



**Estado da arte sobre a utilização do  
hidrogénio na indústria aeronáutica e  
medidas de segurança associadas**  
(Versão final após a defesa)

**Francisca Garcia de Oliveira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Aeronáutica**  
(Mestrado integrado)

Orientador: Professor Doutor José Manuel Mota Lourenço da Saúde

**julho de 2024**

**Folha em branco**

## **Declaração de Integridade**

Eu, Francisca Garcia de Oliveira, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição a34411 do Curso de Engenharia Aeronáutica da Faculdade Engenharias, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.



Universidade da Beira Interior, Covilhã 31 /07 /2024

**Folha em branco**

# Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer por todo o apoio, motivação e ajuda que os meus pais, Manuel e Natália, me facultaram ao longo de todo o meu processo académico, e em especial o facto de sempre acreditarem e confiarem em mim.

Aos meus amigos, Denise Caçoilo, Duarte Bombas e Beatriz Fernandes, por estarem sempre do meu lado, e pelo incentivo que me foi dado por eles durante os períodos de desmotivação.

Ao Professor Doutor José Manuel Mota Lourenço da Saúde por sempre ter disponibilizado a sua ajuda e orientação ao longo da realização deste trabalho.

Por fim, a todos os outros colegas que conheci nesta maravilhosa cidade e que fizeram com que toda a experiência de ‘estudar fora de casa’ fosse uma experiência inigualável, a melhor que já tive até aos dias de hoje.

**Folha em branco**

**Folha em branco**

# Resumo

O uso do hidrogénio na aeronáutica é promissor devido aos benefícios ambientais, como emissões zero de carbono, resultantes da sua combustão. A utilização de hidrogénio requer avanços em tecnologia e normas, incluindo armazenamento seguro, adaptação de aeronaves e infraestrutura, bem como a certificação dos sistemas e organizações que vão utilizar H<sub>2</sub>.

A transição da propulsão convencional de aeronaves para a propulsão a hidrogénio representa uma mudança significativa para uma fonte de energia mais limpa e sustentável. Essa transição implica a substituição dos combustíveis tradicionais por hidrogénio, atendendo aos benefícios ambientais. No entanto, essa mudança requer avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de motores e sistemas adaptados ao hidrogénio, além de normas rigorosas para garantir a segurança, o armazenamento eficiente e a certificação de aeronaves movidas a hidrogénio.

Embora ainda em fase de desenvolvimento, a propulsão a hidrogénio representa uma abordagem promissora para reduzir o impacto ambiental da aviação, com isto concluímos que vai ser necessário superar desafios tecnológicos, alcançar viabilidade económica e resolver questões logísticas e regulatórias. O progresso dependerá da colaboração entre setores, governos, empresas e organizações de pesquisa.

## Palavras-chave

Hidrogénio; Aeronáutica; Benefícios ambientais; Normas; Certificação; Propulsão; Segurança; Desafios tecnológicos.

**Folha em branco**

# **Abstract**

The use of hydrogen in aeronautics is promising due to environmental benefits, such as zero carbon emissions resulting from its combustion. The use of hydrogen requires the improvement of technology and standards, including storage safety, aircraft structures adaptation, infrastructure, and certification of the systems and organizations using H<sub>2</sub>.

The transition from conventional aircraft propulsion to hydrogen propulsion represents a significant shift toward a cleaner and more sustainable energy source. This transition involves replacing traditional fuels with hydrogen, regarding environmental benefits. However, this change requires technological progress, such as the development of engines and systems adapted to hydrogen, along with rigorous standards to ensure safety, efficient storage, and certification of hydrogen-powered aircraft.

Although still in the development phase, hydrogen propulsion represents a promising approach to reduce the environmental impact in aviation. It is concluded that overcoming technological challenges, achieving economic viability, and resolving logistical and regulatory issues will be necessary. Progress will depend on collaboration among sectors, governments, businesses, and research organizations.

## **Keywords**

Hydrogen; Aeronautics; Environmental benefits; Standards; Certification; Propulsion; Safety; Technological Challenges.

**Folha em branco**

# Índice

<i>Agradecimentos</i> .....	v
<i>Resumo</i> .....	viii
<i>Abstract</i> .....	x
<i>Lista de Figuras</i> .....	xiv
<i>Lista de Tabelas</i> .....	xvi
<i>Lista de Acrónimos</i> .....	xvii
<i>Capítulo 1: Introdução</i> .....	20
1.1 Motivação .....	20
1.2 Objetivo .....	21
1.3 Estrutura da dissertação.....	21
<i>Capítulo 2: Estado da arte da operação aérea com hidrogénio</i> .....	22
2.1 Percurso histórico do hidrogénio na indústria aeronáutica.....	22
2.2 Uma visão de safety .....	23
2.3 Propriedades do hidrogénio na ótica da aviação e do meio ambiente .....	24
2.4 Desenvolvimento histórico do uso de hidrogénio na aeronáutica .....	27
2.5 Desafios do uso do hidrogénio na aviação.....	28
2.5.1 Produção .....	29
2.5.4 Questões de segurança e certificação .....	34
2.5.5 Estrutura da aeronave.....	34
2.6 Propulsão a hidrogénio.....	37
2.7 Infraestruturas de produção e cadeia de abastecimento de hidrogénio nas operações aéreas .....	40
2.8 Investigação e desenvolvimento .....	41
2.9 Prespetivas e tendências futuras .....	41
2.10 Síntese .....	42
<i>Capítulo 3: Normas do uso de H<sub>2</sub> vs segurança operacional</i> .....	44
3.1 Painel europeu de segurança do hidrogénio .....	44
3.2 Legislação da União Europeia na abordagem ao hidrogénio na aeronáutica.	45
3.3 Estações de abastecimento – autorização e planeamento .....	48
3.4 Futuras aeronaves a operar com hidrogénio.....	49
<i>Capítulo 4: Conclusão e perspetivas futuras</i> .....	52
<i>Referências</i> .....	54

**Folha em branco**

# Lista de Figuras

Figura 1: Comparação do impacto ambiental com os vários combustíveis na aeronáutica. ....	25
Figura 2: Massa e densidades volumétricas de diferentes fontes de combustão. ....	26
Figura 3: Célula de combustível .....	29
Figura 4: Ciclo de vida do hidrogénio .....	30
Figura 5: Processo de obtenção de hidrogénio pelo método de SMR. ....	31
Figura 6: Configuração estrutural para aeronaves com depósitos de hidrogénio. ....	35
Figura 7: Tipos de sistemas de propulsão para várias aeronaves. ....	38
Figura 8:(Esq.) HY4 da H2FLY, (Dir.) Dornier 228 da ZeroAvia. ....	39
Figura 9: Tipo de produção, armazenamento e transporte de hidrogénio. ....	41
Figura 10: Introdução ao ZEROe. ....	50
Figura 11: Sistema de transmissão. ....	50

**Folha em branco**

# Lista de Tabelas

Tabela 1: Energia gasta para cada processo de obtenção de hidrogénio. ....	32
Tabela 2: Descrição de tecnologias de produção de hidrogénio.....	32

**Folha em branco**

# Lista de Acrónimos

ACCEL	Accelerating the electrification of flight
APU	Auxiliar Power Unit
ATEX	ATmosphere EXplosible
AVGAS	Aviation Gasoline
CCS	Carbon Capture and Storage
CFRPa	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DRL	Departure Reference Line
DSEAR	Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations
EHAS	Atuadores Electroestáticos
EHSP	European Hydrogen Safety Panel
EMAS	Atuadores Eletromecânicos
ETS	Emissions Trading Systems
EU	Europeaan Union
EUA	Estados Unidos da América
FAA	Federal Aviation Administration
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
GE	General Electric Company
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GH <sub>2</sub>	Hidrogénio Gasoso
GSMRa	Regulamentos de Segurança de Gás
GW	Giga Watt
H <sub>2</sub>	Hidrogénio
HSE	Health and Safety Executive
IPCEI	Projetos Importantes de Interesse Europeu Comum
ISO	International Standards Organization
LCAF	Combustíveis de Aviação de Baixo Carbono
LH <sub>2</sub>	Hidrogénio Líquido
LH <sub>2</sub> GT	Turbina de Gás de Hidrogénio Líquido
LH <sub>2</sub> ICE	Turbina Interna de Hidrogénio Líquido
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OFD	Optical Flame Detection
Ofgem	Office of Gas and Electricity Markets

RCLEa	Regime de Comércio de Licenças de Emissão
SAF	Sustainable Aircraft Fuels
SMR	Steam Methane Reforming
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UBI	Universidade da Beira Interior
VANT	Veículo Aéreo não-Tripulado

**Folha em branco**

# Capítulo 1: Introdução

## 1.1 Motivação

Nos últimos anos tem-se observado um crescimento da inclusão do hidrogénio na indústria aeronáutica. O principal objetivo do uso deste como combustível em aeronaves é pelo facto do hidrogénio ter baixas emissões de gases de efeito de estufa.

Neste contexto, o hidrogénio emerge como uma fonte promissora de energia, apresentando-se como um combustível limpo e eficiente para a propulsão de aeronaves. A transição para o uso do hidrogénio na aeronáutica representa um avanço significativo em direção à descarbonização deste setor.

A indústria aeronáutica enfrenta o desafio crucial de conciliar a necessidade de reduzir as emissões de carbono com a necessidade contínua de viagens aéreas. Neste cenário, o hidrogénio destaca-se como uma alternativa viável, uma vez que a sua combustão resulta maioritariamente na libertação de vapor de água e dióxidos de azoto, reduzindo as emissões de dióxido de carbono e outros poluentes atmosféricos nocivos<sup>1</sup>. Além disso, a alta densidade energética<sup>2</sup> do hidrogénio líquido oferece a capacidade de atender às exigências operacionais das aeronaves, proporcionando melhor autonomia e desempenho<sup>3</sup> comparativamente aos sistemas tradicionais.

Esta dissertação visa explorar a implementação do hidrogénio na aeronáutica como uma solução inovadora e ambientalmente sustentável. Irá ser feita uma análise aos desafios tecnológicos, económicos e logísticos associados à adoção do hidrogénio como combustível aeronáutico e a apresentação de algumas visões futuras para orientar o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias industriais.

Uma futura investigação detalhada destes aspetos permitirá avaliar o impacto potencial desta transição, considerando não apenas os benefícios ambientais, mas também as implicações práticas para as operações aeronáuticas e a cadeia de acontecimentos associada.

Neste enquadramento é também importante dar conta que o papel das universidades transcende o mero fornecimento de educação superior. Estas são agentes ativos na promoção do conhecimento, da inovação e do progresso em diversas esferas. Em sintonia com essa missão, a

---

<sup>1</sup> Poluentes atmosféricos mais comuns presentes na atmosfera: dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), monóxido de carbono (CO) e ozono (O<sub>3</sub>) (nota do autor).

<sup>2</sup> A densidade energética representa a quantidade de energia armazenada num determinado sistema por unidade de volume (nota do autor).

<sup>3</sup> Autonomia e desempenho referem-se à quantidade de combustível que é necessária para fazer a mesma distância com o mesmo tempo relativamente a outros combustíveis aeronáuticos tradicionais (nota do autor).

participação de uma universidade em projetos colaborativos é um catalisador essencial para a concretização dos mesmos.

O envolvimento da UBI em projetos relativos ao uso de hidrogénio está atualmente em curso. Wine4H2 é um dos atuais projetos, este que foi “um dos aprovados no último concurso de financiamento em todos os domínios da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia”. Este projeto dedica-se ao estudo de um “sistema para produção de hidrogénio a partir de efluente vitivinícola”, no qual se propõe “um sistema bioeletroquímico capaz de purificar efluentes vitivinícolas e ao mesmo tempo gerar energia renovável na forma de hidrogénio” (UBI, 2023).

Também a UBI se encontra envolvida na Agenda Mobilizadora Aero.Next Portugal, estando a participar nos estudos relativos à possibilidade de se recorrer ao H<sub>2</sub> como fonte de energia para permitir fornecer energia elétrica (autor, 2024).

