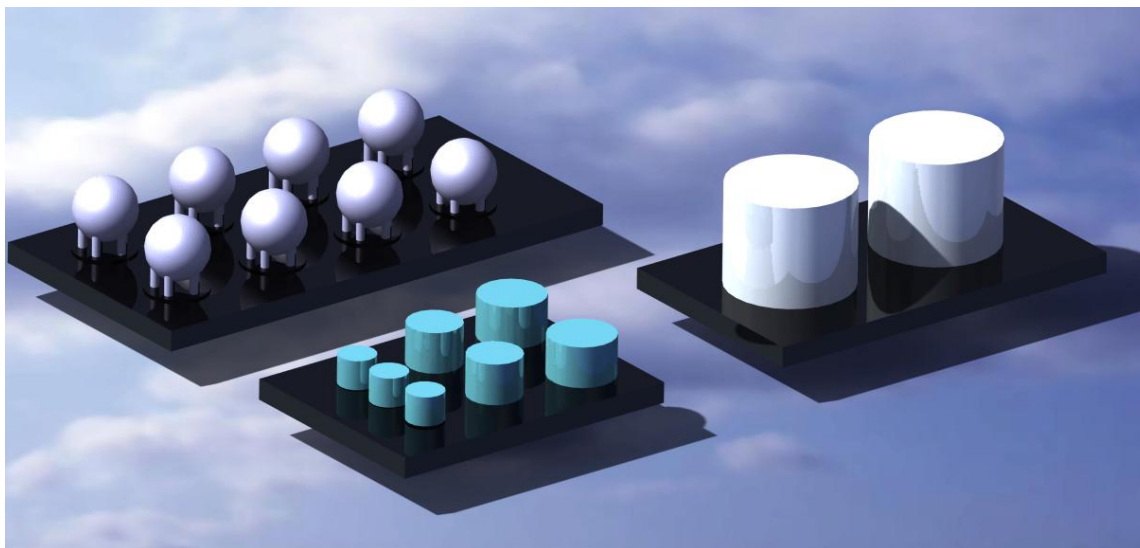
| Parâmetro                                       | QAV                                                     | H <sub>2</sub> Líquido (equivalente)                                     |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Consumo diário                                  | 8.000.000 L                                             | 32.000.000 L                                                             |
| Estoque estratégico para 3 dias                 | 24.000.000 L                                            | 96.000.000 L                                                             |
| Capacidade atual de armazenamento no aeroporto  | 55.000.000 L                                            | N/A                                                                      |
| Diferença entre estoque necessário e capacidade | –                                                       | +41.000.000 L (necessário)                                               |
| Observação                                      | Sistema existente atende à demanda diária e estratégica | Exige ampliação de tanques, sistemas criogênicos e adaptações logísticas |

Fonte: Do autor (2025)

Os volumes de hidrogênio foram calculados com base na equivalência energética volumétrica em relação ao QAV, conforme os dados apresentados no estudo. O quadro evidencia que seria necessário aproximadamente o dobro do volume de armazenamento, ressaltando a inviabilidade estrutural de uma transição imediata para o hidrogênio.

Além disso, conforme ilustrado na Figura 5, onde os cilindros azuis representam os tanques de armazenamento atualmente utilizados pelo Aeroporto de Guarulhos, observa-se uma diferença significativa na área ocupada em comparação aos oito tanques esféricos semelhantes aos empregados pela NASA e aos dois tanques cilíndricos em desenvolvimento pela Kawasaki. A área necessária aumentaria de aproximadamente 15.000 m<sup>2</sup> para 19.000 m<sup>2</sup> com o uso dos cilindros da Kawasaki e para 23.000 m<sup>2</sup> utilizando os tanques esféricos, considerando apenas as distâncias de segurança recomendadas pela ABNT NBR 7505-1 (2003).

Figura 5: Comparação da proporcionalidade de área necessária para abastecimento



Fonte: Do autor (2025)

A adoção do hidrogênio exigiria mudanças profundas na logística e na infraestrutura de armazenamento do aeroporto, incluindo a expansão dos tanques, a instalação de sistemas de refrigeração e pressurização, bem como a adaptação de procedimentos de segurança e operação. Essas modificações demandariam investimentos financeiros e tecnológicos significativos, evidenciando que a transição para o hidrogênio dependerá de um planejamento estratégico de longo prazo, aliado ao desenvolvimento de infraestrutura adequada e à colaboração entre fabricantes, operadores e órgãos reguladores.

