

**MESTRADO**  
ECONOMIA E GESTÃO DO AMBIENTE

# **Análise da Viabilidade da Implementação de Hidrogénio Verde na Indústria da Aviação**

Ricardo Luís Coelho da Silva

**M**

2025





---

# ANÁLISE DA VIABILIDADE DA IMPLEMENTAÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE NA INDÚSTRIA DA AVIAÇÃO

**Ricardo Luís Coelho da Silva**

---

Dissertação

Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente

---

Orientado por:  
**Sofia Henriques**

Coorientado por:  
**Susana Silva**

---

2025

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão à Professora Doutora Sofia Henriques por ter aceite o desafio de me orientar nesta dissertação e por todo o apoio, orientação e disponibilidade demonstrados ao longo deste processo. Um agradecimento igualmente sentido ao Professor Igor Rezende pelo incentivo constante e pelas palavras motivadoras que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Agradeço também à Professora Susana Silva, que inicialmente me acompanhou neste percurso académico, pelo apoio prestado.

Aos meus pais e à minha irmã, agradeço por estarem sempre presentes, por me apoiarem incondicionalmente e por me ajudarem a crescer, tanto pessoal como academicamente.

Aos amigos Ana Macedo, Cátia, Ana Clara, Beatriz, Francisca e Patrícia, obrigada por tantas vezes me ajudarem nos trabalhos da faculdade, por nunca me deixarem desistir e por acreditarem sempre em mim.

No mestrado, tive a sorte de conhecer pessoas extraordinárias. Enquanto trabalhador-estudante, contei com o apoio de muitos colegas que me passaram apontamentos, partilharam matéria, ajudaram a estudar e esclarecer dúvidas. Alguns tornaram-se amigos para a vida. Um agradecimento especial à Ingrid e à Fabíola.

Agradeço também à Ana Pedroso, ao Emerson e ao Manel por cada palavra de encorajamento nos momentos em que mais precisei.

À minha Yalorixá e aos meus irmãos de santo, o meu muito obrigado pela compreensão, força e apoio constante ao longo deste caminho.

Por fim, e acima de tudo, o meu eterno agradecimento a Ògún – Ògún Yè, Mo Yè.

**“Ògún ni alágbára, olóòótó, tí ó máa n dáàbò bo àwọn ọmọ rẹ.”**

(Ogun é um homem forte e honesto que protege os seus filhos)

(Provérbio Yorubá)

## RESUMO

A presente dissertação analisa conceitos para o processo de descarbonização do setor aéreo através do hidrogénio verde, para tal propõe um estudo de caso para a viabilidade técnico-económica da produção, distribuição e utilização de hidrogénio verde líquido (LH<sub>2</sub>) como combustível alternativo na aviação civil, com hipótese para aplicação à rota Porto–Lisboa. Tendo como pano de fundo o Acordo de Paris e os compromissos europeus para a neutralidade carbónica até 2050, este trabalho avalia o potencial do hidrogénio como solução de longo prazo para descarbonizar o setor aéreo, um dos mais difíceis de eletrificar e ainda fortemente dependente de combustíveis fósseis.

O estudo de caso considera uma central de eletrólise com capacidade de produção de 10.000 kg/dia de hidrogénio líquido, localizada nas imediações do Aeroporto do Porto. A análise inclui os custos associados ao CAPEX, OPEX, eletricidade (de origem renovável), armazenamento, transporte e valorização do oxigénio como subproduto da eletrólise. Com base em simulações económicas, são comparados cenários com e sem valorização do oxigénio, e com diferentes preços de venda do hidrogénio (3, 4 e 5 €/kg). Foram calculados indicadores como LCOH, VAL, TIR e *Payback* para os diferentes cenários.

Conclui-se que, atualmente, o hidrogénio verde ainda não é competitivo face ao Jet A-1 ou aos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), devido ao elevado custo de produção (LCOH superior a 5 €/kg) e à ausência de infraestruturas aeroportuárias adaptadas. A análise ambiental confirma que o LH<sub>2</sub> elimina completamente as emissões diretas de CO<sub>2</sub> durante o voo, posicionando-se como solução estratégica para atingir os objetivos climáticos. No entanto, apenas com políticas públicas robustas, penalizações ao carbono e incentivos à produção renovável será possível aproximar o custo do hidrogénio ao dos combustíveis fósseis.

São ainda analisados os impactos regulatórios (CORSIA, ReFuelEU, *Fit for 55*), projeções de custos até 2050 e oportunidades futuras, incluindo a valorização do oxigénio e a integração agrovoltaica em centrais solares. Por fim, a dissertação apresenta uma análise de sensibilidade e propõe direções para investigação futura, reforçando que a transição energética na aviação exige decisões estratégicas já no presente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogénio Verde, Combustíveis sustentáveis para aviação, Viabilidade técnico-económica, Descarbonização da aviação, Custo Nivelado do Hidrogénio

## ABSTRACT

This dissertation analyzes concepts for the decarbonization process of the aviation sector through green hydrogen. To this end, it proposes a case study on the techno-economic feasibility of producing, distributing, and using liquid green hydrogen (LH<sub>2</sub>) as an alternative fuel in civil aviation, with a potential application to the Porto–Lisbon route. Against the backdrop of the Paris Agreement and the European commitments to carbon neutrality by 2050, this work assesses the potential of hydrogen as a long-term solution to decarbonize aviation, one of the most difficult sectors to electrify and still heavily dependent on fossil fuels.

The case study considers an electrolysis plant with a production capacity of 10,000 kg/day of liquid hydrogen, located in the vicinity of Porto Airport. The analysis includes costs associated with CAPEX, OPEX, electricity (from renewable sources), storage, transport, and the valorization of oxygen as a by-product of electrolysis. Based on economic simulations, scenarios with and without oxygen valorization are compared, as well as different hydrogen selling prices (3, 4, and 5 €/kg). Indicators such as LCOH, NPV, IRR, and Payback were calculated for the different scenarios.

The study concludes that, at present, green hydrogen is not yet competitive compared to Jet A-1 or sustainable aviation fuels (SAF), due to the high production cost (LCOH above 5 €/kg) and the lack of adapted airport infrastructure. The environmental analysis confirms that LH<sub>2</sub> completely eliminates direct CO<sub>2</sub> emissions during flight, positioning it as a strategic solution to meet climate goals. However, only with robust public policies, carbon penalties, and incentives for renewable production will it be possible to bring hydrogen costs closer to those of fossil fuels.

The dissertation also examines regulatory impacts (CORSIA, ReFuelEU, *Fit for 55*), cost projections up to 2050, and future opportunities, including oxygen valorization and agrovoltaiic integration in solar plants. Finally, it presents a sensitivity analysis and proposes directions for future research, reinforcing that the energy transition in aviation requires strategic decisions to be made today

**KEYWORDS:** Green Hydrogen; Sustainable Aviation Fuel (SAF); Levelised Cost of Hydrogen (LCOH); Aviation Decarbonisation; Techno-Economic Feasibility.

# ÍNDICE

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| AGRADECIMENTOS .....                                                                        | I         |
| RESUMO.....                                                                                 | III       |
| ABSTRACT.....                                                                               | IV        |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                                     | VII       |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                                                     | VIII      |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                  | <b>1</b>  |
| <b>2. DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO: POLÍTICAS, COMBUSTÍVEIS E O PAPEL DO HIDROGÉNIO .....</b> | <b>7</b>  |
| 2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> NA AVIAÇÃO.....                       | 7         |
| 2.2. CONTEXTUALIZAÇÃO REGULATÓRIA E METAS DE SUSTENTABILIDADE NA AVIAÇÃO.....               | 11        |
| 2.2.1 Diretrizes de sustentabilidade na aviação .....                                       | 12        |
| <b>3. MECANISMOS DE SUSTENTABILIDADE ATRAVÉS DOS COMBUSTÍVEIS .....</b>                     | <b>19</b> |
| 3.1 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA AERONAVES COMERCIAIS .....                               | 20        |
| 3.1.1 Biocombustíveis .....                                                                 | 20        |
| 3.1.2 Baterias elétricas.....                                                               | 24        |
| 3.1.3 Hidrogénio (H <sub>2</sub> ).....                                                     | 25        |
| 3.2 HIDROGÉNIO VERDE COMO COMBUSTÍVEL NA AVIAÇÃO .....                                      | 27        |
| 3.2.1. Tipos de H <sub>2</sub> como combustível .....                                       | 27        |
| 3.2.1.1 Células combustíveis de H <sub>2</sub> .....                                        | 27        |
| 3.2.1.2 Eletrocombustíveis.....                                                             | 28        |
| 3.2.1.3 Hidrogénio Líquido (LH) .....                                                       | 29        |
| 3.2.2 Tipos de Eletrolisadores.....                                                         | 30        |
| 3.2.2.1 Eletrolisadores Alcalinos .....                                                     | 30        |
| 3.2.2.2 Eletrolisadores AAEM .....                                                          | 31        |
| 3.2.2.3 Eletrolisadores Óxido Sólido.....                                                   | 31        |
| 3.2.2.4 Eletrolisadores PEM.....                                                            | 31        |
| 3.2.3 O armazenamento do H <sub>2</sub> como combustível .....                              | 32        |
| 3.2.3.1 Armazenamento gasoso .....                                                          | 32        |
| 3.2.3.2 Armazenamento líquido .....                                                         | 32        |
| 3.2.3.3 Armazenamento sólido .....                                                          | 32        |
| 3.2.4 Mercado atual e projecções H <sub>2</sub> .....                                       | 32        |
| 3.2.5 Projetos para o uso de H <sub>2</sub> na aviação comercial .....                      | 34        |
| 3.2.5.1 Projectos Internacionais .....                                                      | 35        |
| 3.2.5.2 Projectos em Portugal.....                                                          | 39        |
| <b>4. METODOLOGIA .....</b>                                                                 | <b>41</b> |
| 4.1. ANÁLISE TÉCNICA .....                                                                  | 42        |
| 4.1.1 Compatibilidade tecnológica das aeronaves .....                                       | 42        |
| 4.1.2 Infraestrutura de abastecimento .....                                                 | 46        |
| 4.1.2.1 H <sub>2</sub> ser produzido fora do aeroporto .....                                | 47        |
| 4.1.2.2 H <sub>2</sub> ser produzido nas imediações do aeroporto.....                       | 47        |
| 4.2 ANÁLISE AMBIENTAL.....                                                                  | 49        |
| 4.2.1 Metodologia de Cálculo de Emissão de CO <sub>2</sub> ao usar <i>Jetfuel</i> .....     | 53        |
| 4.2.1.1 Metodologia IPCC (2006) .....                                                       | 53        |
| 4.2.1.2 Metodologia ICAO (2023).....                                                        | 54        |
| 4.2.2 Metodologia de Cálculo de Emissão de CO <sub>2</sub> ao usar SAF.....                 | 55        |
| 4.3 ANÁLISE ECONÓMICA.....                                                                  | 56        |
| 4.3.1 Custos de produção ou adaptação das aeronaves.....                                    | 56        |
| 4.3.2 Custos operacionais do sistema de abastecimento .....                                 | 57        |