Desta forma, nesta tese propõe-se a analisar o papel do hidrogénio na aeronáutica, explorando as suas vantagens, desafios e implicações para o setor.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo desta dissertação é identificar as formas como se pode utilizar hidrogénio como combustível para a propulsão de aeronaves de asa fixa, de modo a poder deduzir-se as vantagens e inconvenientes ao longo do respetivo ciclo de vida de operação e dessa forma poder eventualmente aportar conhecimento aos projetos onde a UBI está envolvida.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

A estrutura desta dissertação está dividida em 4 partes, neste caso capítulos.

O presente capítulo explica a motivação que levou ao desenvolvimento deste trabalho assim como o objetivo e a estrutura do mesmo.

O segundo capítulo dedica-se ao estado da arte relativo à operação aérea com hidrogénio, referindo o percurso histórico do hidrogénio tanto na indústria aeronáutica como nos transportes terrestres, os benefícios deste quando usado como combustível na indústria aeronáutica, os desafios associados e também uma visão de safety relativa ao uso deste.

O terceiro capítulo apresenta um resumo das normas existentes para o uso do hidrogénio e algumas regras na operação com hidrogénio no controlo e monitorização a bordo das aeronaves.

No último capítulo é feita uma síntese relativa à pesquisa realizada nesta dissertação.

# Capítulo 2: Estado da arte da operação aérea com hidrogénio

O hidrogénio irá “desempenhar um papel crucial nas futuras soluções tecnológicas capazes de contribuir para a descarbonização da aviação civil e para a redução das emissões” (EASA, 2023).

“Dois dos principais fatores que fazem do H<sub>2</sub> uma solução interessante são, por um lado, o facto de ser possível produzi-lo e consumi-lo sem emitir CO<sub>2</sub> e, por outro, o facto de o H<sub>2</sub> estar disponível em grande quantidade na água. O hidrogénio mostra-se, por conseguinte, um catalisador para alcançar os objetivos do Pacto Ecológico Europeu<sup>4</sup> de transição dos combustíveis fósseis para as energias renováveis.” (EASA, 2023).

Até à data, a investigação e o desenvolvimento do uso do hidrogénio revelaram resultados promissores para uma alternativa aos combustíveis fósseis, mas é necessário dar-lhes continuidade nesta área enquanto combustível para a aviação (EASA, 2023).

Após um crescimento notável nas iniciativas de investigação, a Comissão Europeia publicou um trabalho, a 22 de janeiro de 2022, onde é destacado o papel que deverão desempenhar os investimentos da UE na investigação e inovação no setor do hidrogénio (EASA, 2023, p. 1).

Neste capítulo irei expor o percurso relativo ao uso do hidrogénio na aeronáutica, quais as vantagens e quais as dificuldades a nível de produção e segurança associadas a este na mobilidade aérea.

## 2.1 Percurso histórico do hidrogénio na indústria aeronáutica

O hidrogénio foi utilizado como gás de sustentação em balões durante os primórdios da aviação, tendo sido posteriormente substituído pelo hélio, devido à sua inflamabilidade. No entanto, o hidrogénio teve também um papel significativo no desenvolvimento de aeronaves movidas a propulsão foguete e foi explorado em vários momentos ao longo da história:

No final do século XVIII e no início do século XIX, o hidrogénio foi utilizado como gás de sustentação em balões. O primeiro voo tripulado conhecido foi com um balão insuflado com

---

<sup>4</sup> Pacto Ecológico Europeu é um pacote de iniciativas estratégicas que visa a colocar a UE na via rumo a uma transição ecológica, com o objetivo último de alcançar a neutralidade climática até 2050 (nota do autor) .

hidrogénio foi lançado a 1 de dezembro de 1783, por Jacques Charles e Nicolas Robert, a partir do jardim de Tuileries em Paris (Crouch, 2024).

Após a criação do balão, foi projetado o dirigível do tipo Zeppelin, o qual deu origem ao dirigível Hindenburg (1930), com sustentação a hidrogénio, porque não tinham acesso à alteraniva Hélio. Este ainda completou 10 voos transatlânticos bem-sucedidos, no entanto, logo após esse marco ocorreu um desastre aéreo a 6 de maio de 1937 em Lakehurst (Nova Jérсия), o desastre de Hidenburg. Este desastre foi causado por uma descarga eletrostática (faísca) que com a fuga de hidrogénio resultou num incêndio que acabou por destruir o dirigível que voava a aproximadamente 60 metros acima do nível do solo.

Durante a Segunda Guerra Mundial, o hidrogénio líquido foi usado como combustível em foguetes V-2 desenvolvidos pelos alemães. Estes foguetes foram os primeiros a alcançar a fronteira do espaço exterior. Após a guerra, vários países continuaram a pesquisa em termos da propulsão de foguetes, muitas vezes usando hidrogénio líquido como combustível.

Após estes acontecimentos históricos houve discussões e experiências para desenvolver aeronaves movidas a hidrogénio. No entanto, devido a desafios técnicos e económicos, como o armazenamento seguro e eficiente do hidrogénio, esses projetos não foram bem-sucedidos como alternativas de combustíveis.

Com o crescente interesse em fontes de energia limpa e tecnologias sustentáveis, o H<sub>2</sub> tem vindo a ser considerado como possível combustível para a aviação. Atualmente estão em curso pesquisas para desenvolver aeronaves com células de combustíveis<sup>5</sup>, as quais produzirão eletricidade a partir da reação entre o H<sub>2</sub> e o oxigénio. Estas aeronaves terão a vantagem de zero de emissões de carbono.

O H<sub>2</sub> tem também sido explorado como uma possível fonte de energia na mobilidade terrestre ao longo das décadas, embora a sua adoção em larga escala ainda seja limitada devido a desafios técnicos, económicos e de infraestruturas.

## **2.2 Uma visão de safety**

O uso de H<sub>2</sub> em sistemas aeronáuticos é uma área de pesquisa em rápido crescimento, especialmente à medida que a busca por alternativas mais limpas e sustentáveis na aviação aumenta. Quando se trata de identificar elementos de segurança operacional (safety) para projetos e operações de sistemas aeronáuticos movidos a H<sub>2</sub>, existem várias considerações que devem ser levadas em conta. Alguns pontos importantes a considerar são:

---

<sup>5</sup> Célula de combustível é um dispositivo que converte hidrogénio e oxigénio em eletricidade através de uma reação química (nota do autor) ¶

- O H<sub>2</sub> é altamente inflamável e requer cuidados especiais no armazenamento e manuseio. Os sistemas de armazenamento de hidrogénio devem ser projetados para evitar fugas e minimizar o risco de incêndio ou explosões. Os procedimentos de abastecimento também devem ser rigorosos para garantir a segurança dos operadores e evitar possíveis acidentes;
- Os sistemas de detecção de fugas de H<sub>2</sub> são essenciais, além disso, sistemas de monitorização contínua devem ser implementados para garantir que os níveis de H<sub>2</sub> estejam dentro dos limites seguros em todas as fases de operação; isto pode envolver materiais especiais resistentes ao hidrogénio, juntas herméticas e técnicas de fabricação que garantam a integridade dos componentes;
- Sistemas de extinção de incêndio eficazes e estratégias de mitigação de explosões devem ser incorporados nos projetos. Isto pode incluir isolamento de áreas de risco em caso de fuga;
- Pessoal de manutenção e operação deve ser devidamente treinado em todas as questões relacionadas à segurança do manuseamento do hidrogénio. Isto inclui o conhecimento de procedimentos de manutenção específicos, protocolos de emergência e práticas seguras de operação;
- As infraestruturas de suporte, como hangares e estações de abastecimento, também devem ser projetadas e adaptadas garantindo sistemas de segurança adequados. Isto envolve sistemas de ventilação adequados, áreas de contenção de fugas e medidas de segurança.

A transição para sistemas aeronáuticos movidos a hidrogénio requer uma abordagem integral para a segurança operacional, abrangendo o projeto, a fabricação, a operação e a manutenção. A colaboração entre engenheiros aeronáuticos, especialistas em segurança e reguladores é fundamental para garantir que os sistemas movidos a H<sub>2</sub> atendam aos mais altos critérios de certificação, entre os quais CS-23 e CS-25.

## **2.3 Propriedades do hidrogénio na ótica da aviação e do meio ambiente**

A utilização do hidrogénio na aviação oferece uma série de benefícios significativos, destacando-se como uma opção promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e tornar o setor mais sustentável.

### **2.3.1 Benefícios do uso do hidrogénio**

O hidrogénio possui uma das mais altas densidades energéticas por unidade de massa e volume, proporcionando uma fonte de energia eficiente para a aviação. Essa característica é crucial para atender às exigências de peso e autonomia das aeronaves.

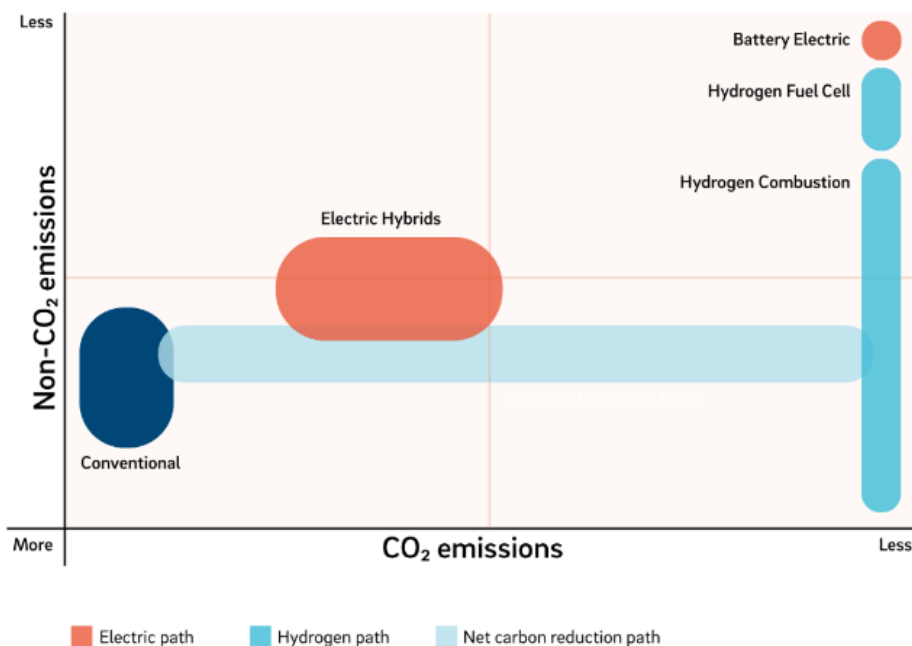


Figura 1: Comparação do impacto ambiental com os vários combustíveis na aeronáutica.

Fonte: (Thomson, 2020).

A utilização do hidrogénio na aviação, especialmente quando produzido a partir de fontes renováveis, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Isso é fundamental para mitigar as mudanças climáticas e atender a metas ambientais, um passo para a descarbonização.

As aeronaves que são movidas com combustíveis convencionais emitem gases e partículas em altitudes elevadas, contribuindo para um impacto ambiental mais significativo, como se pode observar na Figura 1. O hidrogénio pode desempenhar um papel na mitigação desse impacto, já que a combustão deste produz principalmente vapor de água.

Além de benefícios climáticos, os motores movidos a hidrogénio têm tendência a ser menos ruidosos do que os motores a jato convencionais, o que pode reduzir a poluição sonora nas áreas que rodeiam os aeroportos, melhorando a qualidade de vida das comunidades locais (SenGupta, 2023).

### 2.3.2 Hidrogénio e outros combustíveis

Os combustíveis convencionais aplicados em aviões são Jet A1, Jet A e Jet B, caracterizando-se por serem compostos por querosene, um óleo obtido da destilação do petróleo, como base para a elaboração deste, o qual é identificado por jet fuel (Gasogenio, 2023, p. 1).

A comparação entre o hidrogénio e os combustíveis convencionais da aviação envolve diversos aspetos, incluindo conteúdo energético, emissões e características de combustão. Na

Figura 2 podemos observar a densidade energética por volume. Isto significa que, por unidade de massa, o hidrogénio contém mais energia. No entanto, este gás é muito menos denso em termos volumétricos, o que pode impactar o design e o armazenamento da aeronave.

Combustíveis de aviação convencionais, emitem dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de azoto, partículas e outros poluentes atmosféricos durante a combustão. Portanto, em termos de emissões locais, o hidrogénio é uma opção mais limpa.

