



ARTIGO ORIGINAL

**Hidrogênio na aviação sustentável: Viabilidade e desafios no Aeroporto
Internacional de São Paulo/Guarulhos**

**Hydrogen in Sustainable Aviation: Feasibility and Challenges at São
Paulo/Guarulhos International Airport**

Matheus Ferreira Alves Say¹, Andreza Santos Feitoza², Edson Demétrio Leal³

Avaliação: *Double Blind Review* (059/OJS)

Recebido: 10/12/2025 Aceito: 30/12/2025

Palavras-chave:

hidrogênio de aviação;
Aeroporto Guarulhos;
infraestrutura aeroportuária.

Resumo: O setor aéreo enfrenta crescente pressão para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, impulsionando a busca por alternativas energéticas mais limpas. Nesse contexto, o hidrogênio surge como vetor promissor para a descarbonização da aviação, por seu potencial de utilização em estado líquido, gasoso ou em células de combustível, com baixa ou nula emissão de poluentes. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da adoção do hidrogênio no Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos, identificando desafios técnicos, logísticos e operacionais associados à substituição do querosene de aviação (QAV). Metodologicamente, a pesquisa analisa os impactos da substituição do querosene de aviação (QAV) pelo hidrogênio, considerando aspectos logísticos, de infraestrutura e de segurança operacional. Por meio de revisão bibliográfica sistemática e análise comparativa de iniciativas internacionais, o trabalho explora alternativas de aplicação do hidrogênio em seus diferentes estados físicos e seus efeitos sobre a cadeia de abastecimento aeroportuária. Os resultados evidenciam que, embora o hidrogênio represente uma alternativa ambientalmente vantajosa, sua implementação em aeroportos de grande porte demanda reestruturações significativas em termos de armazenamento criogênico, ampliação da capacidade volumétrica e adaptação da cadeia de abastecimento. Conclui-se que, embora promissor, o hidrogênio demanda investimentos significativos em infraestrutura criogênica e adaptações operacionais, especialmente em aeroportos de grande porte como o GRU.

Keywords:

aviation hydrogen;
Guarulhos airport;
airport infrastructure.

Abstract: The aviation sector faces growing pressure to reduce its greenhouse gas emissions, driving the search for cleaner energy alternatives. In this context, hydrogen emerges as a promising vector for aviation decarbonization, given its potential use in liquid, gaseous, or fuel cell form, with low or zero pollutant emissions. This study aims to evaluate the feasibility of adopting hydrogen at São Paulo/Guarulhos International Airport, identifying the technical, logistical, and operational challenges associated with replacing aviation kerosene (Jet A-1). Methodologically, the research analyzes the impacts of replacing aviation kerosene with hydrogen, considering logistical, infrastructural, and operational safety aspects. Through a systematic literature review and comparative analysis of international initiatives, the study explores alternatives for hydrogen application in its different physical states and its effects on the airport supply chain. The results show that, although hydrogen represents an environmentally advantageous alternative, its implementation in large airports requires significant restructuring in terms of cryogenic storage, increased volumetric capacity, and adaptation of the supply chain. It is concluded that, while promising, hydrogen adoption demands substantial investments in cryogenic infrastructure and operational adjustments, particularly in large-scale airports such as GRU.

URL: https://mobicities.com/index.php/path/article/view/59/Artigo_3

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18110936>

¹ Fatec Guarulhos, e-mail: saymatheus@gmail.com

² Fatec Guarulhos, e-mail: andrezafeitoza@fatec.sp.gov.br

³ Fatec Guarulhos, e-mail: edson.demetrio@gmail.com

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.

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. Estado da arte

2.1 Aplicação dos combustíveis no setor aéreo

O setor aeroportuário, no Brasil e no mundo, tem avançado de forma significativa na busca por alternativas energéticas menos poluentes, investindo em pesquisa científica e tecnológica para reduzir o impacto ambiental da aviação. Atualmente, a maior parte das aeronaves utiliza querosene de aviação (QAV) e gasolina de aviação (AVGAS), ambos derivados de combustíveis fósseis. Apesar de oferecerem alta eficiência de voo, escalabilidade e custos relativamente baixos de produção, esses combustíveis apresentam elevada agressividade ambiental e riscos à saúde humana, em razão da emissão de poluentes nocivos (IATA, 2025).