|         |                                                                                          |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.3   | Custos de produção do H <sub>2</sub> Verde .....                                         | 59  |
| 4.4     | PARÂMETROS DE ANÁLISE DE INVESTIMENTO .....                                              | 63  |
| 4.4.1   | Valor Atual Líquido (VAL) .....                                                          | 64  |
| 4.4.2   | Taxa Interna de Retorno (TIR) .....                                                      | 64  |
| 4.4.3   | <i>Levelized Cost of Hydrogen</i> (LCOH) .....                                           | 64  |
| 4.4.4   | PR (Período de Retorno ou Payback) .....                                                 | 65  |
| 5.      | ESTUDO DE CASO .....                                                                     | 66  |
| 5.1     | CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....                                                   | 68  |
| 5.2     | ADAPTAÇÕES TÉCNICAS .....                                                                | 69  |
| 5.3     | CENÁRIO AMBIENTAL (ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> NO VOO PORTO–LISBOA) ..... | 70  |
| 5.3.1   | Ao utilizar Combustível Jet A-1 .....                                                    | 71  |
| 5.3.2   | Ao utilizar SAF .....                                                                    | 71  |
| 5.4     | CENÁRIO ECONÓMICO .....                                                                  | 73  |
| 5.4.1   | Central de Hidrogénio .....                                                              | 76  |
| 5.4.2   | Matérias-primas para produção H <sub>2</sub> verde .....                                 | 79  |
| 5.4.2.1 | Energia elétrica a ser consumida .....                                                   | 80  |
| 5.4.2.2 | Água a ser consumida .....                                                               | 84  |
| 5.4.3   | Produção de Oxigénio subproduto .....                                                    | 86  |
| 5.4.4   | Transporte e Armazenamento do LH <sub>2</sub> no Aeroporto .....                         | 89  |
| 5.5     | PREVISÃO DE GANHOS .....                                                                 | 91  |
| 6       | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                             | 93  |
| 6.1     | RESULTADOS AMBIENTAIS PERCURSO PORTO-LISBOA .....                                        | 93  |
| 6.2     | RESULTADOS FINANCEIROS .....                                                             | 94  |
| 6.2.1   | Resultados Financeiros central sem opção oxigénio .....                                  | 94  |
| 6.2.2   | Resultados Financeiros - Central com opção de oxigénio .....                             | 97  |
| 6.2.3   | Viagem Porto- Lisboa – Custos por Combustível .....                                      | 98  |
| 6.3     | RESULTADOS FINAIS .....                                                                  | 100 |
| 6.4     | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....                                                           | 101 |
| 6.5     | PROJETOS FUTUROS .....                                                                   | 102 |
| 7       | CONCLUSÃO .....                                                                          | 104 |
|         | ANEXO I .....                                                                            | I   |
|         | ANEXO II (CENTRAL SEM SUBPRODUTO OXIGÉNIO) .....                                         | II  |
|         | ANEXO III (CENTRAL COM SUBPRODUTO HIDROGÉNIO) .....                                      | V   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Total de emissões de CO <sub>2</sub> mundiais de 2000 a 2023 - Voos domésticos e internacionais.                                          | 9  |
| Figura 2. Dados do relatório nacional de emissões referentes a 2023, distribuição das emissões por setor.                                           | 10 |
| Figura 3. Total de emissões medido em Mt de CO <sub>2</sub> eq, do ano 2019 a 2024, em Portugal no setor de aviação.                                | 11 |
| Figura 4. Aeronave com sistema ZA600.                                                                                                               | 35 |
| Figura 5. Projeto Leça H2 Green Valley.                                                                                                             | 39 |
| Figura 6. Projetos e estudos de aeronaves na aviação.                                                                                               | 44 |
| Figura 7. Produção externa de hidrogénio com transporte de camiões para aeroporto.                                                                  | 47 |
| Figura 8. Hidrogénio produzido e liquefeito no aeroporto ou imediações.                                                                             | 48 |
| Figura 9. Sistema hidrante para hidrogénio.                                                                                                         | 49 |
| Figura 10. Número de passageiros (internacionais e nacionais) em aeroportos portugueses, entre 1993 e 2025.                                         | 50 |
| Figura 11. Consumo de Jetfuel pela aviação em Portugal nos anos de 2019, 2023 e 2024, medido em kilotoneladas (kt).                                 | 51 |
| Figura 12. Evolução do preço do Jetfuel (€ por litro) entre junho de 2019 e novembro de 2024.                                                       | 52 |
| Figura 13. Previsão dos custos de produção em 2050, de hidrogénio azul e verde, em diferentes regiões mundiais.                                     | 62 |
| Figura 14. Custo nivelado do hidrogénio em 2050, derivado da análise de oferta e procura.                                                           | 63 |
| Figura 15. Diagrama do sistema integrado de produção, compressão, armazenamento e distribuição de hidrogénio verde, com coprodução de oxigénio.     | 75 |
| Figura 16. Produção de energia renovável em Portugal (2016 a maio de 2025) do total de energias renováveis e exclusivamente a energia fotovoltaica. | 79 |
| Figura 17. Valores do LCOH, mediante o uso de 100% venda industrial, 100% venda medicinal e 50% venda para cada setor.                              | 97 |
| Figura 18. Informação do preço da eletricidade para a ligação de “Alta Tensão”.                                                                     | i  |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1. Gases emitidos pelos aviões e suas características e/ou consequências.....                                                                                        | 8   |
| Tabela 2. Linha temporal das políticas e diretrizes Internacionais, União Europeia e Portugal que influenciam diretamente o setor da aviação. ....                          | 13  |
| Tabela 3. Características dos <i>Sustainable Aviation Fuels</i> (SAF) e percentagem de redução das emissões de CO <sub>2</sub> face ao combustível convencional.....        | 21  |
| Tabela 4. Preços dos biocombustíveis entre 2020 e 2024 segundo alguns autores. ....                                                                                         | 22  |
| Tabela 5. Tipos de Hidrogénio, como são produzidos, custos e nível de poluição.....                                                                                         | 26  |
| Tabela 6. Evolução do mercado previsto para o hidrogénio (2025 até 2050). ....                                                                                              | 33  |
| Tabela 7. Conceitos teóricos de possibilidade de aeronaves, com características que variam mediante o tamanho, o alcance e o tipo de combustível. ....                      | 37  |
| Tabela 8. Conceitos Seleccionados de Vários Projetos de Viabilidade.....                                                                                                    | 43  |
| Tabela 9. Tamanho do aeroporto com uma central de hidrogénio no próprio aeroporto, projeção para 2035 e 2050.....                                                           | 47  |
| Tabela 10. Custo em dólares (\$10 <sup>6</sup> ) de desenvolvimento e Produção – Aviões de passageiros JetA e LH <sub>2</sub> (5500 milhas náuticas, 400 passageiros) ..... | 57  |
| Tabela 11. Custo estimado agregados (M€) de 2030 a 2050, uso de bowers para abastecer os aviões. ....                                                                       | 58  |
| Tabela 12. Custo estimado agregados (M€) de 2030 a 2050, assumindo o uso de sistema hidrante para abastecimento. ....                                                       | 58  |
| Tabela 13. Comparação dos custos médios de produção de hidrogénio na Europa entre 2022 e 2023, por tipo de processo e variação percentual aproximada; .....                 | 60  |
| Tabela 14. Características da aeronave Embraer 195 - TAP.....                                                                                                               | 69  |
| Tabela 15. Cálculo das emissões de CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                    | 71  |
| Tabela 16. Valores de Emissões de Ciclo de Vida para HEFA-SPK, diferentes países e CORSIA.....                                                                              | 72  |
| Tabela 17. Parâmetros Técnicos e Ambientais para Cálculo das Emissões no Voo Porto–Lisboa com Mistura SAF HEFA-SPK.....                                                     | 72  |
| Tabela 18. Resultados das diferentes percentagens de HEFA em Jetfuel e a redução das emissões em %.....                                                                     | 73  |
| Tabela 19. Dados padrão mediante estudos da Flyzero para o aeroporto Francisco Sá Carneiro.....                                                                             | 74  |
| Tabela 20. Parâmetros de Investimento financeiro .....                                                                                                                      | 76  |
| Tabela 21. Parâmetros técnico-económicos dos principais equipamentos da central de hidrogénio.....                                                                          | 77  |
| Tabela 22. Tipos de Ligação à Rede Elétrica e Suas Aplicações. ....                                                                                                         | 84  |
| Tabela 23. Parâmetros técnicos e económicos para valorização do oxigénio subproduto da eletrólise .....                                                                     | 88  |
| Tabela 24. Comparação entre modos de transporte rodoviário de hidrogénio.....                                                                                               | 89  |
| Tabela 25. Armazenamento de H <sub>2</sub> líquido no Aeroporto (Tanques criogénicos).....                                                                                  | 91  |
| Tabela 26. Impacto do Preço de Venda do Hidrogénio nos Indicadores de Viabilidade Económica.....                                                                            | 96  |
| Tabela 27. Comparação dos custos e emissões por voo na rota Porto–Lisboa para diferentes combustíveis (Jet A-1, HEFA-SPK e Hidrogénio Verde).....                           | 100 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

### Siglas Institucionais e Organizacionais

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| ANA – Portugal | Aeroportos e Navegação Aérea de Portugal              |
| ANAC           | Autoridade Nacional da Aviação Civil                  |
| ANI            | Agência Nacional de Inovação                          |
| APA            | Agência Portuguesa do Ambiente                        |
| ASA            | Aliança para a Sustentabilidade na Aviação            |
| ASTM           | American Society for Testing and Materials            |
| CELE           | Comércio Europeu de Licenças de Emissão               |
| DGEG           | Direção Geral de Energia e Geologia                   |
| EASA           | Agência da União Europeia para a Segurança da Aviação |
| ERSE           | Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos          |
| EUA            | Estados Unidos da América                             |
| IATA           | International Air Transport Association               |
| ICAO           | International Civil Aviation Organization             |
| INAC           | Instituto Nacional da Aviação Civil                   |
| INE            | Instituto Nacional de Estatística                     |
| IPCC           | Intergovernmental Panel on Climate Change             |
| REN            | Redes Energéticas Nacionais                           |
| TAP            | Transportes Aéreos Portugueses                        |
| EU             | União Europeia                                        |

### Unidades, Múltiplos e Conversões

| Abreviatura | Significado/Unidade | Conversão ou observação                  |
|-------------|---------------------|------------------------------------------|
| kWh         | Quilowatt hora      | 1000 Wh                                  |
| MWh         | Megawatt hora       | 1000 kWh                                 |
| GWh         | Gigawatt hora       | 1000 MWh                                 |
| MW          | Megawatt            | 1000 kW                                  |
| MWp         | Megawatt-pico       | Potência máxima instalada                |
| kWe         | Quilowatt elétrico  | Potência elétrica                        |
| Kv          | Quilovolt           | 1000 V                                   |
| Kva         | Quilovolt-ampères   | Potência aparente                        |
| MJ          | Megajoule           | Energia (1 MJ aproximadamente 0,278 kWh) |
| T           | Tonelada            | 1.000 kg                                 |
| Bar         | Pressão             | 1 bar aproximadamente 100 kPa            |
| °C          | Graus Celsius       | Temperatura                              |
| μS/cm       | Microsiemens por cm | Condutividade elétrica                   |
| Km          | Quilómetro          | Distância                                |
| NM          | Milha náutica       | 1 NM aproximadamente 1,852 km            |
| EJ          | Exajoule            | 10 <sup>18</sup> J                       |

### Siglas Técnicas, Químicas e Processos

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| AAEM | Alkaline Anion Exchange Membrane |
| AFC  | Alkaline Fuel Cell               |

|                                        |                                                                   |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| AIoT                                   | Artificial Intelligence of Things                                 |
| ATJ                                    | Alcohol to Jet                                                    |
| ATJ-SPK                                | Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene                      |
| BoP                                    | Balance of Plant                                                  |
| CAPEX                                  | Capital Expenditures                                              |
| CHJ                                    | Catalytic Hydrothermolysis Jet                                    |
| CH-SK                                  | Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene                   |
| CO <sub>2</sub>                        | Dióxido de Carbono                                                |
| CO <sub>2</sub> eq / CO <sub>2</sub> e | Dióxido de carbono equivalente                                    |
| CORSIA                                 | Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation |
| CRF                                    | Capital Recovery Factor                                           |
| e-SAF                                  | Electro-Sustainable Aviation Fuels                                |
| FOG                                    | Fats, Oils and Greases                                            |
| FT                                     | Fischer-Tropsch                                                   |
| FT-SPK                                 | Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene                     |
| FT-SPK/A                               | Fischer-Tropsch SPK with Aromatics                                |
| GEE                                    | Gases com Efeito de Estufa                                        |
| GH                                     | Gás de Hidrogénio                                                 |
| GNL                                    | Gás Natural Liquefeito                                            |
| GOLIAT                                 | Ground Operations of Liquid Hydrogen Aircraft                     |
| H <sub>2</sub>                         | Hidrogénio                                                        |
| H <sub>2</sub> O                       | Água                                                              |
| HC-HEFA-SPK                            | Hydrocarbon Hydroprocessed Esters and Fatty Acids SPK             |
| HEFA                                   | Hydroprocessed Esters and Fatty Acids                             |
| HEFA-SPK                               | HEFA Synthetic Paraffinic Kerosene                                |
| HFS-SIP                                | Hydroprocessed Fermented Sugars to Isoparaffins                   |
| HTL                                    | Hydrothermal Liquefaction                                         |
| INT                                    | Internacional                                                     |
| LCOH                                   | Levelized Cost of Hydrogen                                        |
| LH <sub>2</sub>                        | Hidrogénio líquido                                                |
| MCFC                                   | Molten Carbonate Fuel Cell                                        |
| Nox                                    | Óxidos de Azoto                                                   |
| O <sub>2</sub>                         | Oxigénio                                                          |
| OPEX                                   | Operational Expenditures                                          |
| PAFC                                   | Phosphoric Acid Fuel Cell                                         |
| PEM                                    | Polymer Electrolyte Membrane                                      |
| PEMFC                                  | Proton Exchange Membrane Fuel Cells                               |
| PIB                                    | Produto Interno Bruto                                             |
| PNEC                                   | Plano Nacional de Energia e Clima                                 |
| PPAs                                   | Power Purchase Agreements                                         |
| PR                                     | Período de Recuperação                                            |
| PRR                                    | Plano de Recuperação e Resiliência                                |
| PtL                                    | Power-to-Liquid                                                   |
| RCLE-EU                                | Regime de Comércio de Licenças de Emissão                         |
| RED                                    | Renewable Energy Directive                                        |
| RONDA                                  | Roteiro Nacional para a Descarbonização da Aviação                |
| SAF                                    | Sustainable Aviation Fuels                                        |
| SOEC                                   | Solid Oxide Electrolyzer Cell                                     |