O H<sub>2</sub> é um gás muito inflamável, tornando-o mais propenso a combustões rápidas e eficientes. Estas características podem ser vantajosas em termos de eficiência do motor. No entanto, a alta taxa de combustão também pode exigir ajustes nos motores e sistemas de controlo para garantir operações seguras – ver Figura 2.

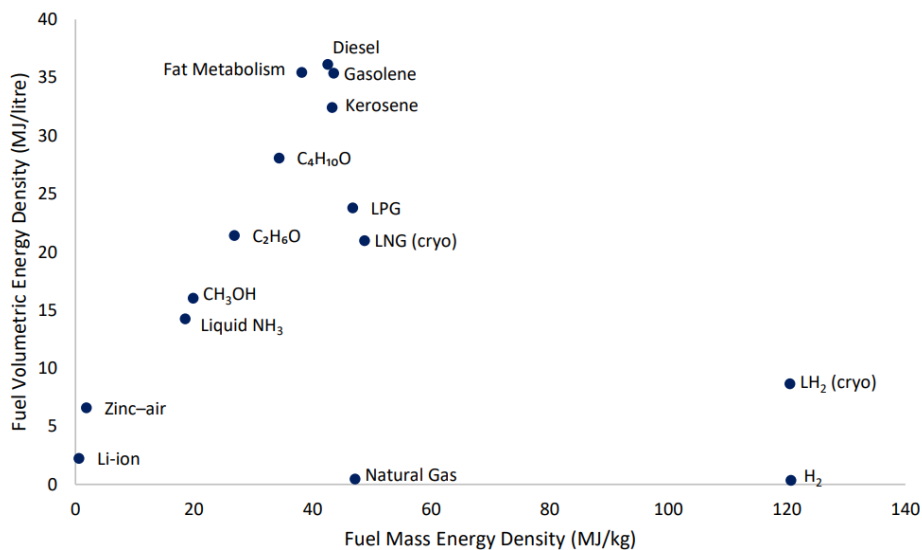


Figura 2: Massa e densidades volumétricas de diferentes fontes de combustão.

Fonte: (Alsulaiman, 2024, p. 10).

Os combustíveis de aviação convencionais têm características de combustão controladas e são otimizados para os motores de combustão interna comuns na aviação atual. A transição para hidrogénio vai exigir ajustes ou novos designs de motores para otimizar a eficiência.

O armazenamento de hidrogénio pode ser desafiador devido à sua baixa densidade volumétrica, alta pressão ou exigência de temperaturas criogénicas<sup>6</sup>, dependendo da forma de

---

<sup>6</sup> Temperaturas criogénicas para permitir um maior armazenamento de hidrogénio, sendo este em estado líquido (-253°C).

armazenamento (gasoso ou líquido). O jet fuel é mais fácil de armazenar e transportar, com a infraestrutura estabelecida e soluções adotadas.

A transição para o hidrogénio também requer investimentos significativos em infraestrutura, como estações de abastecimento, tanques de armazenamento e sistemas de distribuição.

Atualmente, a produção de hidrogénio verde (produzido a partir de fontes renováveis) pode ser mais cara que a extração de combustíveis de aviação tradicionais. No entanto, com avanços tecnológicos e a escala da produção, espera-se que os custos do hidrogénio diminuam.

## **2.4 Desenvolvimento histórico do uso de hidrogénio na aeronáutica**

Neste subcapítulo apresenta-se uma evolução histórica da utilização do hidrogénio na indústria aeronáutica, incluindo alguns marcos importantes ao longo dos anos:

1783 – Jacques Alexander Cesar Charles, físico francês, lançou o primeiro voo de balão de hidrogénio. Conhecido como "Charliere", o balão não tripulado atingiu uma altitude de três quilómetros. Apenas três meses depois, o próprio Charles realizou o primeiro voo tripulado num balão de hidrogénio (Acutair, 2004, p. 1).

1800 – Os cientistas ingleses William Nicholson e Sir Anthony Carlisle descobriram que a aplicação de corrente elétrica à água produzia gases como o hidrogénio e o oxigénio. Este processo foi posteriormente denominado “eletrólise” (Acutair, 2004, p. 1).

1839 – O efeito da célula a combustível, combinando os gases hidrogénio e oxigénio para produzir água e corrente elétrica, foi descoberto pelo químico suíço Christian Friedrich Schoenbein (Acutair, 2004, p. 1).

1937 – Depois de dez voos transatlânticos bem-sucedidos da Alemanha para os Estados Unidos, o Hindenburg, um dirigível insuflado com hidrogénio gasoso, incendiou na aterragem em Lakewood, New Jersey (Acutair, 2004, p. 1).

1958 – Os Estados Unidos formaram a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA). O programa espacial da NASA utiliza atualmente a maior quantidade de hidrogénio líquido do mundo, principalmente para propulsão de foguetes e como combustível para células de combustível (Acutair, 2004, p. 1)

1959 – Francis T. Bacon da Universidade de Cambridge, em Inglaterra, construiu a primeira célula a combustível de hidrogénio-ar. O sistema de 5 quilowatt (kW) alimentava uma máquina de soldadura. Ele chamou ao seu projeto de célula de combustível de “Bacon Cell”. Mais tarde naquele ano, Harry Karl Ihrig, engenheiro da Allis - Chalmers

Manufacturing Company, apresentou o primeiro veículo movido por uma célula de combustível: um trator de 20 cavalos. Células de combustível de hidrogénio, baseadas no projeto de Bacon, foram usadas para gerar eletricidade, calor e água a bordo do famoso veículo espacial Apollo e em todas as missões subsequentes do space shuttle (Acutair, 2004, p. 1).

1988 – O Tupolev Design Bureau da União Soviética converteu com sucesso um jato comercial TU-154 de 164 passageiros para operar com um dos três motores de jato com hidrogénio líquido. O voo inaugural durou 21 minutos (Acutair, 2004, p. 2).

2010 – o UAV Phantom Eye movido a hidrogénio foi introduzido a julho de 2010 como sucessor. Rapid 200FC é outro projeto ambicioso que realizou seis voos experimentais movidos a hidrogénio gasoso. A iniciativa alemã do DLR Institute of Engineering Thermodynamics, ‘DLR HYR’, uma aeronave de quatro lugares, voou a 29 de setembro de 2016, com combustível de hidrogénio (T. Yusaf, 2024, pp. 1026-1045).

2021 – Em testes recentes do Hyflyer I, projeto da ZeroAvia para o desenvolvimento de aeronaves movida a hidrogénio, o com seis lugares atrás foram bem-sucedidos e espera-se que voe com 20 passageiros no próximo projeto (T. Yusaf, 2024, pp. 1026-1045).

## **2.5 Desafios do uso do hidrogénio na aviação**

Como já foi referido, ao longo dos anos foram enfrentados vários desafios relacionados com o uso do hidrogénio como combustível. Atualmente as empresas responsáveis pela produção, armazenamento e distribuição deste gás seguem uma vasta lista de regras e normas de segurança, no entanto como os desafios são constantes existe uma persistência na pesquisa e desenvolvimento de mais e melhores métodos para o manuseamento do hidrogénio.

O tipo de infraestrutura de abastecimento de hidrogénio é limitado, especialmente em aeroportos. Seria necessário investir numa rede de distribuição ampla e eficiente, além das instalações de abastecimento nos aeroportos, para atender as exigências do armazenamento de hidrogénio.

Na Figura 3 pode ser observado o funcionamento da célula de combustível, a qual consiste no seguinte:

- Primeiro os átomos de hidrogénio entram no ânodo;
- Segundo os átomos são separados dos seus eletrões no ânodo;
- Terceiro, a carga positiva (prótons) passa pela membrana para o cátodo e a carga negativa, eletrões são forçados à passagem por um circuito, o qual gera eletricidade;

- Por último, após passagem pelo circuito, os elétrons combinam com os prótons e com o oxigênio do ar para gerar os elementos resultantes da célula, água e calor (Association, F., 2024).

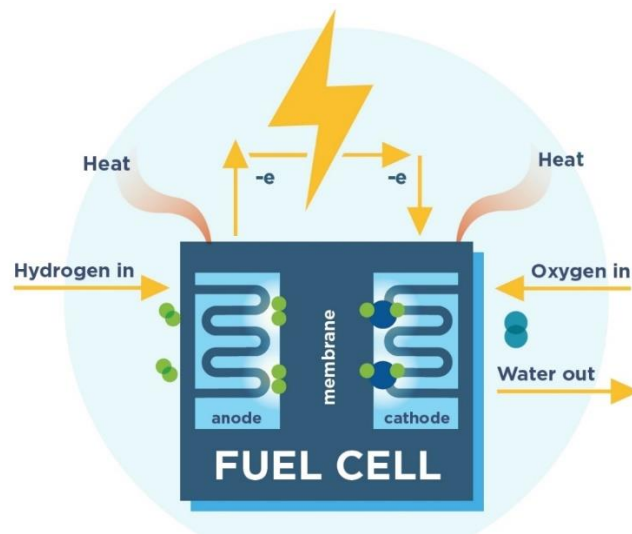


Figura 3: Célula de combustível

Fonte: (Association, F., 2024).

### 2.5.1 Produção

O hidrogênio normalmente existe combinado com outros elementos, como o oxigênio na água e o carbono no cloro. Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece sozinho como um único elemento ( $H_2$ ), estando no petróleo, carvão, metano, água, gás natural e também em todo o tipo de vegetação (A. M. S. Santos, 2021, p. 30).

Surge assim a necessidade de separação dos átomos de hidrogênio dos restantes elementos aos quais se encontra associado. Como já foi dito anteriormente, o hidrogênio tem propriedades que o afirmam como um combustível poderoso, portanto a análise da energia usada para o separar é compensatória relativamente à que ele nos fornece. Na Figura 4 pode ser observado o ciclo de vida do hidrogênio (Estêvão, 2008, p. 12).

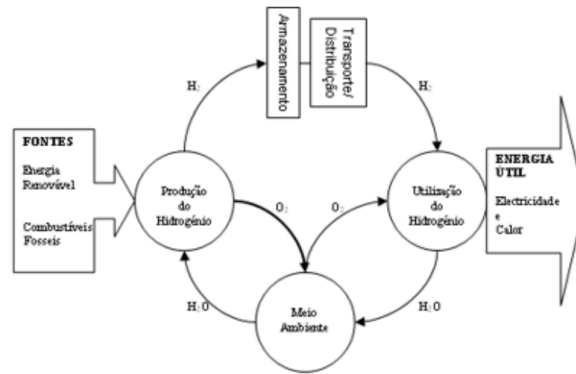


Figura 4: Ciclo de vida do hidrogénio

Fonte: (Estêvão, 2008, p. 13)

Para a separação do hidrogénio estão disponíveis diversos processos. Em laboratório é obtido pela reação de ácidos com metais (Estêvão, 2008, p. 13).

- Reação de hidretos metálicos;
- Reação de liga de ferro – titânio;
- Cloroplastos artificiais (Melvin Klain);
- Reação de liga de níquel – magnésio;
- Reações de metais com ácidos.
- Steam Methane Reforming (SMR) (Estêvão, 2008, p. 13).

Industrialmente é obtido pelo eletrólise:

- Eletrólise da água;
- Decomposição da amónia;
- Decomposição do metanol;

O processo que apresenta atualmente um custo de produção menor, e mais difundido é o Steam Methane Reforming (SMR). Trata-se de um processo de separação do hidrogénio em forma de gás como mostra na Figura 5. “O gás natural é selecionado como a fonte energética principal não só pelo atrativo processo económico que é o SMR, mas também porque o gás natural está disponível em grande escala, tendo boas infraestruturas de distribuição e transporte” (Estêvão, 2008, p. 13).