Assim, embora o hidrogênio configure uma alternativa sustentável com potencial para reduzir de forma expressiva as emissões de CO<sub>2</sub>, sua implementação no setor aéreo ainda enfrenta barreiras técnicas e econômicas relevantes, especialmente em aeroportos de grande porte e para aeronaves comerciais de maior capacidade.

## 5. CONCLUSÃO

O setor aéreo enfrenta desafios consideráveis para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que combustíveis fósseis, como o querosene de aviação (QAV), continuam amplamente utilizados devido à sua eficiência energética, escala de produção e infraestrutura consolidada. Alternativas como o SAF (Sustainable Aviation Fuel) e o etanol oferecem benefícios ambientais, mas ainda apresentam limitações quanto à disponibilidade e capacidade de produção em larga escala.

O hidrogênio surge como uma alternativa promissora para a transição energética na aviação, com emissão zero de CO<sub>2</sub> em sua utilização, seja por combustão direta ou por meio de células a combustível. No entanto, sua adoção enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados à baixa densidade volumétrica, à necessidade de liquefação ou compressão e às rigorosas exigências de armazenamento criogênico, que demandam investimentos elevados em infraestrutura e medidas de segurança.

A análise do abastecimento no Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos evidencia que a transição para o hidrogênio exigiria expansão da capacidade de armazenamento, adaptação dos sistemas existentes e treinamento especializado das equipes de solo. Embora o hidrogênio apresente maior densidade energética por massa em comparação ao QAV, a limitação volumétrica complica a logística, sobretudo para voos de média e longa distância.

Portanto, a implementação completa do hidrogênio como combustível de aviação dependerá de avanços tecnológicos, investimentos em infraestrutura, regulamentação adequada e parcerias estratégicas entre aeroportos, fabricantes e órgãos reguladores. Apesar das dificuldades, o hidrogênio desponta como uma alternativa sustentável e viável, com potencial significativo para contribuir para a descarbonização do setor aéreo nas próximas décadas. Como medida de implementação em curto prazo, o aeroporto poderia adotar um modelo híbrido, escalonando sua utilização conforme a demanda. Inicialmente, o tanque desenvolvido pela NASA permitiria uma implantação rápida,



podendo, posteriormente, incorporar os tanques propostos pela Kawasaki para atender a pelo menos 50% das necessidades operacionais.

## REFERÊNCIAS

AN, A. B. **Airbus Plans A380 Hydrogen Flights In 2026 After Successful Power On Of ZEROe Engine**. Disponível em: <<https://simpleflying.com/airbus-a380-hydrogen-flight-zeroe-power-on/>>. Acesso em: 17 mar. 2025.

AIRBUS. **Airbus and Kansai Airports partner to study the use of hydrogen in the decarbonisation of the aviation sector in Japan | Airbus**. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-06-airbus-and-kansai-airports-partner-to-study-the-use-of-hydrogen-in>>. Acesso em: 11 abr. 2025.

AIRBUS. **Airbus Prepares for Its First megawatt-class Hydrogen fuel-cell Engine flight-test Demonstrator... | Airbus**. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-11-airbus-prepares-for-its-first-megawatt-class-hydrogen-fuel-cell-engine>>. Acesso em: 11 abr. 2025.

AIRBUS. **ZEROe: our hydrogen-powered aircraft**. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe-our-hydrogen-powered-aircraft>>. Acesso em: 20 set. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7505-1: Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis**. Disponível em: <<http://ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-7505-00-Armazenagem-de-L%C3%ADquidos-Inflam%C3%A1veis-e-Combustíveis-Parte-1.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2025.

BOEING. **WHAT'S NEXT ? BOEING'S HYDROGEN DEMONSTRATION PROJECTS**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/pdf/Hydrogen\\_Factsheet.pdf](https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/pdf/Hydrogen_Factsheet.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2025.



CAMARGO, Antônio Á.S. **Faz sentido pensar em etanol como fonte sustentável de hidrogênio verde – H2V?** Rio de Janeiro: GESEL/UFRJ, 19 nov. 2021. 5 p. Disponível em:

<[https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/06/10\\_Camargo\\_2021\\_11\\_19.pdf](https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/06/10_Camargo_2021_11_19.pdf)>.

Acesso em: 12 set. 2025.

CNT. *Confederação Nacional dos Transportes*. **Saiba como funciona o abastecimento em dois dos maiores aeroportos do Brasil**. Disponível em:

<<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/saiba-como-funciona-abastecimento-maiores-aeroportos>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

EASA (EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY). **Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050**. Cologne: EASA, 2022. Disponível em: <

[https://horizoneuropencpportal.eu/sites/default/files/2023-09/chju-hydrogen-powered-aviation-2020\\_0.pdf](https://horizoneuropencpportal.eu/sites/default/files/2023-09/chju-hydrogen-powered-aviation-2020_0.pdf)>. Acesso em: 17 maio 2025.