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| SOFC | Solid Oxide Fuel Cell            |
| SPK  | Synthetic Paraffinic Kerosene    |
| TIR  | Taxa Interna de Rentabilidade    |
| TTW  | Tank-to-Wake                     |
| USD  | United States Dollar             |
| VAL  | Valor Atual Líquido              |
| WACC | Weighted Average Cost of Capital |
| WTT  | Well-to-Tank                     |
| WTW  | Well-to-Wake                     |

## 1. Introdução

Da Revolução Industrial até a atualidade, o uso de combustíveis fósseis tem aumentado exponencialmente contribuindo assim para o aumento dos Gases de Efeito de Estufa (GEE) na atmosfera e, por consequência, o aumento da temperatura média global e outros problemas associados, tais como perdas económicas, perdas de biodiversidade, problemas de saúde, entre outros.

Na Conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, foi aprovado o Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), que estabelece metas e ações para reduzir as emissões de GEE e limitar o aumento da temperatura média global a menos 2°C, em relação aos níveis pré-industriais, bem como continuar os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. Os países signatários têm de desenvolver ações para reduzir as emissões e fornecer apoio tecnológico aos países em desenvolvimento (Sharmina *et al.*, 2020).

No ano 2019, a emissão de GEE na União Europeia (UE) no setor dos transportes representou 28,5% das emissões totais, correspondendo 13,4% ao setor da aviação (EEA, 2022). Em Portugal, as emissões de GEE ascenderam a 69 Mt, representando 1,8% das emissões totais de GEE da UE (Parlamento Europeu, 2021). O setor dos transportes representou 26% do total de emissões de GEE do país (Parlamento Europeu, 2021).

Em 2024, o setor da aviação ainda estava em fase de recuperação da crise motivada pela pandemia do COVID-19, no entanto, continua a ser um setor em crescimento, apesar de atualmente com valores de mercado mais baixos comparativamente aos valores pré-pandemia (Sharmina *et al.*, 2020; Stalnaker *et al.*, 2023; Su *et al.*, 2023; Sustainable Aviation, 2023). Novas tecnologias, novas estratégias, projetos regulatórios e novas metas estão a ser estudadas para que este setor se torne mais sustentável e alcance os objetivos de descarbonização até 2050 (Ansell, 2023).

A utilização de querosene aéreo, combustível fóssil usado atualmente na aviação, é o principal responsável pelas emissões de GEE no setor aéreo (UK Sustainable Aviation, 2023). Perante este cenário, alguns estudos propõem a utilização de combustíveis com baixa emissão de carbono (Cui & Chen, 2024; Sharmina *et al.*, 2020) e/ou a utilização de baterias elétricas (Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

Dentro dos combustíveis sustentáveis, o hidrogénio (H<sub>2</sub>) ganha destaque tendo em conta diferentes fatores (Su-ungkavatin *et al.*, 2023). O hidrogénio é um dos elementos mais abundantes na atmosfera, tem uma alta densidade energética e versatilidade, pois pode ser convertido em eletricidade e combustíveis sintéticos (Abdin *et al.*, 2020).

O hidrogénio verde é produzido através da eletrólise da água, usando energias renováveis sem emissão de CO<sub>2</sub>. Por essa razão, este poderá ser uma alternativa de combustível que melhor se adequa às necessidades mundiais no combate às alterações climáticas. Para alcançar os objetivos da redução do impacto ecológico e ambiental do setor da aviação, o estudo da viabilidade técnica e económica da aplicação do hidrogénio verde como combustível é necessário.

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnico-económica da utilização de hidrogénio verde na aviação desde o momento presente até 2050, considerando os custos de produção, transporte e utilização deste como combustível, em comparação com o uso de outros combustíveis, como a querosene e os biocombustíveis. Com este estudo tentar-se-á perceber quais os avanços tecnológicos que melhor se adequam a este setor. Serão analisadas propostas já existentes e, conseqüentemente, será proposta uma estratégia de transição tecnológica e energética, com a análise da sensibilidade dos requisitos, para verificar a viabilidade de execução de um projeto desta natureza aplicado na realidade portuguesa (estudo de caso).

A viabilidade do hidrogénio tem sido amplamente estudada a nível internacional no setor de transportes ferroviários (Ahsan *et al.*, 2023), rodoviários (Maniatopoulos *et al.*, 2015), marítimos (Fu *et al.*, 2023).

A utilização de hidrogénio na aviação tem sido também objeto de diversos estudos que exploram o seu potencial como combustível sustentável. Riedel *et al.* (2023) apresentou uma análise dos potenciais desafios / requisitos de infraestrutura para a operação de aeronaves movidas a hidrogénio em aeroportos ao redor do mundo. O relatório considerou dados de diferentes países como o Egito, Emirados Árabes Unidos, Hong Kong, Inglaterra, México, Estados Unidos e Austrália, concluindo que embora existam desafios técnicos e financeiros, existe a possibilidade de colocar a aviação num setor sustentável com planeamento adequado e implementação de novas infraestruturas para que a descarbonização global até 2050 seja possível.

Também é relevante destacar o estudo europeu sobre o potencial do hidrogénio na aviação, projetos europeus como o GOLIAT (European Commission, 2024) (projetos para infraestruturas aeroportuárias a hidrogénio), Flyzero (Town *et al.*, 2022) (alteração da estrutura do avião para usar H<sub>2</sub> como combustível). A investigação voltada para o contexto europeu enfatiza a necessidade de inovação contínua e a integração de novas tecnologias para alcançar a aviação neutra em carbono até 2050, o que fomenta a realização de estudos desta

temática no contexto português.

Em Portugal existem também alguns estudos sobre o fabrico de hidrogénio. Moreira (2023), no estudo sobre a adesão ao hidrogénio na mobilidade em Portugal, demonstra que as células de hidrogénio são uma alternativa atrativa em substituição aos combustíveis fósseis. Contudo na altura do estudo, observava-se a quase inexistência do mercado a veículos de células de combustível em Portugal. Refere ainda que as maiores dificuldades na implementação de veículos rodoviários a células de combustível hidrogénio são: o preço dos veículos, o preço do hidrogénio verde, o conhecimento tecnológico, o uso atual de carros elétricos e o número de postos de abastecimento (que, sendo reduzido, inibe a compra de veículos). No entanto existem projeções positivas para a sua utilização futura, devido ao investimento na implementação de H<sub>2</sub> no país.

Pessanha (2022) estuda a utilização de hidrogénio na marinha portuguesa, ao basear-se em projetos europeus e referir-se a projetos portugueses a serem desenvolvidos com tecnologia de células de combustível e gás de hidrogénio comprimido. De acordo com o autor, o valor da tecnologia é alto e que é aconselhado aguardar até a tecnologia estar madura ou optar, a curto prazo, por tecnologias já maduras e mais baratas. Frisa também que Portugal tem condições, a longo prazo, de desenvolver esta energia, salientando, contudo, que o hidrogénio não terá futuro pois surgirá uma fonte de energia melhor.

Monteiro (2021), no estudo “Tecnologias de Produção de Hidrogénio Verde - Estudo Energético e Viabilidade Económica”, faz uma análise comparativa de duas tecnologias de produção de hidrogénio. Verifica que é mais eficiente a utilização de eletrolisador PEM, de acordo com o rácio produtividade/dimensão, apesar de o eletrolisador alcalino ser uma tecnologia madura, logo, mais barata.

Vaz (2018), no estudo acerca da utilização de hidrogénio no transporte ferroviário, levando em consideração que, em 2018, Portugal tinha 36% da rede ferroviária não eletrificada, fez uma comparação entre três opções para as linhas: diesel, catenário e hidrogénio. Após análise, verificou que não havia regulamentação para o uso de transporte a hidrogénio em Portugal, uma vez que a tecnologia é pouco desenvolvida e o custo da tecnologia e do hidrogénio era o maior entrave.

Silva *et al.*, (2014) discutem o impacto do hidrogénio no setor de transporte rodoviário em Portugal entre 2010 e 2050, apresentando uma perspetiva de longo prazo que pode ser útil para futuras políticas de mobilidade e descarbonização. Através das experiências de simulação do estudo, os autores preveem que no máximo 22% dos veículos rodoviários serão

a hidrogénio em 2050 e que têm um potencial para se tornarem viáveis economicamente.

Relativamente à aviação, apesar de existirem alguns projetos embrionários a decorrer em Portugal, como o “*Leça H<sub>2</sub> Green Valley*” que produzirá combustíveis sintéticos para o aeroporto Francisco Sá Carneiro, não existem estudos publicados sobre a viabilidade da utilização de hidrogénio verde na aviação em Portugal.

Este estudo contribui para colmatar a ausência de informação sobre este tema nas referências atuais. Tendo como contexto o mercado de hidrogénio português e as políticas nacionais e europeias associadas à aviação que mais influenciam a utilização de hidrogénio verde e a sustentabilidade do sector em Portugal, vai-se considerar um estudo de caso da viabilidade de uma frota de aviões a hidrogénio num trajeto nacional, Porto-Lisboa. A viabilidade técnica e económica da utilização de hidrogénio verde é comparada com outros combustíveis alternativos, como o jetfuel e os biocombustíveis. Esta análise é efetuada para o momento presente, 2025, e será feita uma análise com as previsões de valores existentes até 2050, que é uma das metas de descarbonização nacional e europeia.

A dissertação é dividida na primeira parte com a apresentação da contextualização do trabalho e das referências na literatura através dos três primeiros capítulos. E posteriormente, numa segunda parte será apresentado o estudo de caso proposto nos demais quatro capítulos. Por fim, uma parte final com as conclusões. Assim, totalizando os sete capítulos a serem descritos a seguir:

O Capítulo 1 corresponde à introdução do trabalho, onde se apresenta o enquadramento geral do tema, os objetivos da dissertação, a sua relevância no contexto atual da descarbonização do setor da aviação e a estrutura do documento. Na sequência, no Capítulo 2, procede-se à contextualização do setor de aviação. São identificados os principais gases com efeito de estufa (GEE) emitidos pelas aeronaves durante a combustão, com análise da evolução das emissões no setor da aviação em Portugal e na Europa nos últimos anos. Apresentam-se também as principais políticas europeias e nacionais com impacto neste setor, com destaque para o Sistema Europeu de Comércio de Licenças de Emissão (EU ETS), o regime CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) e a introdução de taxas sobre as emissões.

Já no Capítulo 3 são discutidas as possibilidades de descarbonização do setor da aviação através da utilização de diferentes tipos de combustíveis alternativos. São apresentadas diversas soluções tecnológicas, como os biocombustíveis sustentáveis para aviação (SAF), os eletrocombustíveis, os sistemas elétricos a bateria e, com especial ênfase, o hidrogénio.