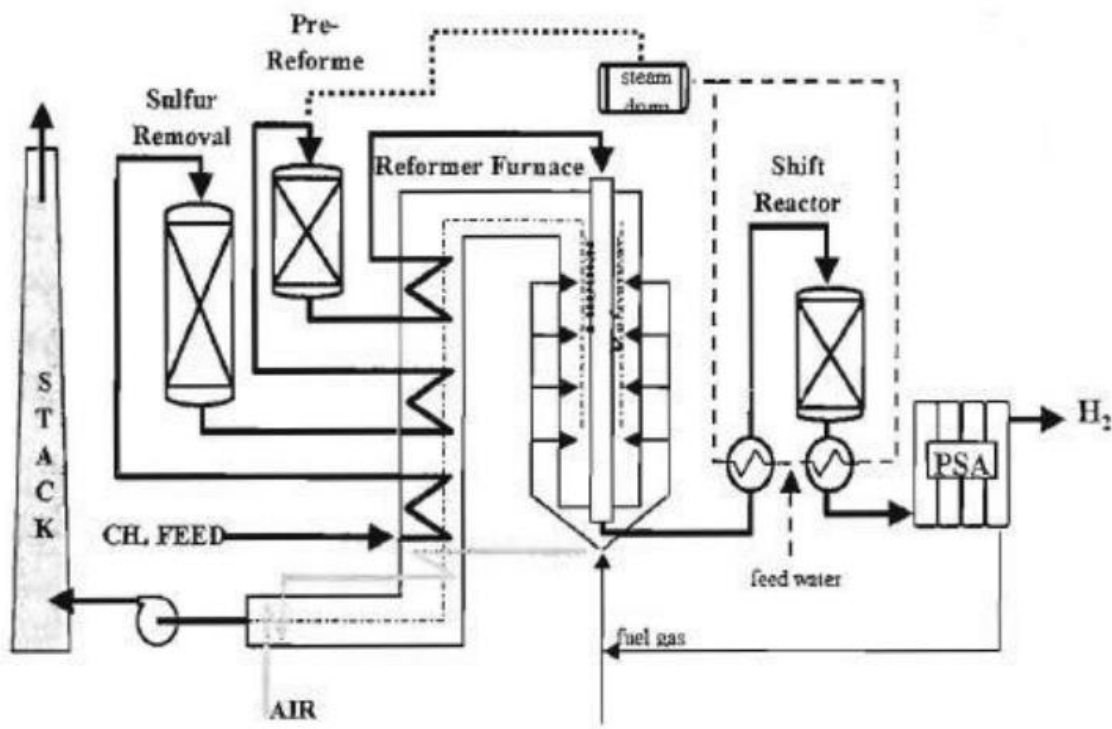


Figura 5: Processo de obtenção de hidrogénio pelo método de SMR.

Fonte: (Estêvão, 2008, p. 14).

“No entanto, de acordo com um estudo efetuado em diversos processos de obtenção de hidrogénio, ficou provado que a eletrólise é o processo mais caro relativamente aos outros processos de obtenção deste, pois implica maior gasto de energia”, como se observa na Tabela 1 e na

Tabela 2 (Estêvão, 2008, p. 14).

“Nestas tabelas podemos ver que para a eletrólise da água, a energia necessária na prática para a obtenção de potência energética é semelhante aos outros processos enunciados, no entanto a percentagem de produção obtida” de H<sub>2</sub> “é muito reduzida comparativamente com os restantes métodos, que conseguem obter uma maior fração de produção para a mesma quantidade de energia utilizada” (Estêvão, 2008, p. 14).

“Como podemos ver também que para uma célula eletrolítica o consumo de eletricidade, na formação de hidrogénio, é muito superior às outras tecnologias mencionadas” (Estêvão, 2008, p. 14), ver tabela 1 e 2.

Tabela 1: Energia gasta para cada processo de obtenção de hidrogénio.

Splitting Process	Energy Required [kWh/N <sup>3</sup> of H <sub>2</sub> ]		Status	Efficiency [%]	Costs Relative to CH <sub>4</sub> Steam Reform	Fraction of Production [%]
	In Theory	In Practice				
Methane Steam Reforming	0.78	2 – 2.5	Mature	70 – 80	1	48
Methane Cracking			Mature	54	(0.9)	
Partial Oxidation of Heavy Oil	0.94	4.9	Mature	70	1.8 (1.6)	30
Naphtha Reformation			Mature			
Coal Gasification (TEXACO)	1.01	8.6	Mature	60	1.4 – 2.6 (2.3)	18
Partial Oxidation of Coal			Mature	55		
HYDROCRAB			R&D		(0.9)	
Steam Iron			R&D	46	(1.9)	
Chloralkali Electrolysis			Mature		By product	4
Water Electrolysis	3.54	4.9	R&D Mature	27 <sup>(3)</sup>	5 – 10 (3.0)	
High Temperature Electrolysis			R&D	48	(2.2)	
Thermochemical Cycles			Early R&D	35 – 45	6	
Biomass Conversion			Early R&D		2 – 2.4	--
Photolysis			Early R&D		< 10	

Fonte: (Estêvão, 2008, p. 15).

Tabela 2: Descrição de tecnologias de produção de hidrogénio

Technology Description	Natural Gas Consumption	Electricity Consumption
Centralized steam methane reformer (Caloric)	3.2 kg natural gas / kg hydrogen	0.32 kWh/kg hydrogen
Decentralized steam methane reformer (H <sub>2</sub> Gen Innovations)	3.2 kg natural gas / kg hydrogen	1.4 kWh / kg hydrogen
Decentralized Electrolyzer	N/A	50 kWh / kg hydrogen

Fonte: (Estêvão, 2008, p. 16).

## 2.5.2 Distribuição

O hidrogénio não é um gás de efeito estufa, no entanto, a sua presença na atmosfera afeta o comportamento de outros gases de efeito estufa. A alta concentração do hidrogénio aumenta a quantidade de vapor de água na estratosfera superior e a concentração de ozono na troposfera (E. & Martins, 2023).

Foram estimadas taxas de fuga de hidrogénio entre 1 e 10% quando este é produzido. Considerando uma taxa de fuga mais baixa, o impacto climático em relação ao impacto da produção e consumo de hidrogénio seria baixo. No entanto, o impacto climático de uma taxa de fuga alta poderia ser significativo. A queima de combustíveis fósseis também emite hidrogénio, então a redução do uso de combustíveis fósseis compensa parte das emissões de fuga e escoamento de hidrogénio (E. & Martins, 2023).

Transportar o hidrogénio na sua forma pura não é a única opção. Outra abordagem é converter o hidrogénio em amoníaco<sup>7</sup>, o método Haber-Bosh, para transporte e convertê-lo de volta a hidrogénio<sup>8</sup> no seu destino final. O amoníaco já é amplamente distribuído como fertilizante para agricultura.

O amoníaco é transportado em forma líquida à temperatura ambiente e a apenas 10 bar. Transportar o hidrogénio via amoníaco permitiria o uso da distribuição existente de amoníaco por meio de cadeias de tubulação, navios, comboios e camiões, evitando a necessidade de uma infraestrutura completamente nova para distribuição de hidrogénio. No entanto, as perdas de energia das conversões químicas necessárias deste método de transporte podem torná-lo pouco atrativo (E. & Martins, 2023).

### 2.5.3 Armazenamento de hidrogénio a bordo

O armazenamento de hidrogénio é também um desafio significativo devido às suas propriedades físicas e químicas, dado isto, a investigação relativa a métodos de armazenamento do hidrogénio continua em curso.

De acordo com a norma ISO 15869, existem dois tipos de revestimentos internos de depósitos comuns: polímeros de alto peso molecular em depósitos e revestimentos metálicos (alumínio, ligas de cromo) em recipientes de pressão para armazenamento. Por outro lado, não é fácil utilizar tanques de hidrogénio em veículos de passageiros terrestres e aéreo devido aos desafios relacionados ao modo de transporte e segurança (T. Yusaf, 2024).

O uso de depósitos de hidrogénio líquido (LH<sub>2</sub>) a bordo cria vários problemas, incluindo vida útil, estabilidade do ciclo termodinâmico<sup>9</sup>, necessidades de manutenção e integração ao

---

<sup>7</sup> Reação química de hidrogénio com azoto (N<sub>2</sub>) na presença de um catalisador, geralmente óxido de ferro (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), em condições de alta pressão (200 a 300 atmosferas) e temperatura (400 a 500°C). A equação química para esta reação é:  $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$  (nota do autor) ¶

<sup>8</sup> A decomposição do amoníaco em seus elementos constituintes, pode ser realizado através da reação de decomposição térmica do amoníaco, geralmente em altas temperaturas (> 700°C), resultando na quebra da molécula de amoníaco em hidrogénio e azoto. A equação química para esta reação é:  $2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$  (nota do autor) .

<sup>9</sup> Devido às diferenças de temperatura que podem causar a instabilidade do hidrogénio em estado líquido ou gasoso podendo resultar em explosão (nota do autor) .

design global da aeronave. A qualidade necessária de isolamento, e consequentemente a massa do depósito e o desempenho da aeronave, são fortemente influenciadas pelo manuseio em solo e pela flexibilidade operacional em termos do período sem libertação de hidrogénio gasoso (J. Hoelzen, 2022).

#### **2.5.4 Questões de segurança e certificação**

A combustão de hidrogénio atinge temperaturas superiores face ao que se observa na combustão dos combustíveis usados atualmente na aviação. Contudo, como o hidrogénio não se acumula, não resulta em incêndios longos, no solo o que contrasta com a duração de incêndios com combustíveis fósseis da aviação, o que significa que a dose de radiação térmica proveniente da exposição num incêndio nestes casos pode ultrapassar rapidamente a radiação observada num incêndio de hidrogénio, malgrado a temperatura de combustão de H<sub>2</sub> ser superior (E. & Martins, 2023).

Em termos de certificação, ainda não são conhecidas barreiras significativas que possam impedir a certificação de uma aeronave movida a hidrogénio. As maiores incógnitas são as futuras regulamentações de armazenamento e distribuição de hidrogénio. No entanto já foi adotada uma perspetiva conservadora, sugerindo que o armazenamento de hidrogénio deve estar longe dos passageiros.

Como nenhuma aeronave civil movida a hidrogénio foi ainda certificada, permanecem dúvidas sobre os requisitos. Novas regulamentações específicas, e outras já definidas como CS-23 e CS-25, para sistemas de aeronaves movidas a hidrogénio serão estabelecidas nos próximos anos (E. & Martins, 2023).

O processo de certificação para aeronaves movidas a hidrogénio geralmente estaria abrangido pelos regulamentos e normas existentes da EASA, especialmente aqueles relacionados com sistemas de propulsão alternativos e considerações ambientais.

As normas de aeronavegabilidade CS-23 e CS-25 são as normas que cobrem uma ampla gama de requisitos relacionados com o design, construção, sistemas e desempenho das aeronaves. Se uma aeronave movida a hidrogénio for desenvolvida, teria de cumprir os requisitos aplicáveis delineados nestes documentos CS.

Normas relativa aos motores, CS-E, contém especificações de certificação para motores de aeronaves. Embora estas especificações se apliquem principalmente a motores de combustão tradicionais, podem ser adaptadas ou complementadas para abordar as características únicas dos sistemas de propulsão a hidrogénio, como armazenamento de combustível, combustão e emissões.

#### **2.5.5 Estrutura da aeronave**

As atuais configurações em estudo de aeronaves movidas a hidrogénio diferem dos designs convencionais de aeronaves devido aos requisitos de armazenamento, abastecimento, controlo e segurança no manuseamento de hidrogénio.

Seja armazenado como líquido ou gás, o hidrogénio ocupa pelo menos quatro vezes mais volume do que o jet fuel para a mesma quantidade de energia produzida, o que leva à necessidade de haver depósitos com maior dimensão para o poder armazenar, tanto a bordo como no solo (E. & Martins, 2023).

Como as asas têm uma alta razão de área superficial por volume, os tanques geralmente são colocados noutra lugar, e a asa fica "seca". Uma asa seca não se beneficia mais da redução de carga devido ao peso do combustível, provavelmente resultando num design mais pesado. Um projeto estrutural mais detalhado, considerando todas as condições de carga relevantes e aeroelasticidade dinâmica, seria necessário para projetar uma asa seca com trocas de ideais entre peso e arrasto (E. & Martins, 2023).

Para o armazenamento de hidrogénio gasoso ( $\text{GH}_2$ ), podem ser viáveis depósitos de pressão longos e finos que se encaixam em grandes asas. No entanto, o  $\text{GH}_2$  é proposto principalmente para aeronaves mais pequenas, que têm asas que podem ser demasiado finas para que o armazenamento baseado em asas seja eficaz. Por último, as asas das aeronaves atuais não têm o volume necessário para armazenar hidrogénio suficiente para voos comerciais longos (E. & Martins, 2023).