A aviação dispõe de diferentes opções de combustíveis, cada uma com benefícios e limitações em termos ambientais, econômicos e operacionais. Entre elas, destaca-se o SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), produzido a partir de biomassa,

considerado a alternativa mais promissora ao QAV. Estudos apontam que o SAF pode reduzir em até 65% as emissões de carbono. Algumas companhias aéreas internacionais já iniciaram sua adoção, mas atualmente sua produção representa apenas 0,15% da demanda global, sendo o elevado custo e as dificuldades de escalabilidade os principais entraves à sua expansão (IATA, 2025).

Uma alternativa é o etanol, utilizado principalmente na aviação agrícola no Brasil. Entretanto, apresenta desempenho inferior em comparação aos combustíveis fósseis, o que limita sua aplicação em aeronaves comerciais de médio e grande porte (Hunt et al., 2023).

No campo da eletrificação aeronáutica, as aeronaves movidas a baterias de íons de lítio vêm ganhando espaço, sobretudo em voos curtos e aeronaves de pequeno porte, além de veículos de mobilidade aérea urbana. Apesar de contribuírem para a redução direta de emissões, esses sistemas ainda enfrentam desafios relacionados à autonomia limitada e aos impactos ambientais associados à produção e ao descarte das baterias (Dziwulski et al., 2025).

Também merece destaque o avanço dos estudos com hidrogênio como vetor energético para a aviação. Embora sua aplicação prática ainda seja restrita, devido ao estágio experimental em que se encontra, o hidrogênio apresenta grande potencial de redução de emissões e vem sendo testado em diferentes formatos, como células de combustível ou combustão direta (Hunt et al., 2023).

De modo geral, a escolha e validação de combustíveis no setor aéreo dependem de múltiplos fatores, tais como: níveis de emissões poluentes, autonomia de voo (medida em milhas náuticas), requisitos de manutenção, custos operacionais e conformidade regulatória. Esses critérios determinam não apenas a viabilidade técnica, mas também a sustentabilidade econômica e ambiental das alternativas em estudo (IATA, 2025).

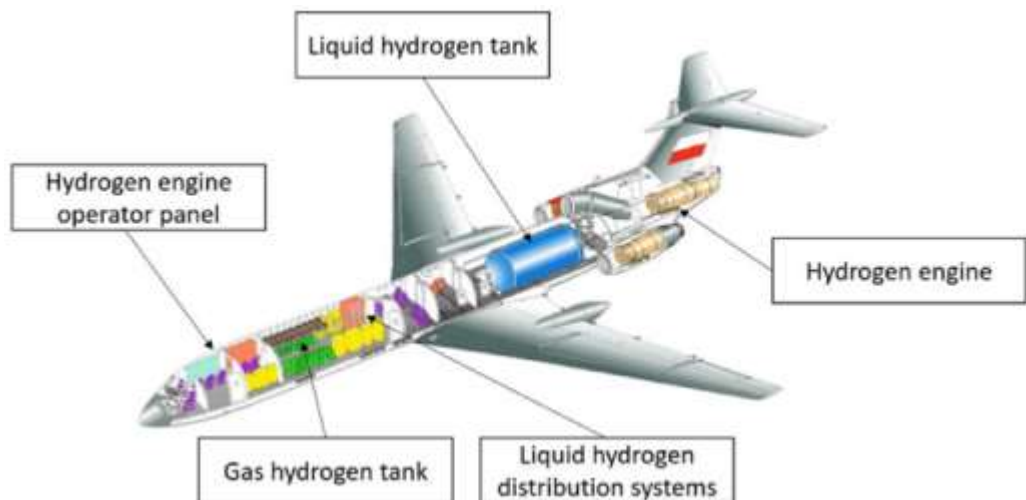
2.2 Hidrogênio como fonte de energia para aeronaves

A indústria aérea tem estudado a aplicação do hidrogênio (H₂) como fonte de energia em aeronaves, tanto em estado líquido quanto gasoso, podendo ser utilizado como combustível em turbinas ou em células a combustível para aeronaves com propostas de eletrificação parcial ou total. O hidrogênio se destaca como uma solução promissora para a transição energética no setor aéreo por dois fatores principais: sua produção e consumo podem ser realizados sem a emissão direta de dióxido de carbono (CO₂), configurando-se como alternativa sustentável aos combustíveis fósseis (Rodrigues, 2010).

As pesquisas e estudos sobre o uso de hidrogênio na aviação datam do final da década de 1970. Em 1988, a União Soviética realizou o primeiro voo

experimental com a aeronave Tupolev TU-155 (Figura 1), abastecida com hidrogênio liquefeito para combustão direta em seus motores. O projeto demonstrou a viabilidade técnica, mas apresentou limitações: todo o sistema de hidrogênio ocupava cerca de dois terços da aeronave e exigia refrigeração constante a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando os desafios associados ao armazenamento criogênico (Tupolev, 2013).