Detalham-se os diferentes tipos de hidrogénio, com destaque para o hidrogénio verde, bem como os processos de eletrólise e os principais tipos de eletrolisadores. São igualmente abordadas as etapas de armazenamento, transporte e utilização do hidrogénio nas aeronaves, incluindo o recurso ao hidrogénio líquido e às células de combustível. O capítulo contempla ainda uma análise do mercado atual e das projeções futuras de custos do hidrogénio verde. Por fim, apresenta uma síntese dos principais projetos em curso, tanto a nível nacional como internacional.

A partir do Capítulo 4 inicia-se a apresentação do estudo de caso, com a descrição da metodologia adotada. São analisados a compatibilidade tecnológica do hidrogénio com as infraestruturas aeroportuárias existentes e o local ideal para a instalação da central de produção. Inclui-se igualmente uma avaliação ambiental, baseada em metodologias de cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à utilização de Jet A-1 e de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). Com base na literatura, procede-se à análise dos custos de produção e adaptação das aeronaves, dos custos operacionais do sistema de abastecimento e dos custos de produção de hidrogénio verde. Na vertente económico-financeira, detalham-se os indicadores utilizados na avaliação da viabilidade do projeto: o “*Levelized Cost of Hydrogen*” (LCOH), o Valor Atual Líquido (VAL), o Período de Recuperação (PR), a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR), bem como os conceitos de CAPEX (*Capital Expenditure*) e OPEX (*Operational Expenditure*). São igualmente apresentadas todas as fórmulas e pressupostos considerados na elaboração do estudo.

O Capítulo 5 corresponde ao desenvolvimento do estudo de caso, incluindo a caracterização do percurso e as adaptações técnicas necessárias na aeronave. Este capítulo estrutura-se em duas partes principais: a análise ambiental e a análise económico-financeira. Na componente ambiental, avaliam-se em detalhe as emissões associadas a um voo entre Porto e Lisboa, considerando diferentes tipos de combustíveis. Na componente económica, descrevem-se todas as etapas do ciclo do hidrogénio como produção, liquefação, armazenamento, transporte e entrega no aeroporto, bem como os respetivos custos e as potenciais receitas associadas à produção e utilização de hidrogénio verde como combustível.

No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, incluindo a comparação entre o custo nivelado do hidrogénio em duas configurações distintas da central (com e sem valorização do oxigénio como subproduto). Este capítulo contempla ainda a análise de sensibilidade e propõe potenciais desenvolvimentos futuros a partir deste trabalho.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões da dissertação, sintetizando os principais

achados e oferecendo recomendações para o futuro da descarbonização da aviação através do hidrogénio verde.

## 2. Descarbonização da Aviação: Políticas, Combustíveis e o Papel do Hidrogénio

Esta secção contextualiza o setor da aviação em Portugal. Inicia-se com uma análise da evolução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) no país, que têm registado um aumento significativo, sobretudo após a retoma da atividade económica no período pós-pandemia. Seguidamente, são apresentadas as principais políticas e instrumentos regulatórios que enquadram a descarbonização dos diferentes setores, com destaque para o Regime de Comércio de Licenças de Emissão da União Europeia (RCLE-UE), o *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA), a Diretiva das Energias Renováveis III (RED III), o pacote legislativo Fit for 55, o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e a Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2), os quais definem as diretrizes para a transição energética no setor da aviação.

### 2.1. Contextualização das emissões de CO<sub>2</sub> na aviação

Diversos estudos indicam que as emissões provenientes das aeronaves constituem uma das principais fontes de poluição atmosférica nos aeroportos e nas suas zonas envolventes, com impactos negativos significativos sobre o ecossistema e a saúde humana (Çil & Tarhan, 2024). De acordo com Ekici e Sevinc (2022), ao considerar a redução destas emissões no espaço aéreo, é essencial compreender os efeitos que tal transição poderá ter nos aeroportos, atualmente estruturados para o uso de combustíveis fósseis. Os autores salientam que diversos países, com diferentes volumes de tráfego aéreo, poderão não aderir de forma célere aos combustíveis renováveis, devido às exigências de reestruturação das infraestruturas e à escassez de investimento. Para além dos estudos habituais sobre o setor da aviação, esta transição implicaria também a realização de novas avaliações de impacto ambiental, a revisão de documentação técnica e administrativa, bem como a adequação de projetos a nível municipal e governamental, entre outros processos burocráticos (Ekici & Sevinc, 2022).

Os gases mais emitidos, pelo cano de escape do avião, são o dióxido de carbono, óxidos de nitrogénio, vapor de água e outros, que podem ser analisados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Gases emitidos pelos aviões e suas características e/ou consequências.

| GASES                                        | CARACTERÍSTICAS/ CONSEQUÊNCIAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principal GEE emitido;</li> <li>- Os seus efeitos perduram na atmosfera durante muito tempo devido a vida longa;</li> <li>- Responsável pelo aquecimento global;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Óxidos De Nitrogénio (NO<sub>x</sub>)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produz Ozono (GEE);</li> <li>- Reduz vida útil do metano (GEE);</li> <li>- Os efeitos da produção de Ozono, sobrepõem-se à diminuição de metano, fazendo com que o aquecimento pelo Ozono seja maior que os efeitos de diminuição da temperatura por parte do metano.</li> <li>- Impactam o aquecimento do planeta indiretamente, pois afetam o comportamento de outros gases de efeito de estufa;</li> </ul> |
| <b>Vapor de Água</b>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Um dos responsáveis pela formação de contrails ou rastros químicos</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Outros (enxofre, sulfatos e fuligem)</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuligem é obtida pela combustão parcial de compostos orgânicos, principalmente a partir do metano ou do acetileno. São partículas responsáveis pelo aquecimento climático e criação de contrails;</li> <li>- Aerossóis de enxofre e sulfato têm efeito de resfriamento</li> <li>- Aerossóis de enxofre e sulfato ajudam na formação de contrails</li> </ul>                                                   |

**Fonte:** elaborado pelo autor e adaptado de Timperley, 2022

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o principal gás com efeito de estufa associado ao aquecimento global, enquanto outros poluentes, como os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), têm efeitos indiretos, contribuindo para a formação de ozono e redução da vida útil do metano. Substâncias como fuligem, aerossóis de enxofre e vapor de água contribuem para a formação dos “*contrails*”, ou rastros químicos, que são as nuvens de gelo em forma de linhas brancas, que se formam atrás das aeronaves, cuja ocorrência depende também de fatores ambientais e operacionais, como temperatura, humidade, eficiência dos motores e composição do combustível (IATA, 2024a; Timperley, 2022).

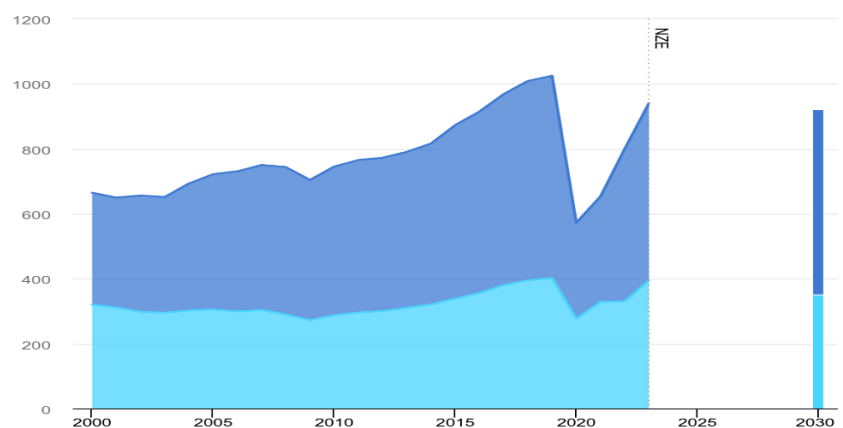
Segundo Clarke *et al.* (2022), quando se utiliza querosene fóssil numa aeronave, cerca de 70% das emissões resultam em CO<sub>2</sub>, aproximadamente 30% em vapor de água e uma pequena fração em outros GEE.

Mesmo com a crise aérea devido à pandemia do COVID-19, o setor da aviação é um setor em crescimento. Atualmente, o setor recuperou e as projeções apontam que os voos aumentarão nas próximas décadas (Su-ungkavatin *et al.*, 2023). Comparativamente a outros meios de transporte, o transporte aéreo tem um aumento mais acentuado nas últimas duas décadas, devido aos voos comerciais internacionais (Clarke *et al.*, 2022; Kim & Teter, 2023) que representam cerca de 88% das emissões de CO<sub>2</sub> no setor aéreo (Su-ungkavatin *et al.*, 2023; Thonemann *et al.*, 2024).

Em 2023, a aviação contribuiu com 2,5% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, atingindo 90%

dos níveis de emissões pré-pandemia, o que corresponde a cerca de 950 milhões de toneladas (EASA, 2024; IEA, 2025), como apresenta a Figura 1.

**Figura 1.** Total de emissões de CO<sub>2</sub> (Mt) mundiais de 2000 a 2023 - Voos domésticos e internacionais.



Fonte: IEA, 2025

Entre 1990 e 2019, as emissões da aviação cresceram, em média, 2,3% ao ano, atingindo mais de 1.000 Mt de CO<sub>2</sub> em 2019. Este valor caiu para menos de 600 Mt em 2020 devido à pandemia da COVID-19 (Kim & Teter, 2023). No entanto, em 2022 e 2023, as emissões voltaram a aumentar, impulsionadas pela retoma do tráfego aéreo e pelo alargamento de rotas devido aos conflitos na Ucrânia e em Gaza, aproximando-se dos níveis pré-pandemia. Estima-se que, até 2025, as emissões de CO<sub>2</sub> ultrapassem as de 2019 (IEA 2025).

Em 2021, foi referido no International Transport Forum (ITF, 2021) que, caso não haja um aceleramento no desenvolvimento tecnológico e medidas políticas mais ambiciosas, entre 2015 e 2050, é possível que as emissões de CO<sub>2</sub> na aviação sejam multiplicadas por 2,5, sendo estas impulsionadas pelo transporte aéreo internacional.

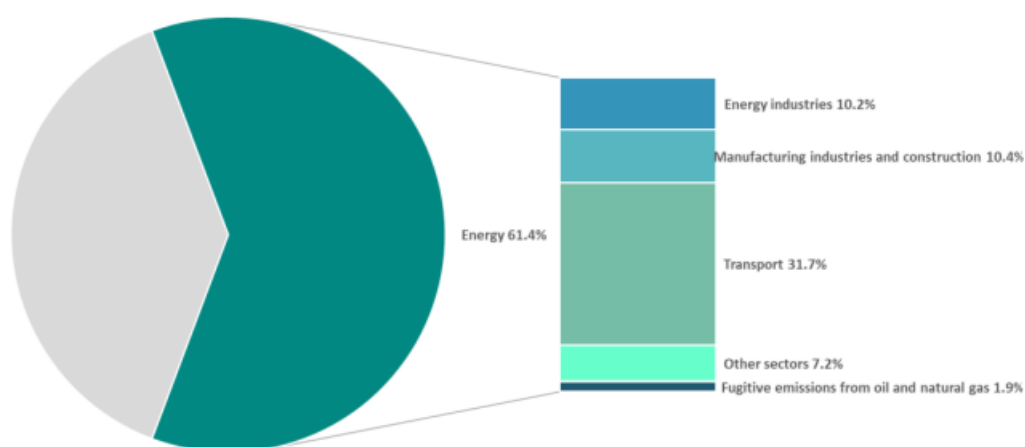
As emissões totais de GEE em Portugal, em 2005, era de 85,9 Mt de CO<sub>2</sub>eq (APA, 2024b), já em 2022 foi 55,98 Mt de CO<sub>2</sub>eq e em 2023 57,2 Mt de CO<sub>2</sub>eq, demonstrando um ligeiro aumento ao valor do ano anterior e mais baixo comparando ao ano de 2005 (INE, 2025).

No total, o setor da energia em 2023 emitiu cerca de 35,27 Mt de GEE representando cerca de 61,4% (APA, 2025) das emissões totais de GEE em Portugal que, comparativamente ao ano anterior, foi de 67,2% havendo assim uma redução significativa (APA, 2024a). O setor da energia engloba o setor dos transportes, que em 2023 ocupou um total de 31,7% e dentro

do setor da energia ocupou cerca de 51,6%, Figura 2.