DZIWULSKI, Edimar; RIBEIRO, Wesler Fonseca; BASILIO, Flávio Leopoldo. AVANÇANDO PARA O AZUL: VIABILIDADE E IMPACTOS DOS AVIÕES ZEROe DA AIRBUS MOVIDOS A HIDROGÊNIO: MOVING TOWARDS THE BLUE: FEASIBILITY AND IMPACTS OF AIRBUS ZEROe HYDROGEN-POWERED AIRCRAFT. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 27–56, 2025. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/293>. Acesso em: 20 set. 2025

GRU AIRPORT. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. Guarulhos: Concessionária do Aeroporto Internacional de Guarulhos, 2023. Disponível em:

<<https://www.gru.com.br>> Acesso em: 20 set. 2025.

HUNT, Julian et al. **Aspectos sobre o armazenamento e transporte de hidrogênio**. Brasília, DF: La SUSFAU, 2023. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/378078577>>. Acesso em: 17 set. 2025.

IATA – INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Net Zero by 2050: Sustainable Aviation Fuel (SAF) Update**. Montreal: IATA, 2025. Disponível em:

<<https://www.iata.org/en/programs/sustainability/>>. Acesso em 25 abr. 2025



JANGOULUN SINGSIT. ***Airbus, Kansai Airports, and Kawasaki assess hydrogen infrastructure feasibility in Japan.*** Disponível em: <https://www.airport-technology.com/news/airbus-kansai-airports-kawasaki/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES. ***World's first liquefied hydrogen carrier. Kobe: Kawasaki, 2020.*** Disponível em: <https://global.kawasaki.com>. Acesso em: 20 set. 2025.

RODRIGUES, R. A. ***Célula de hidrogênio: construção, aplicações e benefícios. Revista Brasileira de Gestão e Engenharia, p. 47–62, 2010.*** Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20190915074128/https://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia/article/viewFile/25/19>>. Acesso em: 6 set. 2025.

SANTOS, Cayo C. N. ***O hidrogênio é o futuro da aviação? Blog da Engenharia, 21 abr. 2023.*** Disponível em: <<https://blogdaengenharia.com/engenharia/o-hidrogenio-e-o-futuro-da-aviacao/>>. Acesso em: 16 set. 2025.

SANTOS, Vanessa Sardinha dos. ***"Criogenia"; Brasil Escola.*** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/criogenia.htm>. Acesso em 26 de setembro de 2025.

TASHIE-LEWIS, Bernard Chukwudi; NNABUIFE. ***Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy – A Technology Review. Chemical Engineering Journal Advances, v. 8, n. 2, artigo 100172, 2021. DOI: 10.1016/j.cej.2021.100172.*** Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/354095593\\_Hydrogen\\_Production\\_Distribution\\_Storage\\_and\\_Power\\_Conversion\\_in\\_a\\_Hydrogen\\_Economy\\_-\\_A\\_Technology\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/354095593_Hydrogen_Production_Distribution_Storage_and_Power_Conversion_in_a_Hydrogen_Economy_-_A_Technology_Review)>. Acesso em: 12 set. 2025.

TUPOLEV. ***Development of Cryogenic Fuel Aircraft, Feb. 2013.*** Disponível em: <https://web.archive.org/web/20130218231656/http://www.tupolev.ru/English/Show.asp?SectionID=82>. Acesso em: 6 set. 2025.



Eu, Matheus Ferreira Alves Say, responsável pelo projeto científico intitulado “HIDROGÊNIO COMO VETOR DE SUSTENTABILIDADE NA AVIAÇÃO: PERSPECTIVAS PARA O AEROPORTO DE GUARULHOS”, declaro para os devidos fins que:

( X ) Houve utilização de ferramentas de Inteligência Artificial durante o desenvolvimento deste projeto, conforme descrito no quadro abaixo:

| <b>Etapa do projeto</b> | <b>Ferramenta de IA utilizada</b> | <b>Descrição do uso</b>                                     | <b>Nº da página</b> |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|
| Indrodução              | Chat GPT                          | Usado como apoio na escrita de maneira técnica e descritiva | 3                   |
| Discussões e Resultados | Chat GPT                          | Elaboração do quadro 3                                      | 17                  |

Ressalto que todas as informações geradas por IA foram devidamente revisadas e validadas por mim, garantindo a integridade e a veracidade dos resultados apresentados.