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

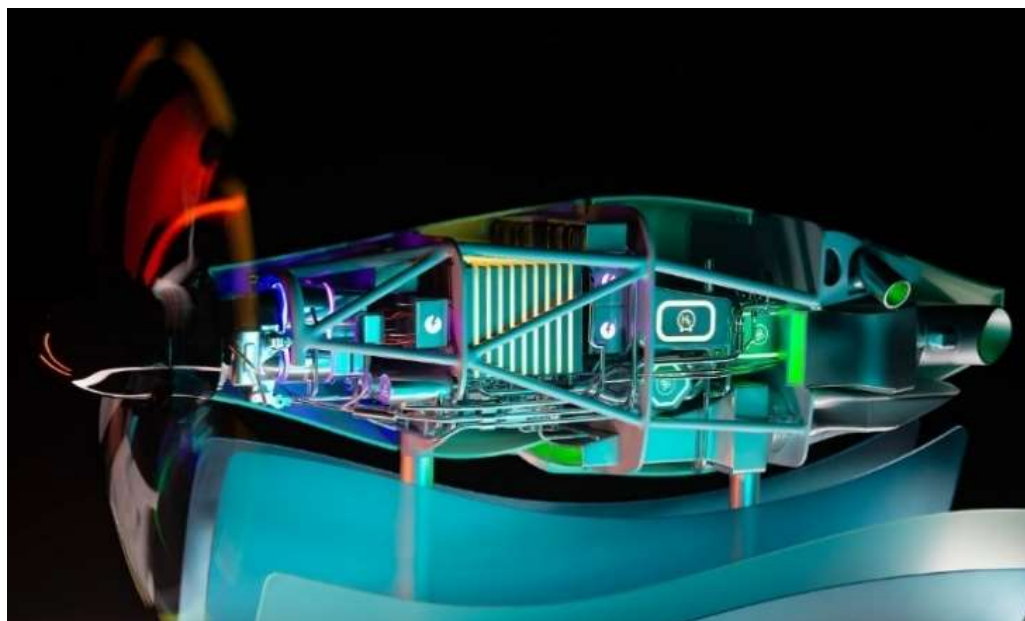


Fonte: Lukasz elt. MDPI (2024)

Atualmente, empresas como Airbus e Boeing desenvolvem protótipos e testes de motores híbridos e células a combustível (EASA, 2022). A Airbus é a líder em inovação tecnológica para propulsão a hidrogênio, desde 2022 a empresa vem realizando testes de motores e sistemas de combustível em uma aeronave A-380 adaptada, com motores turboélice e turbofan, projetados em colaboração com a Safran e a General Electric Aviation, os motores adotam tecnologia híbrida, utilizando hidrogênio liquefeito como combustível e células de combustível (Airbus,2022).

Durante anúncios realizados no *Airbus Summit 2025* apresentou um dos motores que vem sendo desenvolvido (Figura 2), um motor turboélice híbrido, composto de quatro mini motores elétricos, que funcionam a partir da energia gerada pelas células de combustível, que são alimentadas pelo sistema do combustível liquefeito, armazenados em tanques criogênicos, tendo como resultado a geração de 1.3 MW de energia com o hidrogênio, fornecendo a estimativa para a Airbus em operar aeronaves de até 100 passageiros, com autonomia igual ou superior a 1000nmi. A Airbus tem a projeção de realizar testes em aeronave totalmente operada com motor a hidrogênio entre 2027 e 2028. Tendo sucesso, a fabricante pretende fabricar suas aeronaves de zero emissão entre 2030 e 2035 (Dziwuylsky et al., 2025).













Figura 2 – Motor turboélice híbrido desenvolvido pela Airbus



Fonte: travelnewsasia (2025)

Conforme avaliação da EASA, o hidrogênio líquido apresenta vantagens expressivas em termos de redução de emissões, mas enfrenta limitações relacionadas ao volume de armazenamento e à infraestrutura necessária. Já o hidrogênio gasoso, embora mais simples de manipular, demanda maior volume de tanques e sistemas de compressão avançados (EASA, 2022). A avaliação foi apresentada (Quadro 1), indicando seus níveis de benefício de maneira visual.