As configurações mais comumente propostas envolvem a integração dos depósitos na fuselagem de uma configuração convencional. A Figura 6 mostra alguns exemplos dessas configurações. Algumas configurações reservam toda a secção transversal de uma parte da fuselagem para um ou mais depósitos. Esta abordagem oferece a relação volume do depósito para área de superfície mais alta porque os depósitos utilizam toda a largura da fuselagem (E. & Martins, 2023).



Figura 6: Configuração estrutural para aeronaves com depósitos de hidrogénio.

Fonte: (E. & Martins, 2023).

Para aeronaves com uma fração de combustível baixa (aeronaves menores com alcance mais curto), pode ser possível esta configuração com apenas um depósito de fuselagem atrás do bulkhead de pressão traseiro.

Restrições de equilíbrio e estabilidade obrigam aeronaves maiores com esta configuração a terem tanques dianteiros e traseiros para limitar o movimento do centro de gravidade. O depósito dianteiro é colocado entre a cabine e o cockpit.

Não está claro se os regulamentos exigem o acesso do piloto à cabine, por isso pode ser necessário um corte no depósito dianteiro. Esta configuração pode não ser adequada para aeronaves de corredor único se o acesso for necessário, pois o diâmetro da fuselagem não é grande o suficiente para um corte viável (E. & Martins, 2023).

Outra configuração da fuselagem possível coloca o depósito de LH<sub>2</sub> acima da fuselagem ao longo do seu comprimento. Devido aos depósitos serem mais longos e mais finos, requerem mais isolamento para uma dada quantidade de combustível.

Além disso, as suas paredes não podem funcionar como estrutura da fuselagem para criar depósitos integrais. Estes fatores acarretam uma penalização de peso, resultando num desempenho degradado em comparação com a configuração de depósitos de secção transversal completa.

Foi também realizado um estudo que compara o consumo de combustível de uma configuração que armazena combustível em depósitos grandes à frente e atrás da cabine na secção transversal completa com uma que armazena combustível acima da cabine, e também uma combinação dos dois. (E. & Martins, 2023)

Embora a configuração de depósitos sobre a cabine ofereça várias vantagens em termos de segurança, colocar os tanques mais alto protege-os de detritos na aterragem e descolagem que poderiam perfurar o tanque. Também são mais seguros se for necessária uma aterragem de barriga (por exemplo, se o trem de aterragem falhar ao estender). Por fim, posicionar os tanques acima da cabine e fora do vaso de pressão aumenta a probabilidade de que as fugas se dissipem para cima e longe da cabine de passageiros.

O governo dos Estados Unidos encarregou a NASA, a Lockheed Martin e outros de realizar a primeira pesquisa aprofundada sobre as dificuldades no design de aeronaves comerciais com LH<sub>2</sub> durante a crise do petróleo nos anos 1970 (T. Yusaf, 2024).

Algumas das dificuldades na implementação de tanques de combustível de LH<sub>2</sub> na aviação são:

1. Espaço disponível: O LH<sub>2</sub> requer cerca de 4 vezes mais volume de armazenamento do que o jet fuel, exigindo modificações no layout do avião que afetam a sua eficiência aerodinâmica e reduzem o espaço disponível para carga útil;
2. Isolamento: é necessário para minimizar a transferência de calor para o tanque e manter a pressão interna e a temperatura em níveis moderados.

3. Explosões e o risco de incêndio: devido às reações exotérmicas violentas resultantes da ignição com oxigénio ou despressurização abrupta do tanque devido a falha estrutural;
4. Vida útil da fadiga: Ciclos de abastecimento são fontes potenciais de falha por fadiga num tanque de combustível de LH<sub>2</sub>. O enfraquecimento devido a baixas temperaturas aumenta a resistência à tração do material e o seu limite de resistência. No entanto, a diminuição associada da ductilidade reduz a tenacidade do material e, portanto, o número de ciclos até à falha. Além disso, o contacto contínuo com o hidrogénio gera fragilização por hidrogénio que pode acelerar a iniciação de falhas superficiais;
5. Peso vazio: Aumento no Peso Operacional Vazio do avião devido ao reforço estrutural, isolamento e instalações de manutenção necessárias num tanque de combustível de LH<sub>2</sub>;
6. Localização do centro de gravidade (C.G.): Os aviões comerciais modernos transportam a maior parte do seu combustível em tanques integrados localizados em cada asa do avião. Esta configuração evita grandes alterações na localização do C.G. à medida que o combustível é consumido. Diversos estudos mostraram que tal configuração é inviável para aviões comerciais de LH<sub>2</sub> devido ao volume extensivo necessário. Por esse motivo, o LH<sub>2</sub> tem de ser distribuído ao longo do eixo longitudinal do avião - uma localização muito sensível para a estabilidade longitudinal do avião (A. Gomez, 2019).

Por estas razões, o design dos tanques de combustível de LH<sub>2</sub> é um dos principais impulsionadores no desenvolvimento de um avião comercial de LH<sub>2</sub>.

## 2.6 Propulsão a hidrogénio

A combustão em turbinas e as células de combustível de hidrogénio são os dois métodos mais comuns de propulsão a hidrogénio. Como o hidrogénio tem propriedades de combustão diferentes do jet fuel, é necessário o desenvolvimento de novos motores, adaptados especificamente para hidrogénio. No entanto, é possível modificar as turbomáquinas existentes para permitir a utilização de hidrogénio como combustível, havendo que adaptar o sistema de combustão (principalmente sistema de injeção e de fornecimento de combustível. Por outro lado, as células de combustível convertem o hidrogénio em eletricidade, que pode ser usada para alimentar um motor elétrico que opere com hélice ou *ducted fan* (E. & Martins, 2023).

A maior parte do impulso disponibilizado através de motores turbofans modernos é gerada pela *fan*, então é concebível que uma hélice envolvida por um ducto possa igualar o impulso de um turbofan (E. & Martins, 2023).

As células de combustível produzem eletricidade a partir de hidrogénio com eficiências tão altas quanto 60%<sup>10</sup> e apenas vapor de água como produto resultante desta reação. As desvantagens das células de combustível são desafiadoras por serem dimensionadas para aplicações de alta potência devido a restrições específicas de potência e térmicas. No entanto, a combustão resolve os problemas específicos de potência e térmicos das células de combustível (E. & Martins, 2023).

A Figura 7 mostra os sistemas de propulsão escolhidos por vários conceitos da indústria. As células de combustível parecem ser a escolha dominante para aeronaves pequenas de curto raio de ação, enquanto a combustão de hidrogénio domina para aeronaves grandes de longo alcance (E. & Martins, 2023).

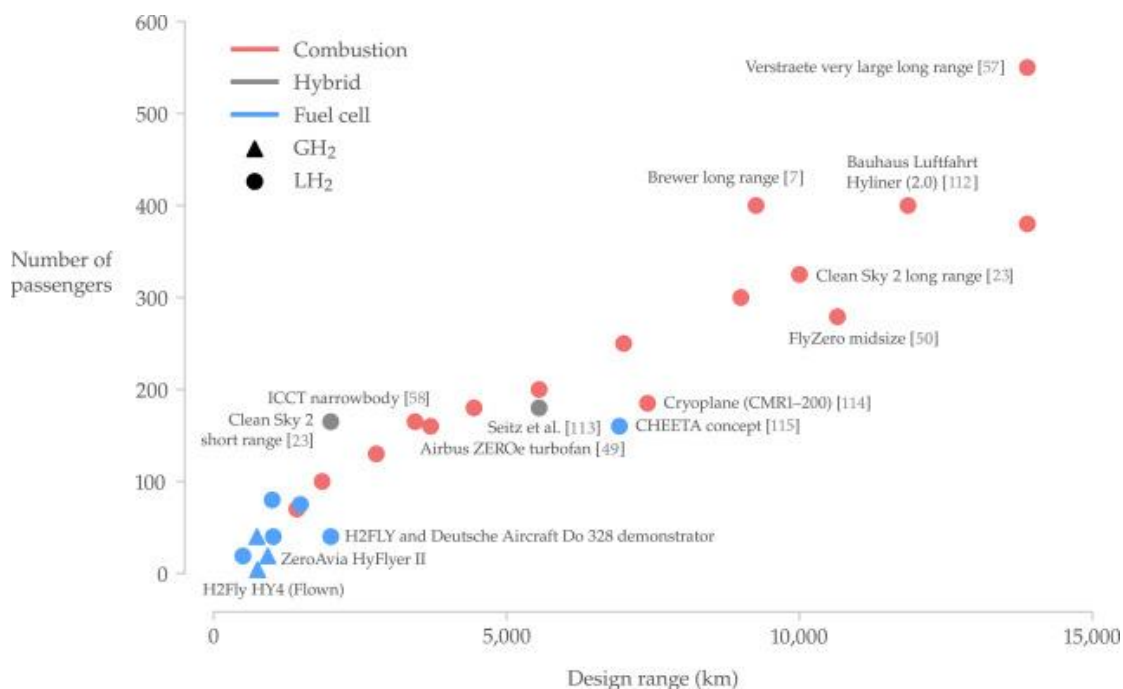


Figura 7: Tipos de sistemas de propulsão para várias aeronaves.

Fonte: (B. Benjamin, 2019, p. 19).

A capacidade das células de combustível de manter a sua eficiência pode possibilitar sistemas de propulsão eficientes para essas aeronaves comparativamente ao que é possível com a combustão de hidrogénio. À medida que os requisitos de potência do sistema de propulsão aumentam, a combustão eventualmente substituirá as células de combustível. Isso ocorre porque

<sup>10</sup> 60% da energia química contida no hidrogénio é convertida em energia elétrica, utilizada durante o processo de conversão dentro da célula de combustível (nota do autor).

os turbofans têm maior potência específica e menos desafios no controlo térmico do que as células de combustível (E. & Martins, 2023).

Um sistema de propulsão com motores elétricos alimentados por células de combustível para uma aeronave do tamanho de um 737 seria três vezes mais pesado face a um sistema turbofan de tamanho semelhante, devido aos depósitos de hidrogénio (E. & Martins, 2023).

Na Figura 8 encontram-se as duas primeiras aeronaves protótipo que voaram com propulsão a hidrogénio:



Figura 8:(Esq.) HY4 da H2FLY, (Dir.) Dornier 228 da ZeroAvia.

Fonte: (H2FLY, n.d.) e (ZeroAvia, 2023).

A primeira aeronave pilotada, a HY4, com propulsão a hidrogénio da equipa H2FLY, completou quatro voos com motores elétricos alimentados por células de combustível de hidrogénio líquido como parte da sua campanha de testes de voo, incluindo um voo que durou mais de três horas (H2FLY, n.d.).

Outra aeronave, "Hydrogen Zero-Emission Aircraft", da ZeroAvia é movida por motores elétricos os quais são alimentados pela eletricidade gerada pelas células de combustível de hidrogénio. Este hidrogénio é consumido numa célula de combustível para gerar eletricidade que alimenta motores elétricos. A ZeroAvia completou o desenvolvimento da sua aeronave protótipo em julho de 2023 (ZeroAvia, 2023).

### **2.6.1 Estudos de casos e exemplos atuais**

A GKN Aerospace lidera um programa inovador de colaboração no Reino Unido, chamado H2GEAR, para desenvolver o primeiro sistema de propulsão a hidrogénio da empresa para aeronaves regionais, estas com menores dimensões.

O H2GEAR coloca a GKN Aerospace no centro dos desenvolvimentos tecnológicos necessários para o futuro da aviação mais sustentável. A sua tecnologia irá concentrar-se em melhorar significativamente o desempenho de aeronaves sub-regionais movidas a hidrogénio, possibilitando, por sua vez, aplicações em aeronaves maiores e viagens mais longas (GKN, 2023).

Outro estudo a decorrer é pela Airbus, o ZEROe, que visa o desenvolvimento de 3 aeronaves com hidrogénio como combustível, gerado a partir de células de combustível. O primeiro conceito é a aeronave com combustão de hidrogénio, a qual será composta por turbinas de gás com injetores de combustível modificados e sistemas de combustível que são alimentados por hidrogénio (AIRBUS, 2024).