Houve uma diminuição no setor dos transportes nas emissões de GEE em relação a 2005 de 8.3 % a menos, contudo o valor tem aumentado nos últimos anos chegando perto do valor de 2005 (APA, 2025; APA, 2024a). No setor da aviação, de uma forma divergente aos restantes meios de transporte, em comparação com o ano de 2005, houve um aumento das emissões de GEE (APA, 2025).

**Figura 2.** Dados do relatório nacional de emissões referentes a 2023, distribuição das emissões por setor.

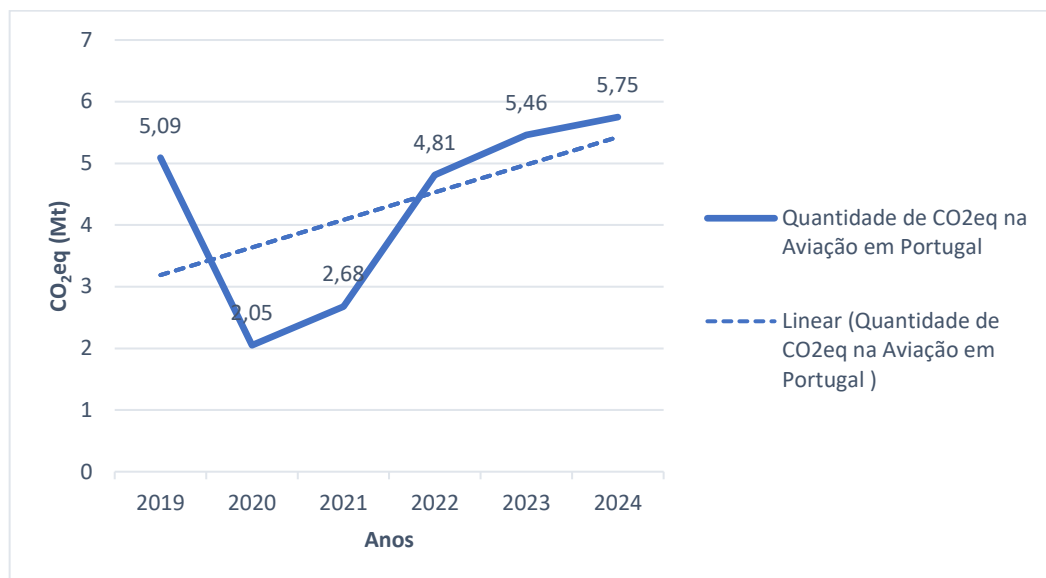


Fonte: APA, 2025.

Em 2023, as emissões da aviação civil em Portugal perfizeram um total de 5,4 MtCO<sub>2</sub>eq. Desse total, 0,5 MtCO<sub>2</sub>eq são atribuídos a voos domésticos e 4,8 MtCO<sub>2</sub>eq a voos internacionais (APA, 2025).

Mediante os dados apresentados na Figura 3, com dados referentes às emissões de GEE em Portugal de 2019 a 2024 na área da aviação (LCG, 2023), verifica-se que em 2020 houve uma diminuição abrupta das emissões, em conformidade com o que acontecera mundialmente, devido à pandemia do COVID-19. Após 2020, tem vindo a aumentar as emissões de GEE e em 2023 ultrapassou o ano pré-COVID com um valor de emissão de 5,46 MtCO<sub>2</sub>eq, comparativamente ao ano de 2019, que foi 5,09 MtCO<sub>2</sub>eq. Já no ano de 2024 foi o ano com maior emissão GEE, 5,75 MtCO<sub>2</sub>eq.

**Figura 3.** Total de emissões medido em Mt de CO<sub>2</sub>eq, do ano 2019 a 2024, em Portugal no setor de aviação.



**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de LCG, 2025.

Tanto a LCG (2025) como a APA (2025) apontam para um aumento das emissões de GEE provenientes do setor da aviação em Portugal. No contexto nacional, a TAP destaca-se como uma das principais companhias aéreas a operar nos aeroportos portugueses (ANA, 2024). No seu relatório de sustentabilidade (TAP, 2024b), a empresa confirma um aumento do consumo de jet fuel, o que contribuiu diretamente para a elevação das emissões de GEE.

Apesar da TAP em 2023 ter implementado um programa de modernização da sua frota, com a introdução de aeronaves tecnologicamente mais avançadas e eficientes, os efeitos positivos desta renovação ainda não se refletiram numa redução global das emissões. As medidas incluíram o aumento do número de lugares por voo, a redução do peso estrutural das aeronaves e a substituição de motores por modelos de combustão mais eficiente, com capacidade de reduzir o consumo de combustível em até 20% e, consequentemente, as emissões de CO<sub>2</sub> (TAP, 2023). No entanto, os relatórios mais recentes indicam que, apesar destas melhorias tecnológicas, o volume total de emissões aumentou, impulsionado pela recuperação da atividade aérea e pela intensificação do tráfego internacional.

## **2.2. Contextualização regulatória e metas de sustentabilidade na aviação**

O setor da aviação é altamente regulamentado a nível internacional, europeu e nacional. Em Portugal, este enquadramento reflete-se num conjunto de normas orientadas para a

mitigação das emissões de GEE, especialmente após o Acordo de Paris (APA, 2021). As medidas de mitigação dividem-se em dois grandes grupos: metas obrigatórias e incentivos para a redução direta das emissões, como a modernização de frotas e o uso de combustíveis sustentáveis; e mecanismos de compensação, como o CORSIA e o RCLE-UE, que permitem às companhias aéreas compensar emissões através da aquisição de créditos de carbono. Estas abordagens visam orientar o setor com os objetivos globais de descarbonização e controlo do aquecimento global.

### **2.2.1 Diretrizes de sustentabilidade na aviação**

No âmbito das políticas ambientais globais, a Organização da Aviação Civil Internacional alcançou, em 2016, um marco relevante com a aprovação de um acordo internacional que definiu uma estratégia para a regulamentação das emissões no setor da aviação. Este acordo conduziu à implementação do CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), um mecanismo que visa compensar e reduzir as emissões de carbono, contribuindo para a mitigação do impacto ambiental do setor.

No contexto da UE, desde 2012 que o setor da aviação foi integrado no Regime de Comércio Europeu de Licenças de Emissão (RCLE-UE). Este sistema funciona em paralelo com o CORSIA, garantindo o cumprimento dos compromissos internacionais assumidos pela UE, enquanto impõe limites às emissões e promove a transição energética no setor.

A Tabela 2 apresenta uma linha temporal com as principais políticas e diretrizes regulatórias que influenciam diretamente o setor da aviação, no período compreendido entre 2008 e 2024. Estas medidas estão organizadas segundo o respetivo domínio de aplicação: internacional (INT), União Europeia (UE) e nacional (PT). Para cada iniciativa, são descritas as principais características e benefícios para o setor, bem como as metas de descarbonização associadas, refletindo o crescente enquadramento legal no contexto da transição energética e da neutralidade carbónica.

**Tabela 2.** Linha temporal das políticas e diretrizes Internacionais, União Europeia e Portugal que influenciam diretamente o setor da aviação.

| ANO  | DOMÍNIO    | DIRETRIZ                                                                                                                                                          | CARACTERÍSTICAS/<br>BENEFÍCIOS E INFLUÊNCIA NA<br>AVIAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | METAS DE<br>DESCARBONIZAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008 | UE e PT    | <b>Comércio Europeu de Licenças de Emissão (RCLE-UE)</b><br>(Diretiva 2008/101/CE que altera a Diretiva 2003/87/CE). (Decreto-Lei n.º 93/2010). (Portugal, 2020a) | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A aviação foi incluída no regime de comércio de licenças de emissão na União Europeia a começar a partir de 1 de janeiro de 2012;</li> <li>✓ Todas as empresas aéreas que realizam voos com origem, destino ou dentro da União Europeia devem verificar e comunicar suas emissões de CO<sub>2</sub>, bem como obter certificados de emissão para compensar suas emissões anuais;</li> <li>✓ Em Portugal, a APA (Agência Portuguesa do Ambiente) ficou responsável por avaliar, quantificar, gerir e atribuir as licenças de emissões e ao INAC (Instituto Nacional da Aviação Civil) monitorizar as emissões pelas companhias;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> ao limitar as emissões anuais através da compra de licenças de emissão;</li> <li>✓ Reduzir em 23% as emissões por parte da indústria elétrica e industrial até 2020;</li> </ul>                                                                                                        |
| 2009 | eu         | <b>Diretiva RED</b><br>(Renewable Energy Directive)<br>(Diretiva 2009/28/CE)                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Incentiva a pesquisa, desenvolvimento e utilização de Sustainable Aviation Fuels (SAF);</li> <li>✓ Cria critérios de sustentabilidade para biocombustíveis (o uso e os impactos ambientais provenientes da produção e fabrico);</li> <li>✓ Incentiva a implementação de políticas, apoios financeiros e regulatórios para promover o uso de SAF;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Meta até 2020, Portugal ter uma quota de energia proveniente de fontes renováveis de 31%;</li> <li>✓ Redução de 20% das emissões GEE em comparação com os níveis de 1990 até 2020;</li> </ul>                                                                                                                                |
| 2016 | INT (ICAO) | <b>CORSIA</b><br>(EASA, 2024)                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Regime de compensação, que garante que as emissões da aviação internacional não excedem os níveis do ano de 2019 (ano base) e aplica-se a voos internacionais entre dois países da ICAO (International Civil Aviation Organization), do qual Portugal faz parte desde a Convenção de Chicago (1944).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estabilizar as emissões de CO<sub>2</sub> da aviação internacional nos níveis de 2019, promovendo o uso de compensações de carbono.</li> </ul>                                                                                                                                                                               |
| 2018 | eu         | <b>Diretiva RED II</b><br>(Renewable Energy Directive II)<br>(Diretiva 2018/2001/EU, Parlamento Europeu e do Conselho, 2018)                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estabelece um quadro para a promoção do uso de energias renováveis, incluindo a adoção de combustíveis alternativos como o hidrogénio na aviação;</li> <li>✓ Reconhece a importância do aumento do uso de combustíveis SAF na aviação;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Até 2030, pelo menos 14% do total de combustíveis utilizados no setor dos transportes devem ser provenientes de fontes renováveis, sendo que o setor marítimo e aviação não são obrigados a cumprir.</li> <li>✓ 32% de energias renováveis no consumo final de energia da UE até 2030.</li> <li>✓ Até 2030, o uso</li> </ul> |

|      |    |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |    |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | de 2,6%, de novos combustíveis renováveis, como o hidrogénio renovável, combustíveis sintéticos e eletricidade renovável;                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 2019 | PT | <b>Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050</b><br>(Resolução de Conselho de Ministros n.º107/2019 submetido em setembro de 2019 à Convenção das Nações Unidas para as Alterações Climáticas; (Portugal, 2019). | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Portugal comprometeu-se com a neutralidade carbónica até 2050. Este roteiro estabelece as trajetórias e políticas necessárias para atingir a neutralidade carbónica:</li> <li>1. Aumento do uso de SAF;</li> <li>2. Investimento e pesquisa no desenvolvimento de aeronaves elétricas e melhoria na eficiência dos motores;</li> <li>3. Implementação de tecnologias verdes e práticas sustentáveis nos aeroportos portugueses;</li> <li>✓ Medidas específicas para otimizar rotas e gestão de tráfego aéreo.</li> </ul>                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Neutralidade carbónica na aviação até 2050, com aumento do uso de SAF, aeronaves elétricas e eficiência dos motores.</li> <li>✓ Objetivo é que, até 2050, haja uma redução de 94% das emissões, comparado com o ano de 2005, no setor dos transportes;</li> </ul>                                                                                             |
| 2020 | PT | <b>Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC)</b><br>(Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de julho de 2020; (Portugal, 2020b)                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Foi exigido a todos os países da UE criarem um plano nacional integrado de energia e clima de 2021-2030 que contém as metas e políticas a cumprir para a descarbonização, energias renováveis, eficiência e segurança energética. Algumas metas/objetivos são:</li> <li>1. Redução das Emissões de GEE de 45%-55% - com eficiência dos motores, otimização de rotas, combustíveis sustentáveis, modernização das aeronaves;</li> <li>2. Aumento do uso de SAF;</li> <li>3. Incentivo à modernização a frota;</li> <li>4. Desenvolvimento de infraestruturas para combustíveis alternativos;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Quota de energia de fontes renováveis nos transportes no horizonte 2030 - 23%</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 2020 | PT | <b>Estratégia Nacional para o Hidrogénio</b><br>(Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, de 14 de agosto de 2020) (Portugal, 2020a).                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Incentivar, promover, produzir combustíveis sintéticos na aviação, com hidrogénio verde, usando financiamento europeu.</li> <li>✓ Delimitam várias fases até 2030, todo o processo de produção até ao uso como combustível.</li> <li>✓ Preveem que em 2045 a aviação deverá estar descarbonizada com a utilização de gases renováveis, hidrogénio e combustíveis sintéticos de origem não biológica.</li> </ul>                                                                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Meta até 2030:</li> <li>- 10 % a 15 % de injeção nas redes de gás natural;</li> <li>- 2 % a 5 % no consumo de energia do setor da indústria;</li> <li>- 1 % a 5 % no consumo de energia do transporte rodoviário;</li> <li>- 3 % a 5 % no consumo de energia do transporte marítimo doméstico;</li> <li>- 1,5 % a 2 % no consumo final de energia;</li> </ul> |