Quadro 1 – Diagrama dos benefícios do H2

	Emissão de CO ₂	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)

Do ponto de vista energético, o hidrogênio possui elevada densidade por massa, atingindo 120 MJ/kg, em contraste com os 44 MJ/kg do querosene de aviação (QAV). Contudo, ao ser convertido para o estado líquido, essa vantagem se reduz significativamente: o hidrogênio líquido atinge apenas 23,7% da eficiência energética por litro do QAV, configurando-se como um dos principais entraves para

sua aplicação como combustível 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 (CO₂). Nesse contexto, o hidrogênio (H₂) se destaca por seu potencial de descarbonização, embora apresente baixa densidade de energia volumétrica, o que torna seu armazenamento um desafio. As formas mais eficazes para viabilizar esse processo são a compressão ou a liquefação do gás.

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

Propriedade	Jet A-1	H ₂
Emissão de CO ₂	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/)

O apontamento feito por Santos (2023), são necessários 3.000 litros de gás hidrogênio ou quatro litros de hidrogênio em estado liquefeito para a mesma eficiência energética de um litro de querosene de aviação.

2.3 Desafios de armazenamento de hidrogênio em aeroportos

Como observam Tashie e Nnabuife (2021), há dependência quando se trata de armazenamento de H₂ no processo de conversão em energia, condição na qual cada forma tem suas vantagens e desvantagens. O hidrogênio pode ser estocado nos estados gasoso, líquido ou sólido, sendo que cada condição impõe diferentes demandas de infraestrutura, sobretudo no que se refere à temperatura e à pressão. Assim, a definição do método de armazenamento deve equilibrar viabilidade técnica e econômica com critérios rigorosos de segurança operacional.

Nesse contexto, dois grandes desafios se destacam para a implementação do hidrogênio em aeroportos: a elevada capacidade volumétrica necessária e as exigências de refrigeração para o hidrogênio líquido. Isso requer tecnologias avançadas de isolamento térmico entre o reservatório e o ambiente externo, capazes de suportar temperaturas criogênicas extremas e ciclos térmicos sazonais (Hunt et al., 2023).

No estado líquido, a principal limitação está no elevado consumo energético contínuo para manter a refrigeração a -253 °C. Os tanques precisam de barreiras

espessas com proteção criogênica para evitar perdas por evaporação (*boil-off*) e prevenir o congelamento de partículas atmosféricas em contato com a superfície externa. Essa demanda contrasta com combustíveis fósseis, como o querosene de aviação (QAV), que permanece estável em temperatura ambiente e requer apenas energia para bombeamento em sua distribuição (Hunt et al., 2023).

Em maior escala, duas alternativas de armazenamento têm sido consideradas. O primeiro método é o armazenamento em estado gasoso, por meio da compressão em tanques subterrâneos ou cavernas de sal, que necessitam de paredes de alta resistência e isolamento para suportar pressões elevadas e controlar o aquecimento. O segundo método consiste na conversão do hidrogênio em amônia, o que facilita o transporte e a estocagem devido à maior densidade energética e à estabilidade em estado líquido. No entanto, essa rota apresenta desvantagens expressivas, como o elevado consumo de energia nos processos de síntese e craqueamento, além da toxicidade e corrosividade da amônia, que exigem rígidas medidas de segurança ocupacional e ambiental (Hunt et al., 2023).

Em paralelo às pesquisas sobre métodos de armazenamento, iniciativas de infraestrutura já vêm sendo conduzidas 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 do hidrogênio na indústria aeroespacial, prevê a instalação, no Aeroporto de Toulouse (França), de uma estação de abastecimento para o A380 adaptado (Figura 3). A segunda parceria foi estabelecida com a Kansai Airports, responsável pela gestão de três aeroportos no Japão, com o objetivo de transformar o Aeroporto Internacional de Kansai em um hub de hidrogênio, cuja capacidade de estocagem poderá alcançar centenas de toneladas diante do crescimento da demanda. Em ambos os casos, entretanto, informações técnicas detalhadas sobre volume armazenado, sistemas de refrigeração e consumo específico ainda não foram divulgadas.