As empresas (TECNAM, BRP-ROTAX e SIEMENS) uniram forças no projeto "H3PS" em 2018, no âmbito de um fundo europeu Horizon 2020. H3PS engloba três "Hs": 'high power', 'hybrid powertrain' e 'high-scability aircraft', acreditando-se ser o primeiro do tipo já desenvolvido para aviação geral, que irá ajudar a reduzir o consumo de combustível, mantendo e até mesmo aumentando a autonomia da aeronave. O projeto introduz tecnologia avançada para uma classe de potência menor, sendo escalável para aeronaves de aviação geral maiores (Rolls-Royce, 2024).

## 2.7 Infraestruturas de produção e cadeia de abastecimento de hidrogénio nas operações aéreas

A distribuição do hidrogénio pode ser feita por meio de condutas, como ocorre com o gás natural, ou por transporte em camiões-tanque, navios ou redes de condutas específicas para o hidrogénio.

A cadeia de abastecimento de H<sub>2</sub> nas operações engloba todas essas etapas, desde a produção até ao uso final do hidrogénio (ver a **Error! Reference source not found.** 9). É necessário garantir a disponibilidade do hidrogénio em quantidade e qualidade adequadas, bem como a infraestrutura necessária para o seu armazenamento, transporte e distribuição. Apresenta-se em seguida um resumo das infraestruturas necessárias para apoiar uma indústria aeronáutica baseada no hidrogénio:

- Produção de hidrogénio: Equipamentos para realizar a eletrólise da água, separando o hidrogénio do oxigénio, utilizando eletricidade renovável; Parques eólicos, campos de painéis solares ou outras fontes renováveis para alimentar os eletrolisadores;
- Armazenamento de hidrogénio: Instalações para armazenar o hidrogénio produzido; Equipamentos para comprimir o hidrogénio a pressões adequadas para armazenamento eficiente;
- Distribuição de hidrogénio: Infraestrutura para transportar o hidrogénio do local de produção para os pontos de distribuição; Postos de abastecimento para aeronaves, semelhantes às atuais bombas de combustível, mas adaptadas para o fornecimento de hidrogénio.

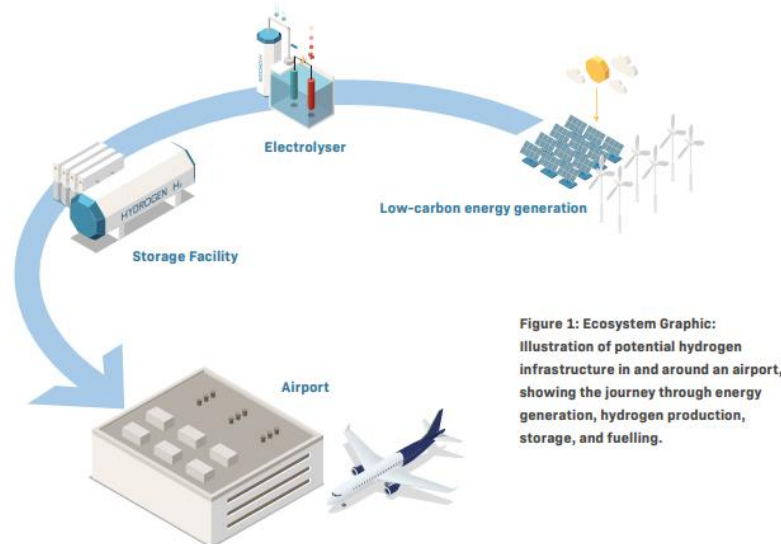


Figura 9: Tipo de produção, armazenamento e transporte de hidrogênio.

Fonte: (Aviation, 2024)

## 2.8 Investigação e desenvolvimento

É importante notar que o desenvolvimento de aeronaves movidas a hidrogênio ainda está em ascensão, e muitas empresas e agências governamentais estão a investir na pesquisa e desenvolvimento para tornar esta tecnologia mais viável e acessível no futuro.

Os quatro maiores fabricantes de motores de aeronaves comerciais (GE Aerospace, Rolls-Royce, Pratt & Whitney e Safran) publicaram planos para construir e testar motores de aeronaves movidos a hidrogênio por combustão. A CFM (uma junção entre a GE Aerospace e a Safran) está a modificar um turbofan GE Passport para funcionar com hidrogênio. A Airbus planeia voar com um motor modificado num modelo do A380 com tanques de hidrogênio líquido no ano de 2025.

A Pratt & Whitney anunciou o projeto HySIITE, para desenvolver um motor de combustão de LH<sub>2</sub> com injeção de vapor para reduzir as emissões de NO<sub>x</sub>. O fabricante afirma que alcançará maior eficiência térmica e custos operacionais mais baixos com as células de combustível face à combustão de SAF<sup>11</sup> (E. & Martins, 2023).

## 2.9 Prespetivas e tendências futuras

O voo com propulsão a hidrogênio, seja por meio de combustão ou células de combustível, teve um impulso significativo nos últimos anos. Projetos inovadores como a iniciativa ZEROe da Airbus e avanços na tecnologia de motores a hidrogênio são passos promissores para reduzir as emissões e ultrapassar os limites da inovação na aviação.

---

<sup>11</sup> Combustíveis de aviação sustentáveis: são combustíveis que são produzidos a partir de fontes renováveis, como biomassa, resíduos agrícolas, óleos vegetais, entre outros (nota do autor).

No entanto, a implementação de aeronaves movidas a hidrogénio e o desenvolvimento das infraestruturas necessárias irá levar tempo, resultando em limitações no cumprimento do prazo para alcançar a completa descarbonização até 2050.

O CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), iniciativa internacional para compensar e reduzir as emissões de carbono na aviação, introduz medidas para monitorizar e mitigar a pegada de carbono da indústria aeronáutica. Além disso, a indústria da aviação está a ganhar um impulso no avançar do uso dos SAFs, com um número crescente de países a implementá-los e a expandir o seu uso nos aeroportos (Alsulaiman, 2024, p. 13).

O crescente compromisso com a produção e utilização dos SAFs indica uma mudança significativa em direção à sustentabilidade dentro do setor aeronáutico. Projeções de longo prazo indicam que os SAFs, incluindo as variedades à base de hidrogénio, desempenharão um papel crucial na conquista de emissões líquidas zero e na mitigação do impacto ambiental da aviação. Algumas aeronaves a operar com os SAF são A321neo, Boeing 787 (Virgin Atlantic) e também o A380 (Emirates Airlines).

Em resumo, a indústria da aviação está a ter passos significativos na adoção de tecnologias de propulsão alternativas e combustíveis sustentáveis para mitigar seu impacto ambiental. No entanto, ainda há uma jornada considerável pela frente.

## **2.10 Síntese**

Em conclusão, a análise do uso do hidrogénio na indústria aeronáutica revela um cenário dinâmico e promissor, mas também desafia as normas estabelecidas. A transição para aeronaves movidas a hidrogénio é impulsionada por um desafio global para reduzir as emissões de gases de efeito de estufa e avançar em direção a uma aviação mais sustentável. No entanto, esta mudança não está isenta de desafios significativos.

Entre as vantagens notáveis, destaca-se o potencial para uma redução drástica nas emissões de gases de efeito estufa, considerando a produção e o uso de hidrogénio verde. Além disso, a diversificação das fontes de energia na aviação, com foco no hidrogénio, pode fortalecer a resiliência do setor diante de incertezas nas fontes de combustível tradicionais.

No entanto, as desvantagens também são evidentes. A complexidade do armazenamento, transporte e manipulação do hidrogénio, bem como a necessidade de infraestruturas específicas, são desafios logísticos significativos a serem superados futuramente. Além disso, a redefinição da arquitetura das aeronaves, considerando novos combustíveis, introduz uma série de desafios tecnológicos e de design.

As discussões sobre a integração do hidrogénio na aviação não devem ser limitadas apenas pelo desenvolvimento de tecnologias de propulsão, mas também considerar aspetos

fundamentais relacionados com a aeronaves, tais como a aeroelasticidade, controlos de voo, e ainda as infraestruturas aeroportuárias. O equilíbrio entre vantagens ambientais e desafios técnicos deve ser cuidadosamente gerido para garantir que a transição para o hidrogénio na indústria aeronáutica seja sustentável em todos os aspetos.

Numa última análise, enquanto o hidrogénio promete uma revolução na aviação, a jornada em direção à aeronave movida a hidrogénio deve ser orientada por abordagens colaborativas, inovação contínua e um compromisso coletivo pela sustentabilidade ambiental. A superação destes desafios apresentados abrirá caminho para uma aviação mais limpa e eficiente, contribuindo para um futuro mais sustentável e resiliente.

# Capítulo 3: Normas do uso de H<sub>2</sub> vs segurança operacional

## 3.1 Painel europeu de segurança do hidrogénio

A nível internacional existe uma vasta gama de programas de segurança do hidrogénio encontrando-se bem estabelecida e observando-se um rápido desenvolvimento (Masons, 2023).

Em 2017, na Europa, foi apresentado o Painel Europeu de Segurança do Hidrogénio (EHSP) para apoiar a Iniciativa Conjunta de Células a Combustível e Hidrogénio da UE em projetos e programas. O EHSP concentra-se em promover a segurança na produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogénio, reconhecendo que qualquer falha possa ter um impacto grande na perceção pública do hidrogénio e das tecnologias de células a combustível (Masons, 2023).

O objetivo geral de proteção do EHSP é excluir ou, pelo menos, minimizar os potenciais riscos para prevenir impactos em pessoas, propriedades e no meio ambiente (Masons, 2023).

A planificação de segurança eficaz identifica, analisa e mitiga ou elimina potenciais perigos, mecanismos de falha e os incidentes relacionados associados a qualquer processo de trabalho ou sistema. Outros aspetos de segurança que podem ser adversamente afetados por uma falha devem ser considerados. Estes aspetos incluem ameaças ou impactos nos seguintes pontos (Panel H. S., 2020, p. 1):

- Pessoas. Os perigos que representam um risco de lesão ou perda de vida para as pessoas devem ser identificados e eliminados ou mitigados. Uma avaliação completa de segurança considera não apenas o pessoal diretamente envolvido no trabalho, mas também outros que estão em risco devido a esses perigos.
- Equipamento. Danos ou perda de equipamentos ou instalações devem ser prevenidos ou minimizados. Danos ao equipamento podem ser tanto a causa quanto o resultado de incidentes. Uma falha de equipamento pode resultar em danos colaterais a equipamentos e propriedades próximas, o que pode desencadear falhas adicionais de equipamentos ou até levar a riscos adicionais. Uma planificação de segurança eficaz considera e minimiza o risco sério de danos a equipamentos e propriedades.
- Ambiente. Os danos ao ambiente devem ser prevenidos. Qualquer aspeto de um ambiente natural ou construído que possa ser prejudicado devido a uma falha deve ser identificado e analisado. Deve ser considerada uma qualificação dos modos de falha que resultam em danos ambientais.

A planificação de segurança eficaz é um processo contínuo. Um plano de segurança deve ser revisado periodicamente e sempre que forem feitas alterações, como parte de um esforço geral para dar atenção contínua e prioritária à segurança do projeto (Panel H. S., 2020, p. 2).

### **3.2 Legislação da União Europeia na abordagem ao hidrogénio na aeronáutica.**

A legislação europeia, como Diretivas e Regulamentos, prevalecem sobre as leis nacionais de cada país. Para desempenharem as suas funções e de acordo com as disposições do tratado que institui a Comunidade Europeia (o Tratado CE), o Parlamento, agindo em conjunto com o Conselho, o Conselho e a Comissão, elaboram regulamentos e emitem diretivas de acordo com o Art. 249 do Tratado CE (Panel E. H., 2023, p. 39).

- Diretivas: Uma diretiva será vinculativa, quanto ao resultado a ser alcançado, para cada Estado-Membro a que se destina, mas deixará às autoridades nacionais a escolha da forma e dos métodos.

- Regulamentos: Um regulamento terá aplicação geral. Será vinculativo em todos os seus elementos e diretamente aplicável em todos os Estados-Membros. A UE tem, por exemplo, um regulamento para a homologação de veículos a hidrogénio: Regulamento da Comissão (UE) No 406/2010 de 26 de abril de 2010, que implementa o Regulamento (CE) No 79/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho sobre a homologação de veículos a motor movidos a hidrogénio.