|      |        |                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                         |
|------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |        |                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 GW a 2,5 GW de capacidade instalada em eletrolisadores;</li> <li>- Criação de 50 a 100 postos de abastecimento;</li> </ul>                                   |
| 2021 | EU     | <b>“Green Deal”</b><br>(Pacto Ecológico Europeu)<br>(European Commission, 2019)                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Objetivo de neutralidade carbónica até 2050 com o uso de hidrogénio como uma necessidade energética até 2050;</li> <li>✓ Acelerar a adoção de SAF, propondo metas e um suporte financeiro maior;</li> <li>✓ Aumenta o investimento em desenvolvimento tecnológico de novas aeronaves;</li> <li>✓ Regulamentação mais rigorosa para a aviação e custos mais alto para as emissões de carbono;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alcance de neutralidade carbónica na aviação até 2050, com o aumento de SAF e uso de hidrogénio.</li> </ul>                                                    |
| 2021 | PT     | <b>Taxa de Carbono</b><br>(Portaria n.º 38/2021, de 16 de fevereiro 2021);<br>(Portugal, 2021b)                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Taxa aplicada às emissões de dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis fósseis;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reduzir as emissões de carbono na aviação ao encarecer o uso de combustíveis fósseis.</li> </ul>                                                               |
| 2021 | EU     | <b>Fit for 55</b><br>(Conselho Europeu, 2023a, b; Su-ungkavatin <i>et al.</i> , 2023)                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Parte do “Green Deal”;</li> <li>✓ Pacote de medidas propostas pela Comissão Europeia para ajudar a UE a alcançar a redução das emissões de gases de efeito estufa;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Redução em 55% até 2030 dos GEE, em comparação com níveis de 1990;</li> </ul>                                                                                  |
| 2023 | EU     | <b>Diretiva RED III</b><br>(Renewable Energy Directive III)<br>(Diretiva 2023/2413/EU, que altera a Diretiva 2018/2001)<br>(Parlamento Europeu e Conselho, 2023a) | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Simplifica os processos de licenciamento;</li> <li>✓ Refere a utilização dos combustíveis renováveis na aviação;</li> <li>✓ Promove combustíveis sustentáveis na aviação, incentivando um mercado competitivo e abastecimento suficiente para descarbonização;</li> </ul>                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aumenta a quota das energias renováveis de 32% para 42,5% até 2030 na UE;</li> </ul>                                                                           |
| 2023 | PT     | <b>Portaria n.º 15/2023</b><br>(De 4 de janeiro de 2023) (Portugal, 2023)                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estabelece um sistema de compra centralizada para o hidrogénio verde.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Facilitar a integração de hidrogénio verde no mercado energético e apoiar a transição para uma economia de baixo carbono.</li> </ul>                           |
| 2023 | EU     | <b>“ReFuelEU aviation”</b><br><br>(Parlamento Europeu e Conselho, 2023b; Su-ungkavatin <i>et al.</i> , 2023; Soone & Zlotowski, 2022)                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Iniciativa da União Europeia que promove o uso de combustíveis aéreos sustentáveis (SAF) no setor da aviação;</li> <li>✓ Apoio financeiro e regulatório para incentivar a produção destes combustíveis, serão desenvolvidos sistemas de certificação para SAF e será reforçada a cooperação internacional para haver partilha e incentivo destes combustíveis;</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Quota mínima de uso de biocombustíveis de 2% para 2023 e 63% para 2050, já para os combustíveis sintéticos, o uso é de 0,7% em 2030 e 28% para 2050</li> </ul> |
| 2023 | UE, PT | <b>Regime Comercio de Licenças de Emissões da UE (RCLE-UE)</b><br>(Diretiva 2023/958)                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estas licenças financiam projetos de redução de emissões, desenvolvimento de tecnologias inovadoras e renováveis para o sistema energético;</li> <li>✓ Na revisão do RCLE-EU no pacote FIT for</li> </ul>                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Objetivo: reduzir até 43% das emissões de GEE até 2030;</li> </ul>                                                                                             |

|      |        |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                               |
|------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |        | que altera a Diretiva 2003/87/CE) (Conselho Europeu, 2023b; Sungkavatin <i>et al.</i> , 2023)                                                         | 55 ficaram definidas algumas alterações:<br>a) a diminuição de licenças gratuitas (eliminação completa até 2026);<br>b) Voo de regiões ultraperiféricas da União Europeia, Suíça, Reino Unido e voos internacionais (envolvendo os estados participantes da CORSIA) com chegada e partida nos aeroportos da Espaço Económico Europeu serão incluídos na RCLE-EU;                                                                                                      |                                                                                                                                               |
| 2023 | PT     | <b>Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Transporte, Armazenamento e Terminais de Gás Natural Liquefeito (GNL)</b> (ERSE, 2023) | ✓ Define a estratégia e os investimentos necessários para o desenvolvimento da infraestrutura de GNL até 2027. Esta política é crucial para garantir a segurança energética e apoiar a transição para fontes de energia mais limpas;                                                                                                                                                                                                                                  | ✓ Apoiar a transição para combustíveis mais limpos, com impacto indireto na aviação.                                                          |
| 2024 | PT     | <b>Despacho n.º 5971-A/2024</b> (De 27 de maio de 2024) (Portugal, 2024)                                                                              | ✓ Procedimento concorrencial para a compra centralizada de hidrogénio;<br>✓ Reforça a implementação das metas de produção e utilização de hidrogénio;                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ✓ Reforçar as metas de hidrogénio verde na aviação, promovendo a descarbonização.                                                             |
| 2024 | PT     | <b>Resolução do Conselho de Ministros n.º 147/2024, de 28 de outubro</b> (Portugal, 2025)                                                             | ✓ Aprova o Roteiro Nacional para a Descarbonização da Aviação (RONDA), que define medidas/metas para reduzir as emissões do setor aéreo em linha com os objetivos do Acordo de Paris e da neutralidade carbónica até 2050.<br>a) Criação da Aliança para a Sustentabilidade na Aviação (ASA);<br>b) Promoção de tecnologias limpas, modernização da frota e melhorias operacionais;<br>c) A cargo da ANAC e APA elaborar planos de ação, metas e monitorização anual; | ✓ A partir de 2026, começam os apoios financeiros para a produção de SAF e combustíveis sintéticos com receitas do CELE e da taxa de carbono; |
| 2024 | PT     | <b>Decreto-Lei n.º 98/2024 (De 29 de Novembro)</b> (Diário da República, 2025b)                                                                       | ✓ Transposição da diretiva da União Europeia Diretiva (UE) 2023/958 e da Diretiva (UE) 2023/959 do Parlamento Europeu e do Conselho;<br>✓ Eliminação completa das licenças gratuitas do RCLE-EU;<br>✓ Diretiva RCLE passa a incluir o setor da aviação no âmbito do Fundo de Inovação, com o objetivo de apoiar projetos que visam a eletrificação, ou o incremento da produção de combustíveis com emissões baixas, ou nulas de carbono;                             | ✓ Reduzir as licenças gratuitas e a partir de 2026 extingui-las;                                                                              |
| 2025 | PT/INT | <b>Memorando de Cooperação Portugal – Clean Aviation JU (CAJU)</b> (Rep Portuguesa, 2025)                                                             | ✓ Parceria entre a ANI (Agência Nacional de Inovação) e a ANAC com a Clean Aviation (EU)<br>✓ Mobilização até 15 M€ para projetos de inovação e desenvolvimento em SAF, aeronáutica e tecnologias limpas;<br>✓ Criação de um Roteiro Técnico Comum para aeronaves de baixas emissões                                                                                                                                                                                  | ✓ Reforçar a inovação e a investigação de SAF<br>✓ Apoiar o desenvolvimento de aeronaves com baixas emissões de carbono                       |

Fonte: Elaborado pelo autor com base em referências na tabela.

A Tabela 2 compila as principais políticas e diretivas que influenciam diretamente o setor da aviação, com especial destaque para os objetivos de descarbonização definidos ao nível europeu e nacional. Dentre estas, o Pacto Ecológico Europeu e o pacote legislativo *Fit for 55* são pilares fundamentais, estabelecendo a meta de redução de 55% das emissões de GEE até 2030, face aos níveis de 1990.

No âmbito do *Fit for 55*, a iniciativa “*ReFuelEU Aviation*” introduz metas vinculativas para a substituição progressiva de combustíveis fósseis por combustíveis sustentáveis (SAF’s e combustíveis sintéticos). As metas são usar 2% de mistura SAF em 2025, 6% em 2030 e 70% até 2050. No caso dos sintéticos, usar 1,2% em mistura até 2030 e 35% de mistura até 2050. Estas metas visam acelerar a transição energética do setor aéreo, um dos mais difíceis de descarbonizar devido às limitações técnicas à eletrificação.

As Diretivas RED I, II e III acompanham esta trajetória, reforçando o papel dos combustíveis renováveis e impondo critérios de sustentabilidade mais exigentes, tanto à produção como à utilização. Paralelamente, o Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE (RCLE-UE), em vigor desde 2008 para o setor da aviação, tem permitido reduzir significativamente as emissões através de mecanismos de mercado. Entre 2005 e 2020, as emissões abrangidas por este regime caíram 40%, superando a meta inicial de 23%. Contudo, as previsões mais recentes apontam que, com as políticas atuais, a redução líquida da UE até 2030 será de apenas 41%, aquém da meta de 55% definida pela Lei Europeia do Clima. Isto realça a necessidade de atualizações e reforço de incentivos, especialmente no setor da aviação.

Em Portugal, diversas estratégias têm vindo a ser implementadas em alinhamento com as metas europeias. O Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) destaca a necessidade de promover SAF, otimizar as operações aéreas e incentivar a modernização de frotas. O Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) também destina verbas significativas à infraestrutura aeroportuária sustentável. A Lei n.º 98/2021, também designado como “Lei de Bases do Clima”, que estabelece as bases para a ação climática, define metas ambiciosas de redução de emissões de GEE:

- 55% até 2030;
- 65 a 75% até 2040;
- 90% até 2050;
- 2050 neutralidade carbónica, com um aumento significativo do uso de energias renováveis e tecnologias limpas.

Portugal encontra desafios para atingir estes objetivos a nível de infraestruturas, de custo da produção de hidrogénio verde que é atualmente mais caro do que a de combustíveis fósseis e, para além disso, existe ainda a necessidade de desenvolver e certificar novas tecnologias de aviação.

Através de parcerias entre governo, universidades e setores privados, Portugal pode posicionar-se como líder na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de hidrogénio. Para além disso, a utilização de recursos locais para a produção de hidrogénio pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados. A colaboração entre diversos setores e o investimento em pesquisa e desenvolvimento serão cruciais para superar os desafios e aproveitar as oportunidades que essa transição sustentável oferece (EHB, 2020; IRENA, 2020; IRENA, 2022).

Outro componente importante é a Estratégia Nacional para o Hidrogénio, que apoia a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de hidrogénio, incluindo a sua aplicação na aviação, visando reduzir as emissões e dependência de combustíveis fósseis. Essas políticas e diretrizes demonstram um esforço conjunto para modernizar o setor da aviação em Portugal, promovendo a sustentabilidade e a eficiência operacional.