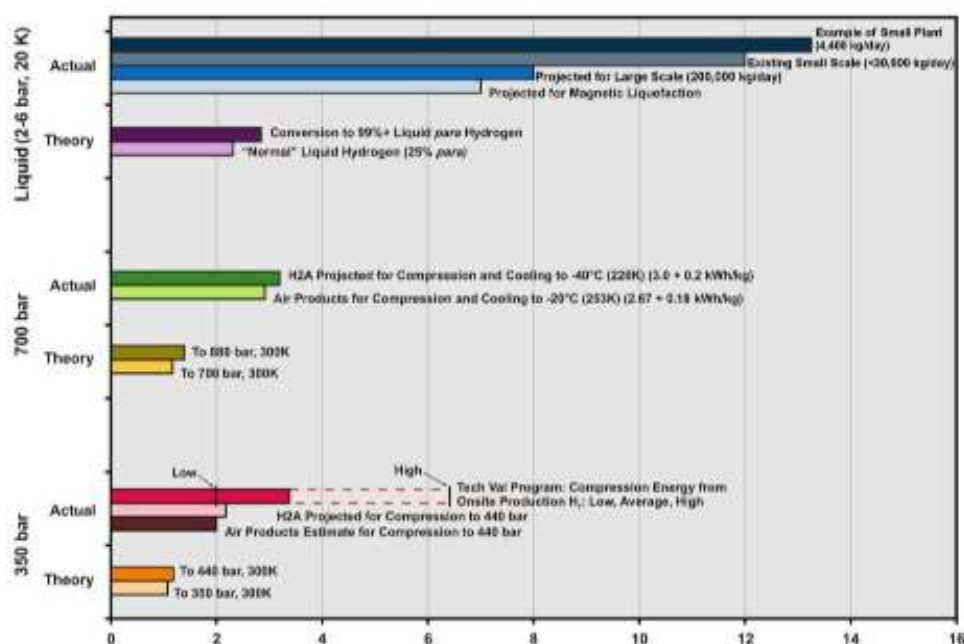
Figura 3: Conceito da estação de abastecimento desenvolvido pela Ariane Group



Fonte: Airbus/ArianeGroup (2022)

Outro fator relevante na adoção do hidrogênio na aviação é o elevado consumo energético associado ao seu processamento. Conforme apontam Hunt et al. (2023), a liquefação do hidrogênio demanda cerca de 14 kWh/kg (Figura 4). Entretanto, esse valor tende a apresentar redução gradativa conforme aumenta a escala de produção, o que indica ganhos de eficiência em projetos de maior porte.

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

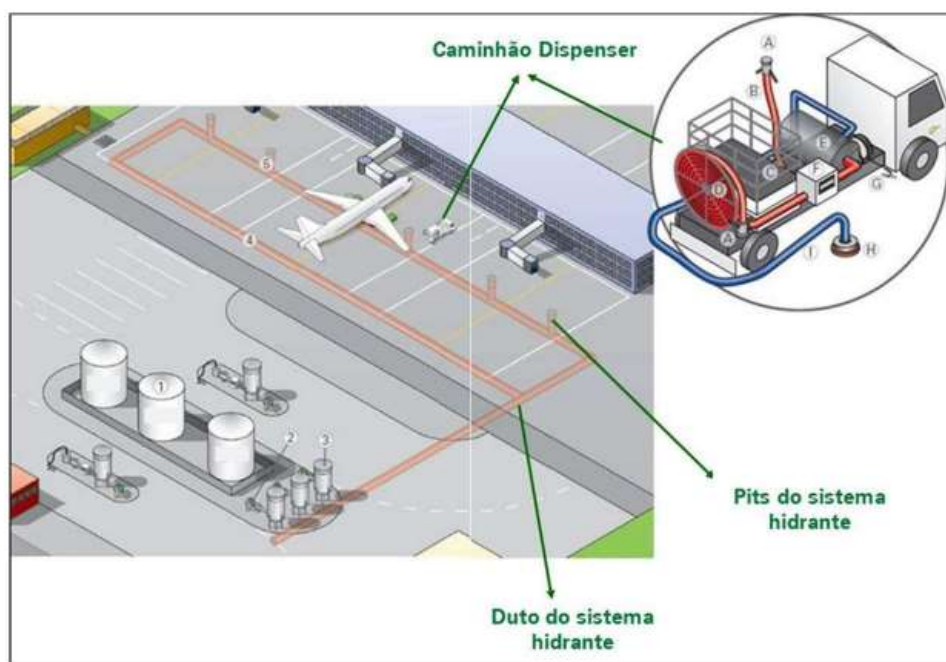


Fonte: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2009

2.4 Abastecimento de aeronaves no aeroporto de Guarulhos

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (GRU) possui atualmente uma infraestrutura consolidada para o abastecimento de querosene de aviação (QAV), composta por uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 55 milhões de litros, distribuída em sete tanques no centro de distribuição localizado próximo à cabeceira da pista 10R, ocupando uma área de cerca de 13.500 m² (CNT, 2018; GRU AIRPORT, 2023). Além disso, o aeroporto dispõe de um sistema de hidrantes (SVR) com 188 pontos de conexão (*pits*) para distribuição direta às aeronaves (figura 4), interligados por uma rede de 9,5 km de dutos subterrâneos conectando 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, o GRU deve manter um estoque estratégico de combustível equivalente a três dias de operação, totalizando aproximadamente 32 milhões de litros, garantindo resiliência frente a falhas de fornecimento (CNT, 2018). O abastecimento das aeronaves é realizado através de caminhões-tanque abastecedores (CTAs), com capacidade para 28 mil litros, abastecidos no centro de distribuição e transportados até as aeronaves, além do fornecimento direto pelo SVR (CNT, 2018).