Os requisitos para produtos e requisitos operacionais são separados na legislação da UE, uma vez que pertencem a objetivos políticos diferentes e são regidos por diferentes artigos do Tratado da EU (Panel E. H., 2023, p. 40).

Para além das diretivas da UE listadas abaixo, existem também outros regulamentos provenientes de outras fontes. O transporte internacional de mercadorias perigosas é regulado por vários acordos internacionais, que incluem ADR (rodoviário), RID (ferroviário), IMO (marítimo) e ADNR (vias navegáveis interiores). O tráfego aéreo é gerido pela Associação Internacional de Transportes Aéreos (IATA) e Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO). Para garantir que os veículos motorizados possam ser utilizados internacionalmente, existem diferentes disposições; algumas delas envolvem a Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), como o Regulamento 134 para veículos a hidrogénio (Panel E. H., 2023, p. 40).

Os regulamentos europeus não precisam – ao contrário das diretivas europeias – de serem transcritos para a legislação nacional para se tornarem legalmente vinculativos. Um exemplo disso é o Regulamento da Comissão (UE) No 406/2010 e o Regulamento 134 da UN ECE, ambos relevantes para veículos a hidrogénio (Panel E. H., 2023).

Diretivas associadas a segurança do pessoal e local em redor:

A ATEX 99/92/CE diretiva relativa aos requisitos mínimos para melhorar a segurança e a proteção da saúde dos trabalhadores potencialmente em risco devido a atmosferas explosivas (ATEX). Portanto, qualquer empresa que opere instalações onde o hidrogénio seja processado deve cumprir os requisitos da diretiva, porque os seus trabalhadores estão potencialmente em risco devido aos efeitos das explosões que podem ser produzidas pela ignição de uma ATEX que possa ser formada.

O empregador deve classificar os locais perigosos onde ATEX podem ocorrer em zonas, com base na frequência e na duração da ocorrência de uma ATEX, de acordo com a seguinte definição (Panel E. H., 2023, p. 40):

- Zona 0: um local onde uma ATEX está presente continuamente, por longos períodos ou frequentemente.

- Zona 1: um local onde uma ATEX é provável que ocorra ocasionalmente em operação normal.

- Zona 2: um local onde uma ATEX não é provável que ocorra em operação normal, mas, se ocorrer, persistirá apenas por um curto período.

A diretiva ATEX 2014/34/UE aplica-se a equipamentos e sistemas de proteção destinados a serem utilizados em atmosferas potencialmente explosivas. Aplica-se também a dispositivos de controlo e dispositivos de regulação destinados a serem utilizados fora de atmosferas potencialmente explosivas, mas que são necessários para ou contribuem para o funcionamento seguro de equipamentos e sistemas de proteção no que diz respeito aos riscos de explosão, também estão abrangidos pelo âmbito desta diretiva (Panel E. H., 2023, p. 41).

Ambas as diretivas acima estão inter-relacionadas. Equipamentos de determinadas categorias de acordo com a diretiva 2014/34/UE podem ser utilizados em determinadas zonas definidas de acordo com a diretiva 99/92/CE (Panel E. H., 2023, p. 41).

Diretivas associadas ao transporte de matéria perigosa:

A TPED (Diretiva 1999/36/CE do Conselho relativa a equipamentos sob pressão transportáveis) aplica-se a equipamentos sob pressão transportáveis e é obrigatória desde 1 de julho de 2003 para cilindros de gás.

Desde 2009 os regulamentos da UNECE para o transporte terrestre europeu RID/ADR contêm muitos detalhes que faziam parte da 1999/36/CE. A TPED foi revista e substituída pela Diretiva 2010/35/UE (TPED) em 2010 (Panel E. H., 2023, p. 42).

No caso das aplicações de hidrogénio, é particularmente relevante para o transporte de hidrogénio para as estações de abastecimento. Também se aplica a tanques de pressão de hidrogénio utilizados nos veículos quando esses tanques são removíveis, reabastecidos independentemente do veículo e transportados para depósitos de hidrogénio. O armazenamento de gases a bordo como propulsor em sistemas montados permanentemente não faz parte dos regulamentos de transporte. Isso faz parte da aprovação dos veículos (Panel E. H., 2023, p. 42).

Standards associados ao hidrogénio:

A ISO, o Comité Técnico 197 “Tecnologias de Hidrogénio” tem o papel principal no desenvolvimento de normas nesta área. Coopera de perto com o IEC TC 105 “Células de Combustível”, CEN/CENELEC/JTC6 “Hidrogénio em Sistemas de Energia”, etc.

Quatro comités técnicos (TC) da Organização Internacional de Normalização (ISO) produzem normas relevantes para tecnologias, sistemas e infraestruturas de hidrogénio e células de combustível.

A ISO/TC 220 sobre recipientes criogénicos publicou várias normas relacionadas com grandes recipientes transportáveis isolados a vácuo, compatibilidade de gases/materiais e válvulas para serviços criogénicos, etc. Espera-se que as atividades de normalização do hidrogénio na Europa aumentem devido ao estabelecimento do CEN/CLC/JTC 6 “Hidrogénio em sistemas de energia” (Panel E. H., 2023, p. 46).

A deteção de incêndios em células de combustível e a proteção contra explosões são tópicos tratados pela IEC. Entre as normas mais importantes publicadas estão a IEC EN 60079-10, 14, 17 e 19 (Panel E. H., 2023).

## **Certificação de aeronaves**

Na atualidade não existe nenhuma certificação que possa só ser atribuída a aeronaves de propulsão a hidrogénio ou movida a células de combustível, isto é, normas específicas para aeronaves movidas a hidrogénio. De momento, o único tipo de certificação que é aplicada neste conceito de aeronaves e a certificação standard já existente, a qual é atribuída a aeronaves, definida pelas seguintes autoridades:

- EASA (atribuída na UE);
- CAA (atribuída no Reino Unido);
- FAA (atribuída nos EUA).

Esta certificação, de cada uma das agências referidas, tem a regulamentação associada a cada país, as quais tem de ser cumpridas para poder obter o certificado de aeronavegabilidade, por uma destas autoridades, o qual permite o voo destas aeronaves.

Alguns exemplos de certificação aplicada a aeronaves de propulsão a hidrogénio ou células de combustível) são, como já referidas anteriormente, as certificações CS-23, CS-25 e CS-27 da EASA.

No entanto, existem algumas diretivas e regulamentos, os quais são aplicados a produção, armazenamento e transporte de hidrogénio. Estas podem ser encontradas no Anexo D do documento “Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Use Systems” publicado pela NASA (NASA, 1997).

### **3.3 Estações de abastecimento – autorização e planeamento**

A seguir são apresentadas algumas soluções/respostas para o desenvolvimento de estações de reabastecimento de hidrogénio para transportes terrestres. Estas soluções foram apresentadas pelo Hydrogen Mobility Europe (H2ME, 2015-202) que é a maior iniciativa de demonstração de veículos de passageiros e estações de abastecimento de hidrogénio cofinanciada pela Fuel Cells and Hydrogen Joint Initiative (FCH JU).

No relatório “*HRS Safety and RCS: Lessons Learned H2ME-2 D5.22*”, o quarto numa série de cinco, apresentam-se casos de estudos de alguns de países – Dinamarca, França, Alemanha, Islândia e Reino Unido – sobre as instalações de estações de abastecimento de hidrogénio (HRS) apoiadas pelo H2ME para entender como os regulamentos, códigos e normas são aplicadas em cada país ao processo de autorização e planeamento das estações, documentar as lições aprendidas e registar a experiência prática dos passos tomados para garantir a operação segura contínua das HRS (Speers, 2023, p. 1).

A comparação dos casos de estudo destes países mostra que, embora haja uma certa uniformidade em relação às diretrizes gerais da UE seguidas por cada um, existem diferenças nos processos envolvidos na autorização e instalação de HRS, apesar da contínua evolução das normas de reabastecimento de hidrogénio, como EN 17124, EN 17127, SAE J2601 e ISO/TS 19880-1. A participação de agências descentralizadas/regionais no processo exige um envolvimento repetido para cada projeto individual de construção de HRS, a fim de desenvolver conhecimento com diferentes autoridades (Speers, 2023, p. 2).

Os casos de estudo destes países mostraram que é possível reduzir os tempos de autorização de HRS. No entanto, os instaladores observaram que isto pode não ser o caso para todos os países e para todas as instalações propostas, particularmente para HRS co-localizadas com postos de combustíveis convencionais.

A principal razão para isso é que os locais iniciais descritos no relatório referido em cima têm sido geralmente os mais favoráveis, em termos de questões-chave como a quantidade de espaço disponível para a integração das HRS. Futuras estações, especialmente aquelas

necessárias para formar redes abrangentes em todo o país, inevitavelmente envolverão a construção de HRS em locais menos favoráveis, por exemplo, em locais onde o espaço é limitado ou onde as autoridades locais têm requisitos específicos. Isso significa que o processo de autorização e construção ainda exigirá muito diálogo com as partes interessadas e planeamento específico para cada local de HRS (Speers, 2023, p. 32).

### **3.4 Futuras aeronaves a operar com hidrogénio**

Airbus e os seus parceiros já estão a trabalhar em quatro aeronaves conceptuais movidas a hidrogénio – conhecidas como ZEROe – que foram reveladas ao mundo em 2020 (Figuras 11). Estes designs correspondem a alcances de missão de 1.000 nm ou 2.000 nm e capacidades entre 100 e 200 passageiros, representando assim uma grande parte do mercado, incluindo voos transcontinentais (G. Llewellyn, 2024, p. 126).

Três das aeronaves, Figura 11, conceptuais utilizariam motores de combustão a hidrogénio em combinação com um componente híbrido-elétrico. Este último provém de células de combustível em vez de baterias devido ao benefício geral de desempenho, especialmente dado que já existe hidrogénio a bordo da aeronave. O quarto conceito ZEROe é uma aeronave totalmente alimentada por células de combustível, na qual o sistema de propulsão, bem como todas as necessidades de energia não propulsivas, são alimentados por células de combustível (G. Llewellyn, 2024, p. 126).

Em fevereiro deste ano, a Airbus assinou um acordo de parceria com a CFM International para colaborar numa demonstração de propulsão a hidrogénio ZEROe. Em termos de hardware, isto compreende uma plataforma de testes A380 na qual será montado um motor de teste alimentado pelo hidrogénio fornecido pela CFM. O objetivo do programa é realizar inicialmente testes em terra. Posteriormente, haverá testes em voo a partir de 2026 com um motor turbofan de combustão direta alimentado a hidrogénio. A plataforma de testes voadora A380 da Airbus, apelidada de "FlightLab", será equipada com quatro tanques cilíndricos alojados dentro da fuselagem traseira, que conterão o combustível de hidrogénio líquido (G. Llewellyn, 2024, p. 128).



Figura 10: Introdução ao ZEROe.

Fonte: (G. Llewellyn, 2024, p. 127)

A empresa ZeroAvia, responsável pelo desenvolvimento de motores elétricos alimentados pela energia gerada por células de combustível de hidrogénio para a aviação, já demonstrou a sua tecnologia de sistema de transmissão elétrica a hidrogénio num Piper Malibu de seis lugares, usando um sistema de 250kW, com hidrogénio gasoso como combustível. A empresa também está bem avançada no desenvolvimento de um sistema de 600kW (ZA600), capaz de suportar aeronaves de 10-20 lugares com um alcance inicial de 300 milhas náuticas. A empresa planeia certificar esta tecnologia a tempo de entrar em serviço até 2024 e assinou um acordo inicial com a Hindustan Aeronautics Ltd, permitindo que o fabricante indiano ofereça retrofits para as aeronaves Dornier & Hindustan-228 existentes e permita um ajuste nas novas aeronaves fabricadas com sistemas de transmissão elétrica a hidrogénio. Algumas das configurações planeadas são apresentadas na Figura 11 (G. Llewellyn, 2024, p. 128).