O Regime Comercio de Licenças de Emissões da UE (RCLE-UE), também conhecido como Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), é um mercado de carbono operado pelos países membros da União Europeia. Surgiu em 2005 como o pioneiro e maior mercado de carbono global, com um sistema de limitação e comércio. Aplicável a vários setores, inclusive o da aviação (a partir de 2012), é, contudo, restrito a voos dentro da Europa. Nele, as companhias aéreas recebem uma quantidade fixa de permissões de emissão gratuitas e precisam adquirir permissões adicionais caso ultrapassem essa quantia. O intuito é estimular a diminuição das emissões por meio de um valor de mercado para o carbono, de modo a tornar financeiramente benéfico para as companhias investirem em tecnologias mais limpas e eficazes (Conselho Europeu, 2023a, b; Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

O CORSIA é um regime de compensação carbónica diferente do RCLE-UE. Ambos se propõem a reduzir as emissões de carbono do setor da aviação, porém, operam de formas e em contextos geográficos diferentes. O CORSIA, implementado pela ICAO, aplica-se às emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da aviação internacional entre Estados-membros, tendo como objetivo compensar o excesso de emissões de carbono, de forma a estabilizar as emissões líquidas do setor nos níveis registados em 2020 (EASA, 2024).

A partir de 2021, as companhias aéreas passaram a monitorar, reportar e em última

análise, compensar projetos que excedam os seus níveis de emissões de carbono de 2020, removendo o dióxido de carbono da atmosfera, através de energias renováveis, usando combustíveis elegíveis do CORSIA ou projetos de reflorestamento (EASA, 2024).

As medidas financeiras podem ser consideradas como um regime de compensação carbónica direta ou indireta, como por exemplo: a taxa de carbono – uma taxa fixa ou variável aplicada às emissões de dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis fósseis. Através da imposição da taxa de carbono, pretende-se reduzir as emissões promovendo o uso de tecnologias sustentáveis, gerar receitas para financiar projetos ambientais e, ainda, atribuir um preço dos combustíveis fósseis mais elevado. A taxa é calculada com base na quantidade de dióxido de carbono emitida e pode ser cobrada sobre o consumo dos combustíveis fósseis ou diretamente sobre as emissões totais resultantes da operação de uma empresa aérea (Portugal, 2021a, b; Ritchie & Rosado, 2022).

A adoção e implementação de uma taxa de carbono varia entre países e muitos fatores influenciam se um país adota ou não esta medida. Portugal utiliza esta medida, que foi implementada para a área da aviação e marítima, através da Portaria n.º 38/2021, de 16 de fevereiro 2021 (Portugal, 2021b).

Desde julho de 2021, os bilhetes de transporte aéreo comercial de passageiros com partida de aeroportos e aeródromos situados em Portugal estão sujeitos a uma taxa fixa de carbono de 2 euros. Estão isentos desta taxa crianças com menos de dois anos, voos com destino e partida nas Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores, voos forçados a aterrar em Portugal por motivos técnicos, meteorológicos ou similares, e serviços de transporte aéreo com obrigações de serviço público. A ANAC é a responsável por gerir, regular e transferir as receitas para o Fundo Ambiental Português (Portugal, 2021b).

### **3. Mecanismos de sustentabilidade através dos combustíveis**

Neste capítulo analisa-se as potencialidades de descarbonização do setor de aviação através de combustíveis alternativos ou mecanismos alternativos (3.1) como os biocombustíveis, baterias elétricas, com especial enfoque no hidrogénio verde (3.2). São apresentados os fundamentos qualitativos e quantitativos já consolidados na literatura científica e, ainda, conhecimentos adquiridos através de projetos já desenvolvidos que subsidiem informações para a construção do estudo de caso. Desta forma, conceitos sobre os impactos ambientais e a poluição do setor aéreo, bem como conceitos relativos ao hidrogénio verde como combustível são mostrados. Por fim, alguns projetos e trabalhos

relevantes são apresentados.

A adoção de mecanismos sustentáveis através de práticas como a participação de mercados de carbono e do desenvolvimento de tecnologias das aeronaves que projetam a redução do impacto ambiental do setor são apresentadas por Cui & Chen,(2024). Melhorar a eficiência das operações, seja na gestão de tráfego e/ou nas infraestruturas dos aviões, ao reduzir o peso, aumentar capacidade de assentos e torná-los mais eficientes no consumo de combustíveis são mecanismos possíveis de alcançar a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, contudo não é suficiente para uma redução expectável das emissões de carbono (Air Transport Action Group, 2021).

Desta forma, a aplicação de combustíveis alternativos e com menor impacto ambiental coloca-se como uma hipótese de alcançar tais metas de redução de emissão de CO<sub>2</sub> (Peacock *et al.*, 2023). Em contrapartida, é preciso considerar o impacto económico às empresas do setor, já que os custos com combustíveis representam cerca de um terço dos custos totais das companhias aéreas (UK Sustainable Aviation, 2023).

### **3.1 Combustíveis alternativos para aeronaves comerciais**

Atualmente, destacam-se quatro fontes emergentes de energia alternativa aos combustíveis fósseis que ajudarão a uma diminuição ou à neutralidade carbónica como os biocombustíveis, os eletrocombustíveis, as baterias elétricas e o hidrogénio (líquido de hidrogénio e células de combustível de hidrogénio).

#### **3.1.1 Biocombustíveis**

Os biocombustíveis, também conhecidos como combustíveis sustentáveis para a aviação (*sustainable aviation fuels* - SAF) ou bioSAF, são combustíveis de transição para outras alternativas de energia líquida zero, como hidrogénio verde, híbrido-elétrico ou aviões elétricos (Cui & Chen, 2024; Peacock *et al.*, 2023; Watson *et al.*, 2024). Estes são produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como óleo de cozinha usado, óleo de palma, óleo de soja, óleo de colza, cana-de-açúcar e outras culturas energéticas (Cui & Chen, 2024). As matérias-primas utilizadas passam por processos químicos, biológicos ou termoquímicos (Ahmad *et al.*, 2021) para produzir os biocombustíveis finais (Ahmad *et al.*, 2021; Sungkavatin *et al.*, 2023).

Os aviões não necessitam de modificações estruturais para a utilização de biocombustíveis e podem ser utilizados em mistura com o querosene convencional (Ahmad *et al.*, 2021; Brito Cruz *et al.*, 2014). Por razões técnicas e de segurança, atualmente esta mistura

é limitada a um máximo de 50%, mas espera-se que o limite de mistura acabe por aumentar para 100% nas próximas décadas (Air Transport Action Group, 2021).

A Tabela 3, apresenta os biocombustíveis existentes aprovados pela ASTM (American Society for Testing and Materials), assim como as suas principais características e percentagem de redução de cada um em relação ao combustível convencional.

**Tabela 3.** Características dos *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) e percentagem de redução das emissões de CO<sub>2</sub> face ao combustível convencional.

| SAF<br>(ano aprovado<br>ASTM)          | Matéria-prima                                                                                     | Limite da<br>mistura (%) | Processo<br>tecnológico                                          | Processo<br>químico                                                                                         | Redução<br>das<br>emissões<br>de CO <sub>2</sub><br>(%) |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>FT-SPK</b><br><br><b>2009</b>       | -Resíduos sólidos urbanos;<br>-Resíduos agrícolas e florestais;<br>-Culturas energéticas.         | 50                       | Fischer-Tropsch (FT) Querosene parafínico sintético (SPK)        | Gaseificação da biomassa para produzir gás de síntese, seguido de síntese de Fischer-Tropsch.               | 92                                                      |
| <b>HEFA-SPK</b><br><br><b>2011</b>     | -Matérias-primas à base de óleos derivados de algas, algumas espécies vegetais e gordura amarela. | 50                       | Ésteres hidroprocessados e ácidos gordos (HEFA)                  | Hidroprocessamento de triglicerídeos, seguido de hidroisomerização e hidrocrackeamento.                     | 27                                                      |
| <b>HFS-SIP</b><br><br><b>2014</b>      | -Açúcares.                                                                                        | 10                       | Açúcares fermentados hidroprocessados em isoparafinas sintéticas | Conversão microbiana de açúcares em hidrocarbonetos.                                                        | 53                                                      |
| <b>FT-SPK/A</b><br><br><b>2015</b>     | -Resíduos sólidos urbanos;<br>-Resíduos agrícolas e florestais;<br>-Culturas energéticas          | 50                       | FT-SPK com aromáticos                                            | Processo semelhante ao FT-SPK, com a adição de componentes aromáticos.                                      | 92                                                      |
| <b>ATJ-SPK</b><br><br><b>2016</b>      | -Biomassa celulósica                                                                              | 50                       | Álcool-para-Jet (ATJ)                                            | Conversão de álcoois (isobutanol, etanol) por desidratação, hidrogenação, oligomerização e hidrotratamento. | 57                                                      |
| <b>CH-SK OR CHJ</b><br><br><b>2020</b> | -Ácidos gordos, ésteres, lípidios                                                                 | 50                       | Querosene sintetizado por hidrotérólise catalítica (CH)          | Hidrotérólise catalítica de óleos energéticos.                                                              | 77                                                      |
| <b>HC-HEFA-SPK</b><br><br><b>2020</b>  | -Óleo de algas                                                                                    | 10                       | HEFA-hidrocarbonetos                                             | Conversão do óleo de triglicerídeos, derivado de algas em combustível de aviação.                           | n.d.                                                    |
| <b>FOG CO-PROCESSING</b>               | -Óleos e Gorduras                                                                                 | 5                        | Co-processamento de gorduras, óleos e massa lubrificante (FOG)   | Coprocessamento de gorduras, óleos e graxas com intermediários de petróleo.                                 | n.d.                                                    |
| <b>FT CO-PROCESSING</b>                | -FT biocrude                                                                                      | 5                        | Co-processamento Fischer-Tropsch (FT)                            | Co-processamento de syncrude de Fischer-Tropsch com petróleo bruto.                                         | n.d.                                                    |

**Fonte:** Elaborado pelo autor e adaptado de U.S. Department of Energy (2023); ICAO (2024); Watson *et al.*, (2024).

De acordo com a Tabela 3 verifica-se que o primeiro biocombustível aprovado pela ASTM foi o FT-SPK e dentro destes compostos é o que tem uma percentagem de redução de CO<sub>2</sub> maior, até 92% relativamente ao jetfuel, sendo possível misturar cerca de 50% deste biocombustível com a querosene convencional. O HEFA-SPK apesar de também ser constituído por uma mistura com 50% de querosene é o que apresenta menor redução de CO<sub>2</sub>.

Em comparação com os combustíveis de aviação convencionais, a combustão de SAF poderá reduzir até 92% as emissões de CO<sub>2</sub> e reduzir ou anular as emissões de outros GEE (Cui & Chen, 2024; Watson *et al.*, 2024). A magnitude desta redução depende do tipo de matérias-primas utilizadas (Cui & Chen, 2024; Peacock *et al.*, 2023; Watson *et al.*, 2024). O interesse pela utilização de SAF tem vindo a aumentar nos últimos anos, mas a sua utilização é reduzida, pois os custos de produção destes combustíveis são elevados e a oferta é insuficiente (Cui & Chen, 2024; Peacock *et al.*, 2023; Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

Na Tabela 4 são apresentados os valores quantitativos e dados referenciais relativos aos preços atuais dos biocombustíveis. Ainda na Tabela 4, verifica-se que o valor dos biocombustíveis foi sempre mais elevado do que o preço do jetfuel. Watson *et al.*, (2024) mostra que, mediante o tipo de biocombustível, o valor é variável, tendo em conta o tipo de matérias-primas e os custos associados ao processo de produção.