A substituição desse sistema pelo uso de hidrogênio representa um desafio logístico de grande magnitude, principalmente devido à diferença de densidade energética volumétrica entre o QAV e o hidrogênio líquido. Estima-se que seriam necessários cerca de 96 milhões de litros de hidrogênio líquido para atender à reserva estratégica de três dias de operação do GRU, exigindo a instalação de até oito tanques criogênicos de grande porte, semelhantes aos modelos utilizados pela NASA, com capacidade de 4.300 m^3 cada (NASA, 2022). O Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (2017) projeta uma demanda de 300.000 m^3 de hidrogênio, para suprir a demanda, a Kawasaki (2020) anunciou dois projetos de grandes tanques de armazenamento de H_2 , um modelo esférico de 30m de altura por 30m de diâmetro com capacidade para 10.000 m^3 , outro modelo é um tanque de formato cilíndrico de 60m de altura e 50m de diâmetro, com capacidade de 50.000 m^3 .

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 a 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 uma infraestrutura exclusiva para hidrogênio, operando em paralelo com o sistema de QAV durante o período de transição.

Independentemente da abordagem, o abastecimento de aeronaves movidas a hidrogênio apresenta desafios operacionais significativos. 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 exige treinamento especializado das equipes de solo e a elaboração de procedimentos operacionais padronizados, garantindo segurança e eficiência durante o processo (EASA, 2022).

3. Procedimentos metodológicos

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

- 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 incluiu também análise comparativa de estudos de caso internacionais, modelagem de requisitos de infraestrutura baseada em parâmetros técnicos estabelecidos na literatura, e avaliação de impactos operacionais mediante simulação de cenários.

Foram realizados cálculos de dimensionamento de infraestrutura com base no consumo atual de QAV do aeroporto e nas características técnicas do hidrogênio, considerando 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 do estudo, restringindo a análise a fontes secundárias. No entanto, a sistematização do conhecimento

disponível permite uma análise abrangente dos desafios e oportunidades para implementação de hidrogênio no aeroporto de Guarulhos.

5. Considerações finais

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam deficiências significativas na infraestrutura aeroportuária mundial para a adoção plena do hidrogênio em sua cadeia operacional, apesar de o combustível ser considerado uma alternativa promissora para a descarbonização do setor aéreo. O hidrogênio apresenta desafios relevantes que exigem avanços contínuos em pesquisa, desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura especializada.

As tecnologias de células a combustível encontram-se mais avançadas, porém atualmente estão restritas a pequenas aeronaves, que, em uma aplicação de curto prazo, não conseguem atender à demanda de aeronaves maiores, limitando a viabilidade de adoção imediata em voos comerciais de média e longa distância.

Como mencionado anteriormente, o Aeroporto Internacional de São Paulo – Guarulhos (GRU) consome aproximadamente 8 milhões de litros de QAV por dia (CNT, 2018). Considerando a conversão volumétrica de combustível com base no consumo de QAV, o uso equivalente de hidrogênio líquido exigiria 32 milhões de litros por dia. Ademais, a regulamentação exige que o aeroporto mantenha estoque estratégico de combustível suficiente para três dias de operação em caso de falha no fornecimento, o que demandaria cerca de 144 milhões de litros de H₂ líquido ou 144 mil metros cúbicos, enquanto a atual capacidade instalada de armazenamento é de apenas 55 milhões de litros de QAV. O quadro 3 a seguir sintetiza as informações.