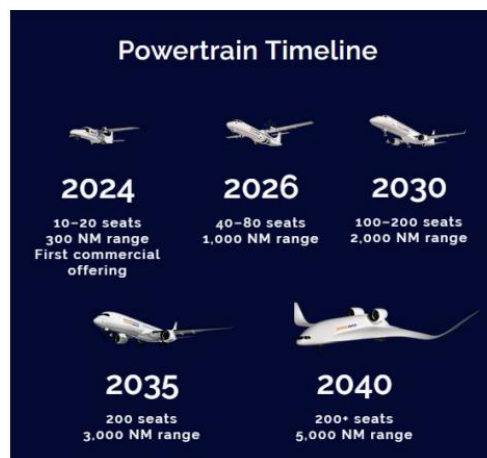


Figura 11: Sistema de transmissão.

Fonte: (G. Llewellyn, 2024, p. 130)

Também irá desenvolver ainda mais o seu produto ZA2000 (um sistema de propulsão modular hidrogénio-elétrico de 2-5 MW para turboélices regionais de até 80 lugares) até ao ponto de certificação nos próximos três anos, apoiando aeronaves turboélice de 40-80 lugares, como o Dash-8 Q400, que irá trabalhar para demonstrar ao longo desse período como parte de uma parceria com a Alaska Airlines. A ZeroAvia está a apontar para a entrada no mercado deste sistema de transmissão para apoiar aeronaves maiores em 2026 (G. Llewellyn, 2024, p. 130).

## Capítulo 4: Conclusão e perspectivas futuras

O hidrogénio apresenta características energéticas muito vantajosas para o seu uso como combustível nos meios de transporte aéreo. Apesar de ser desafiante, a evolução das tecnologias para o uso deste está em rápido crescimento.

O uso de hidrogénio na aeronáutica apresenta uma promessa significativa de melhorar a sustentabilidade e reduzir as emissões de carbono na indústria. Este combustível, quando utilizado em motores elétricos alimentados por células de combustível de hidrogénio ou motores de combustão interna adaptados, oferece uma alternativa limpa aos combustíveis fósseis tradicionais, já que a sua combustão não gera dióxido de carbono.

Atualmente, já existem algumas aeronaves que realizaram voos com hidrogénio como combustível, sendo estas:

- HY4 da H2FLY, a primeira aeronave pilotada, movida por um motor elétrico alimentado pela energia gerada pelas células de combustível de hidrogénio líquido (7 de setembro de 2023);
- Dornier 228, aeronave pilotada adaptada também com um motor elétrico alimentado pela energia gerada pelas células de combustível de hidrogénio líquido (protótipo do motor ZA600) (19 de julho de 2023);
- Arcus-J, planador da Airbus com um motor de combustão de hidrogénio (8 de novembro de 2023).

No entanto, a integração do hidrogénio na aviação enfrenta várias dificuldades. A infraestrutura para produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio ainda está em desenvolvimento e requer investimentos substanciais. Além disso, o hidrogénio precisa de ser armazenado a alta pressão ou em estado líquido a temperaturas extremamente baixas, o que implica desafios técnicos e de segurança. O design das aeronaves também precisa de ser adaptado para acomodar tanques de hidrogénio maiores e mais pesados, o que pode afetar a eficiência aerodinâmica e a capacidade de carga.

Outro desafio é a certificação das novas tecnologias de hidrogénio. Embora existam algumas normas já estabelecidas para aeronaves convencionais, a aplicação dessas normas para tecnologias de hidrogénio é complexa e exige adaptações específicas. Organismos de certificação, como a Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA), estão a trabalhar para desenvolver regulamentos e padrões que assegurem a segurança e a fiabilidade das aeronaves a hidrogénio.

Em resumo, enquanto o hidrogénio tem o potencial de transformar a aviação numa indústria mais sustentável, a sua adoção generalizada depende de avanços significativos na infraestrutura, tecnologia de armazenamento, design de aeronaves e regulamentação. Posto isto,

o plano para a integração total do hidrogénio na aeronáutica, por meios a atingir a descarbonização, está prevista até ao ano de 2050.

# Referências

- A. Gomez, H. S. (2019). *Liquid hydrogen fuel tanks for commercial aviation: Structural sizing and stress analysis*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105438>
- A. Rotar, A. S. (2023). *The State of EU and UK Hydrogen Regulations*. Retrieved Jan2024, from Morgan Lewis: <https://www.morganlewis.com/pubs/2023/06/the-state-of-eu-and-uk-hydrogen-regulations>
- Acutair. (2004). *History of Hydrogen*. (M. W. Governments, Ed.) Retrieved Jan2024, from Metropolitan Washington Council of Governments: <https://www.mwcog.org/file.aspx?&A=zkpvoNhZDWPqP7LLLYTPZMIgxuq1QGhT8%2BMkINPbo%3D>
- AIRBUS. (2024). *ZEROe*. Retrieved Jan2024, from AIRBUS: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>
- Alsulaiman, A. (2024). *Navigating Turbulence: Hydrogen's Role in the Decarbonization of the Aviation Sector*. (T. O. Studies, Ed.) Retrieved Jan2024, from The Oxford Institute for Energy Studies: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/01/ET28-Navigating-Turbulence.pdf>
- Association, F. (2024). *Fuel Cell Basics*. Retrieved Jan2024, from Fuel Cell & Hydrogen Energy Association: <https://www.fchea.org/fuelcells>
- Aviation, H. i. (2024, Março). *Integration of Hydrogen Aircraft into the Ais Transport System: An Airport Operations and Infrastructure Review*. Retrieved Maio2024, from Hydrogen in Aviation: <https://hydrogeninaviation.co.uk/wp-content/uploads/2024/03/Launching-Hydrogen-Powered-Aviation-Report.pdf>
- B. Benjamin, M. J. (2019). Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, pp. 1-19. Retrieved Jan2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042118300356>
- Crouch, T. D. (2024). [https://airandspace.si.edu/collection-objects/inflation-of-first-hydrogen-balloon-by-j-a-c-charles/nasm\\_A20000463000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/inflation-of-first-hydrogen-balloon-by-j-a-c-charles/nasm_A20000463000). Retrieved Abril2024, from National Air and Space Museum: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/inflation-of-first-hydrogen-balloon-by-j-a-c-charles/nasm\\_A20000463000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/inflation-of-first-hydrogen-balloon-by-j-a-c-charles/nasm_A20000463000)
- E., A., & Martins, J. (2023). *Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100922>

- EASA. (2023). *O hidrogénio e o seu potencial na aviação*. (EASA, Editor) Retrieved Dez2023, from EASA: <https://www.easa.europa.eu/pt/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation#group-easa-related-content%20magellan-link>
- Estêvão, T. (2008). *O Hidrogénio como combustível*. Porto: Universidade do Porto. Retrieved Jan2024, from <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>
- Expresso. (2023). *Bruxelas lança oficialmente Banco Europeu de Hidrogénio com €800 milhões em subvenções*. (Expresso, Editor) Retrieved Jan2024, from Expresso: [https://expresso.pt/economia/economia\\_energia/2023-11-23-Bruxelas-lanca-oficialmente-Banco-Europeu-de-Hidrogenio-com-800-milhoes-em-subvencoes-ead2f590](https://expresso.pt/economia/economia_energia/2023-11-23-Bruxelas-lanca-oficialmente-Banco-Europeu-de-Hidrogenio-com-800-milhoes-em-subvencoes-ead2f590)
- G. Llewellyn, V. M. (2024). Hydrogen Power - boldly going to the heart of climate-neutral aviation. *Climate Change Mitigation: Aircraft Technologies*, pp. 126-130. Retrieved from ICAO: [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art32.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art32.pdf)
- Gasogenio. (2023). *Combustível dos aviões: tipos e propriedades*. (Gasogenio, Editor) Retrieved Dez2023, from Gasogenio: <https://gasogenio.com/pt/blog/combustivel-dos-avioes-tipos-e-propiedades/>
- GESEL. (2023). <https://gesel.ie.ufrj.br/ife/ife-h2-141/>. Retrieved Abril2024, from Grupo de Estudos do Setor Elétrico: <https://gesel.ie.ufrj.br/ife/ife-h2-141/>
- GKN. (2023). *GKN AEROSPACE LEADS DEVELOPMENT OF GROUND-BREAKING HYDROGEN PROPULSION SYSTEM FOR AIRCRAFT*. Retrieved Jan2024, from GKN Aerospace: <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-leads-development-of-ground-breaking-hydrogen-propulsion-system-for-aircraft2/>
- H2FLY. (n.d.). <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft/>. Retrieved Maio2024, from H2FLY And Partners Complete World's First Piloted Flight of Liquid Hydrogen Powered Electric Aircraft: <https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft/>
- J. Hoelzen, D. S.-R. (2022). *Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure—review and research gaps*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>

- Masons, P. (2023). *UK hydrogen safety law: the developing framework*. (P. Masons, Editor) Retrieved Jan2024, from Pinsent Masons: <https://www.pinsentmasons.com/out-law/guides/uk-hydrogen-safety-law>
- N. Warwick, P. G. (2022). Atmospheric Implications of Increased Hydrogen Use. *United Kingdom Department for Business, Energy and Industrial Strategy*. Retrieved Jan 2024, from <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/624eca7fe90e0729f4400b99/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf>
- NASA. (1997, Feb). *Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems*. Retrieved Maio 2024, from <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970033338/downloads/19970033338.pdf>
- Panel, E. H. (2023, May). *Safety Planning and Management in Hydrogen and Fuel Cells Project - Guidance Document*. Retrieved Maio2024, from Clean Hydrogen Partnership: [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2023-05/2022\\_Safety\\_Planning\\_Implementation\\_v2\\_1-Final%20%281%29.pdf](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2023-05/2022_Safety_Planning_Implementation_v2_1-Final%20%281%29.pdf)
- Panel, H. S. (2020, Jan). *Safety Planning for Hydrogen and Fuel Cell Projects*. Retrieved Maio2024, from [https://h2tools.org/sites/default/files/Safety\\_Planning\\_for\\_H2\\_and\\_FC\\_Projects-Jan2020.pdf](https://h2tools.org/sites/default/files/Safety_Planning_for_H2_and_FC_Projects-Jan2020.pdf): [https://h2tools.org/sites/default/files/Safety\\_Planning\\_for\\_H2\\_and\\_FC\\_Projects-Jan2020.pdf](https://h2tools.org/sites/default/files/Safety_Planning_for_H2_and_FC_Projects-Jan2020.pdf)
- R. Bray, E. B. (2022). *Aircraft Systems*. (A. T. Institute, Ed.) Retrieved Jan2024, from Aerospace Technology Institute: <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-AIR-REP-0013-Aircraft-Systems.pdf>
- Rolls-Royce. (2024). *High Power, High Scalability, Hybrid Powertrain*. (Rolls-Royce, Editor) Retrieved Jan2024, from Rolls-Royce: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2020/high-power-high-scalability-hybrid-powertrain-h3ps.aspx>
- SenGupta, T. (2023). <https://www.linkedin.com/pulse/future-takes-flight-exploring-potential-planes-tista-sengupta/>. Retrieved Mar2024, from LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/future-takes-flight-exploring-potential-planes-tista-sengupta/>
- Speers, D. P. (2023). *Hydrogen Refuelling Stations Safety, Regulations, Codes and Standards. Lessons Learned. Interim Report 4. H2ME2 Deliverable 5.22*. Leicestershire, Reino Unido: Hydrogen Mobility Europe. Retrieved Jun2024, from <https://h2me.eu/wp->

content/uploads/2023/07/H2ME2-D5.22-Public-FV-Safety-and-RCS-lessons-learnt-%E2%80%A6.pdf: <https://h2me.eu/wp-content/uploads/2023/07/H2ME2-D5.22-Public-FV-Safety-and-RCS-lessons-learnt-%E2%80%A6.pdf>

T. Yusaf, A. M. (2024). *Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086>

Thomson, R. (2020). (<https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-for-aviation.html>). Retrieved Abril2024, from Roland Berger: (<https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-for-aviation.html>)

UBI. (2023). *Investigadora da UBI estuda sistema para produção de hidrogénio a partir de efluente vitivinícola*. (UBI, Editor) Retrieved Dez2023, from UBI: <https://www.ubi.pt/Noticia/7529>

Verne, J. (1874). The Mysterious Island. In J. Verne, *The Mysterious Island*. France: Pierre-Jules Hetzel.

ZeroAvia. (2023). <https://zeroavia.com/complete-flight-test/>. Retrieved Maio2024, from ZeroAvia Successfully Completes Initial Dornier 228 Flight Test Campaign: <https://zeroavia.com/complete-flight-test/>