Quadro 3 – Comparação do consumo e estoque do QAV e H₂ no Aeroporto de Guarulhos

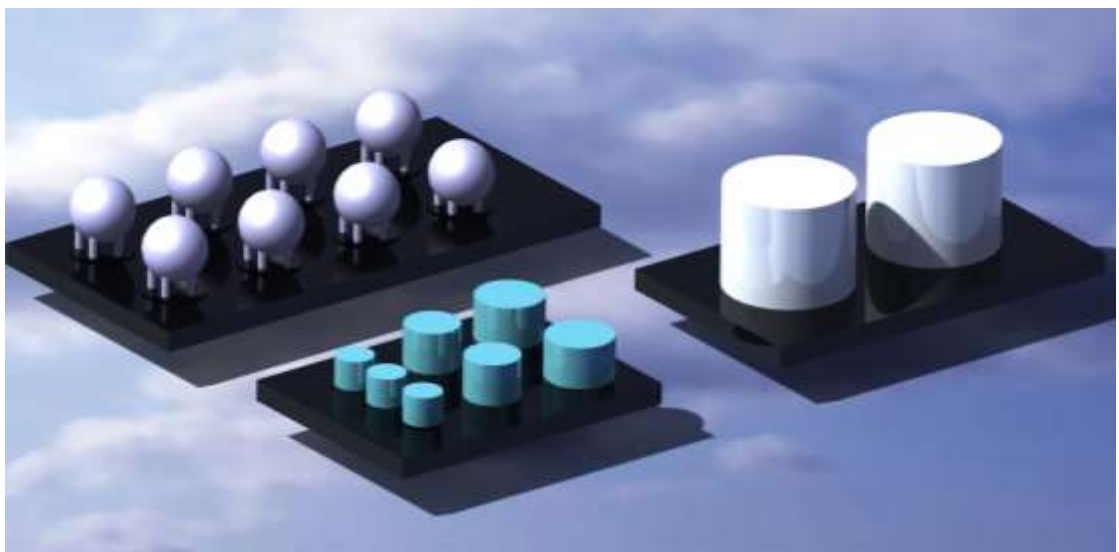
Parâmetro	QAV	H ₂ Líquido (equivalente)
Consumo diário	8.000.000 L	32.000.000 L
Estoque estratégico para 3 dias	24.000.000 L	96.000.000 L
Capacidade atual de armazenamento no aeroporto	55.000.000 L	
Diferença entre estoque necessário e capacidade	+41.000.000 L (necessário)	
Observação	Sistema existente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

Fonte: Do autor (2025)

Os valores do hidrogênio foram calculados considerando a equivalência energética volumétrica com o QAV, conforme os dados apresentados no estudo. O quadro evidencia a necessidade de duas vezes mais volume de armazenamento para hidrogênio, ilustrando a inviabilidade estrutural da transição imediata.

Além disso, conforme a Figura 5 a seguir, onde os cilindros azuis representam os tanques de armazenamento atuais do Aeroporto de Guarulhos, notamos uma significativa diferença da área ocupada comparada aos oito tanques esféricos semelhantes aos utilizados pela NASA, e os dois tanques cilíndricos em desenvolvimento pela Kawasaki, saindo da área aproximada de 15.000m², para 19.000m² com o uso dos cilindros da Kawasaki e para 23.000m² usando os tanques esféricos, isso considerando apenas as distâncias de segurança recomendadas pela na ABNBR 7505-1 (2003).

Figura 5: Comparação da proporcionalidade de área necessária para abastecimento



Fonte: Do autor (2025)

A implementação do hidrogênio exigiria profundas alterações na logística e no sistema de armazenagem do aeroporto, incluindo expansão de tanques, instalação de sistemas de refrigeração e pressurização, além de adaptação de procedimentos de segurança e operação. Tais modificações implicariam em elevados investimentos financeiros e tecnológicos, reforçando que a transição para o hidrogênio dependerá de planejamento estratégico de longo prazo, desenvolvimento de infraestrutura adequada e parcerias entre fabricantes, operadores e reguladores.

O setor aéreo enfrenta desafios significativos relacionados à redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que os combustíveis fósseis, como o querosene de aviação (QAV), permanecem amplamente utilizados devido à sua eficiência energética, escala de produção e infraestrutura consolidada. Alternativas como SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) e etanol apresentam vantagens ambientais, mas ainda são limitadas em termos de disponibilidade e escalabilidade.

O hidrogênio surge como uma solução promissora para a transição energética no setor aéreo, apresentando emissão zero de CO₂ em sua utilização, seja na combustão direta ou em células a combustível. Contudo, a adoção do hidrogênio

enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados à sua baixa densidade volumétrica, à necessidade de liquefação ou compressão, e às exigências rigorosas de armazenamento criogênico, que demandam elevados investimentos em infraestrutura e medidas de segurança.

O estudo do abastecimento no Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos evidencia que a transição para o hidrogênio exigiria expansão da capacidade de armazenamento, adaptação de sistemas existentes e treinamento especializado das equipes de solo. A comparação entre QAV e hidrogênio demonstra que, embora o H₂ possua maior densidade energética por massa, a limitação volumétrica torna a logística mais complexa, especialmente para voos de média e longa distância.

Portanto, a implementação do hidrogênio como combustível de aviação dependerá de inovações tecnológicas, investimentos em infraestrutura, regulamentação adequada e parcerias estratégicas entre aeroportos, fabricantes e órgãos reguladores. Apesar dos desafios, o hidrogênio representa uma alternativa viável e sustentável, com potencial para contribuir significativamente para a descarbonização do setor aéreo nas próximas décadas.

Portanto, embora o hidrogênio represente uma alternativa sustentável e com potencial de reduzir significativamente as emissões de CO₂, a sua implementação no setor aéreo ainda enfrenta barreiras técnicas e econômicas substanciais, especialmente em aeroportos de grande porte e para aeronaves comerciais de maior capacidade.

Referências

- An, A. B. *Airbus Plans A380 Hydrogen Flights In 2026 After Successful Power On Of ZEROe Engine.* <https://simpleflying.com/airbus-a380-hydrogen-flight-zeroe-power-on/>
- Airbus. *Airbus and Kansai Airports partner to study the use of hydrogen in the decarbonisation of the aviation sector in Japan.* <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-06-airbus-and-kansai-airports-partner-to-study-the-use-of-hydrogen-in>
- Airbus. *Airbus Prepares for Its First megawatt-class Hydrogen fuel-cell Engine flight-test Demonstrator.* <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-11-airbus-prepares-for-its-first-megawatt-class-hydrogen-fuel-cell-engine>
- Airbus. *ZEROe: our hydrogen-powered aircraft.* <https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe-our-hydrogen-powered-aircraft>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 7505-1: Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis.* <http://ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-7505-00-Armazenagem-de-L%C3%ADquidos-Inflam%C3%A1veis-e-Combustiveis-Parte-1.pdf>
- Boeing. *What's next ? Boeing's hydrogen demonstration projects.* https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/pdf/Hydrogen_Factsheet.pdf
- camargo, Antônio Á.S. *Faz sentido pensar em etanol como fonte sustentável de hidrogênio verde – H2V?* https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/06/10_Camargo_2021_11_19.pdf

Confederação Nacional dos Transportes. *Saiba como funciona o abastecimento em dois dos maiores aeroportos do Brasil*. <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/saiba-como-funciona-abastecimento-maiores-aeroportos>

European Union Aviation Safety Agency - EASA. *Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. https://horizoneuropencportal.eu/sites/default/files/2023-09/chju-hydrogen-powered-aviation-2020_0.pdf

Dziwulski, Edimar, Ribeiro, Wesler Fonseca, & Basilio, Flávio Leopoldo. (2025). Avançando para o azul: Viabilidade e impactos dos aviões ZEROe da Airbus movidos a hidrogênio. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*, 5(1), 27–56.

Gru Airport. *Relatório de Sustentabilidade 2023*. (2023). Guarulhos: Concessionária do Aeroporto Internacional de Guarulhos. <https://www.gru.com.br>

Hunt, Julian et al. *Aspectos sobre o armazenamento e transporte de hidrogênio*. <https://www.researchgate.net/publication/378078577>

International Air Transport Association - IATA. *Net Zero by 2050: Sustainable Aviation Fuel (SAF) Update*. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/>

Jangoulun Singsit. *Airbus, Kansai Airports, and Kawasaki assess hydrogen infrastructure feasibility in Japan*. <https://www.airport-technology.com/news/airbus-kansai-airports-kawasaki/>

Kawasaki Heavy Industries. *World's first liquefied hydrogen carrier*. <https://global.kawasaki.com>

Rodrigues, R. A. (2010). Célula de hidrogênio: construção, aplicações e benefícios. *Revista Brasileira de Gestão e Engenharia*, 47–62.

Santos, Cayo C. N. (2023). *O hidrogênio é o futuro da aviação?* <https://blogdaengenharia.com/engenharia/o-hidrogenio-e-o-futuro-da-aviacao/>

Tashie-Lewis, Bernard Chukwudi, & Nnabuife. (2021). Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy – A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8(2), 100172.

Tupolev. (2013). *Development of Cryogenic Fuel Aircraft*, Feb. <https://web.archive.org/web/20130218231656/http://www.tupolev.ru/English/Show.asp?SectionID=82>

Contribuição da/o(s) Autor/a(es):

Matheus Ferreira Alves: Autor do artigo;

Andreza Santos Feitoza: Coorientadora, revisão das normas;

Edson Demétrio Leal: Orientador, delineamento do estudo, supervisão do trabalho.