**Tabela 4.** Preços dos biocombustíveis entre 2020 e 2024 segundo alguns autores.

| REFERÊNCIAS                    | REFERÊNCIA<br>JETFUEL | VALOR<br>QUANTITATIVO                                                              | VARIAÇÕES                                                                                                                                |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Bose, 2023)                   | 119,70 \$/barril      | 280 \$/barril                                                                      | -                                                                                                                                        |
| (Patterson, 2024)              | -                     | -                                                                                  | 2 a 3 vezes mais caro                                                                                                                    |
| (Cui & Chen, 2024)             | -                     | -                                                                                  | 2 a 8 vezes mais caro                                                                                                                    |
| (Peacock <i>et al.</i> , 2023) | 142 \$/barril         | HEFA - 221 a 332<br>\$/barril<br>ATJ - 282-927 \$/barril<br>FT - 234-492 \$/barril | -                                                                                                                                        |
| (Van Dyk & Saddler, 2021)      | -                     | -                                                                                  | HEFA - 3 a 4 vezes mais caro                                                                                                             |
| (Cui & Chen, 2024)             | -                     | -                                                                                  | 2 a 8 vezes mais caro                                                                                                                    |
| (Watson <i>et al.</i> , 2024)  | -                     | -                                                                                  | FT-SPK – 320% mais caro<br>HEFA-SPK – 120% mais caro<br>ATJ-SPK – 240% mais caro<br>HFS-SIP – 700% mais caro<br>CHJ-SPK – 160% mais caro |

**Fonte:** Elaborado pelo autor com base em referências da tabela

De 2009 a 2020, 155 mil milhões de dólares foram investidos em investigação e desenvolvimento e cerca de 12 milhões de dólares em aeronaves novas com baixo consumo de combustível, contribuindo assim para uma redução de 54% no consumo de combustível e nas emissões de CO<sub>2</sub> (UK Sustainable Aviation, 2023). Em 2022, a produção global de SAF foi inferior a 0,1%, equivalendo a 240 000 toneladas. Até 2050, prevê-se uma produção global de 400 milhões de toneladas havendo uma expectativa de crescimento, que inicialmente será de uma forma mais lenta e posteriormente irá acelerar à medida que as tecnologias se tornem maduras no mercado e, conseqüentemente, mais acessíveis (UK Sustainable Aviation, 2023).

Para se conseguir atingir as metas pré-definidas para 2050 de redução carbónica, a aviação, caso utilize apenas SAF como combustível, terá de produzir entre 330 a 445 milhões de toneladas de SAF, sendo necessário um investimento de cerca de 1,45 triliões de dólares nos próximos 30 anos, que originará a criação de 14 milhões de empregos mundialmente (Air Transport Action Group, 2021; UK Sustainable Aviation, 2023).

As políticas atuais da União Europeia (UE) reforçam o uso destes combustíveis, com o Refuel Aviation que obriga ao uso de mistura com 6% de SAF até 2030. Portugal não dispõe de metas ou políticas próprias específicas para a produção e utilização de SAF, alinhando-se integralmente com os objetivos e diretrizes estabelecidos pela União Europeia. Medidas governamentais, financeiras e energéticas deverão ser consideradas para atingir as metas previstas. A colaboração entre a indústria, governos e comunidade científica irão ajudar na investigação e desenvolvimento de SAF (Air Transport Action Group, 2021; UK Sustainable Aviation, 2023). A ajuda do governo para a exploração do potencial de desenvolvimento do SAF a nível nacional ou regional incentivará investidores que, com programas de garantia de empréstimos e incentivos, poderão desenvolver a produção local de SAF e novas indústrias energéticas (Air Transport Action Group, 2021; UK Sustainable Aviation, 2023).

Na UE, o preço de SAF será impulsionado sobretudo pela dinâmica da oferta-procura e pela interação com o preço de aquisição. Dada esta incerteza de preços, a maior parte da produção de SAF anunciada na UE concentra-se no processo tecnológico de HEFA, pois apresenta um investimento baixo, altos rendimentos de matérias-primas à base de óleo e um baixo número de etapas no processo de produção que podem ser adaptadas às instalações existentes de combustíveis fósseis. Contudo a matéria-prima é limitada e apresenta um percentual de redução emissões GEE menor, de apenas 26% (Watson *et al.*, 2024).

O combustível FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene) e os processos

de produção HTL (Hydrothermal Liquefaction) e Pirólise, terão menos investimento até 2030, devido aos riscos técnicos, ao elevado custo de capital e à pequena dimensão de cada instalação (UK Sustainable Aviation, 2023).

O uso de SAF pode ser considerado como um mecanismo de transição para futuros combustíveis ou tecnologias com zero emissão carbónica. Watson *et al.*, (2024) referem que o Brasil será um dos primeiros líderes globais na produção de SAF, devido ao seu histórico com o bioetanol, assim como os EUA e a Europa, dada a existência de uma grande concentração de políticas e facilidade para produção de SAF.

### **3.1.2 Baterias elétricas**

As baterias elétricas poderão ser utilizadas como fonte de energia, contudo ainda existem várias limitações à sua implementação no setor da aviação. Em comparação com combustíveis líquidos ou gasosos, os sistemas de energia da bateria não produzem emissões diretas na propulsão dos aviões e mantêm sempre a performance, pois não há gasto de matéria durante uma viagem (Ansell, 2023; Thonemann *et al.*, 2024). Devido à baixa capacidade de armazenamento energético e terem uma baixa densidade energética comparativamente ao querosene fóssil, só será possível o uso em voos de curta distância e com um baixo número de passageiros (Adu-Gyamfi & Good, 2022; Ansell, 2023; Sungkavatin *et al.*, 2023; Thonemann *et al.*, 2024).

Atualmente, as baterias de Li-íon têm sido aplicadas a pequenas aeronaves, contudo para utilizar em aviões de transporte de carga, de passageiros e em voos de uma maior distância requer combinação com outra fonte energética, como por exemplo o querosene, processo que tem a designação de hibridização (Adu-Gyamfi & Good, 2022). A hibridização beneficia de maior autonomia, emissões e ruído reduzidos e baixos custos operacionais (Adu-Gyamfi & Good, 2022).

Um dos maiores problemas do uso de baterias elétricas é o sobreaquecimento, havendo assim um maior risco de incêndio (Thonemann *et al.*, 2024). É, portanto, necessário o desenvolvimento de baterias de elevado desempenho, maior densidade energética e estabilidade térmica (Ansell, 2023). Existem ainda dois pontos importantes que requerem a devida análise: o tempo de carregamento e a reciclagem das baterias. Para superar o fator tempo, tem sido considerada a substituição por uma bateria carregada durante a fase de rotação do avião.

O custo associado à implementação de baterias elétricas está interligado ao custo e estabilidade da rede elétrica, sendo que os recursos renováveis atualmente usados para

produção de eletricidade, como a energia solar e eólica *onshore*, têm preços inferiores aos recursos derivados dos fósseis (Ansell, 2023). No entanto, na reciclagem existe a necessidade de melhoria das tecnologias e dos métodos usados, para que o processo de reciclagem seja fácil e eficiente (Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

A nível social, esta opção de energia na aviação tem impactos positivos, tais como reforço da segurança energética, melhorias ambientais e na saúde, e criação de oportunidades de desenvolvimento económico (Ansell, 2023). Em contrapartida, na fabricação destas baterias são utilizadas matérias-primas tóxicas e considerados recursos não renováveis, como lítio e o cobalto. Em algumas situações, as práticas utilizadas na obtenção destes minerais são duvidosas, onde poderá existir trabalho forçado, exploração infantil, condições de trabalho precárias, elevados riscos à saúde e erosão do solo (Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

### 3.1.3 Hidrogénio (H<sub>2</sub>)

O hidrogénio (H<sub>2</sub>) é o elemento mais abundante do universo, o mais leve e com uma grande densidade energética. É um gás incolor, inodoro e insípido, possui baixa densidade e é altamente inflamável. É um elemento versátil e atualmente a sua produção é bastante dispendiosa (Abdin *et al.*, 2020; Yusaf *et al.*, 2023).

Devido à versatilidade de potencialidades de utilização, o hidrogénio tem vindo a ser utilizado nos setores industriais, de transporte, agrónomos, entre outros. No setor do transporte, mais precisamente na área da aviação, foi utilizado como combustível até início do século XXI (Yusaf *et al.*, 2023). Algumas empresas financiaram projetos para desenvolver aviões movidos a H<sub>2</sub> (Yusaf *et al.*, 2023). Em 1988, houve o primeiro voo com combustível duplo, no qual foi utilizado o líquido de hidrogénio (LH<sub>2</sub>) (Ansell, 2023). Os custos elevados, a quota consolidada do mercado de carbono e a falta de postos de abastecimentos impediram a comercialização e desenvolvimento tecnológico dos aviões movidos a H<sub>2</sub> (Yusaf *et al.*, 2023).

O hidrogénio é catalogado num espectro de cores, mediante a maneira como é produzido (Tabela 5). Deste modo, o hidrogénio cinzento é o que emite mais CO<sub>2</sub> e o que tem um menor custo de transformação, sendo que o hidrogénio verde é o mais benéfico para o ambiente e tem o custo de produção mais alto.

**Tabela 5.** Tipos de Hidrogénio, como são produzidos, custos e nível de poluição.

| Tipo hidrogénio         | Produção                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Custo de produção | Nível de poluição                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hidrogénio Cinza</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Hidrogénio obtido através da queima de combustíveis fósseis, principalmente gás natural.</li> <li>✓ A conversão de gás natural em hidrogénio ocorre através do processo chamado de reforma a vapor que através do aquecimento do gás natural há a separação do H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.</li> <li>✓ Cerca de 90% da produção mundial de hidrogénio é efetuada por este processo.</li> </ul> | ✓ Baixo           | ✓ Altamente poluente<br>(Grande emissão de CO <sub>2</sub> )                                                                                                                                               |
| <b>Hidrogénio Azul</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ O hidrogénio azul é produzido a partir do gás natural, pelo método reforma a vapor do metano, onde o metano reage com o vapor de água para formar H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.</li> <li>✓ O CO<sub>2</sub> produzido neste processo é capturado e armazenado através de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, em vez de ser libertado na atmosfera.</li> </ul>                    | ✓ Médio           | ✓ Poluente<br>(Possível capturar cerca de 60-90% das emissões de CO <sub>2</sub> )                                                                                                                         |
| <b>Hidrogénio Rosa</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Produzido através de eletrólise, com utilização de energia nuclear.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ✓ Elevado         | ✓ Não poluente (sem emissão de CO <sub>2</sub> )<br>(Apesar do manuseio e descarte de resíduos nucleares, assim como as instalações nucleares podem gerar riscos e preocupações ambientais e de segurança) |
| <b>Hidrogénio Verde</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Produzido através de eletrólise, com uso de energias renováveis.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ✓ Elevado         | ✓ Não poluente (sem emissão de CO <sub>2</sub> )                                                                                                                                                           |

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de Noussan *et al.*, (2021); Soja *et al.*, (2023).

Numa tentativa de mitigar os efeitos associados às alterações climáticas, houve a necessidade de rever as potencialidades do hidrogénio por parte governamental desde a sua produção até a sua utilização (Abdin *et al.*, 2020), verificando-se, assim, que é possível produzir e utilizar H<sub>2</sub> sem emissões de GEE. O armazenamento e o transporte podem ser feitos por longas distâncias, podendo ser transportado nos três estados físicos: líquido, sólido e gasoso (Abdin *et al.*, 2020).

O escopo principal desse trabalho é avaliar justamente o hidrogénio, mais precisamente

o Hidrogénio Verde, como combustível alternativo à aviação, por isso mais detalhes sobre ele na literatura académica serão expostos nos itens a seguir.

### **3.2 Hidrogénio Verde como combustível na aviação**

O processo de obtenção de  $H_2$  é através do eletrólise da água, com a ajuda de eletrolisadores. No eletrólise da água, a corrente elétrica leva à separação da molécula de água ( $H_2O$ ), dividindo-a em hidrogénio e oxigénio ( $O_2$ ) (Farhana *et al.*, 2024; Nasser & Hassan, 2024). Quando proveniente de uma fonte renovável, atribui-se a nomenclatura de hidrogénio ( $H_2$ ) verde e é a melhor alternativa em termos de emissão de gases de efeito estufa. Desta forma, o  $H_2$  Verde é o combustível alternativo a ser estudado por este trabalho e será detalhado nos próximos itens as análises necessárias para adaptação dele à aviação comercial.

O custo da produção de eletricidade e as tecnologias associadas às energias renováveis (solar e eólica) estão a diminuir, servindo de incentivo a investimentos e pesquisas associadas ao  $H_2$  verde como alternativa a vários combustíveis no setor dos transportes (Abdin *et al.*, 2020). O processo químico de obtenção do  $H_2$  verde é o mais sustentável do espectro de cores do  $H_2$ , pois não há a produção residual ou consequente de  $CO_2$  e óxidos de azoto ( $NO_x$ ) (Farhana *et al.*, 2024).

#### **3.2.1. Tipos de $H_2$ como combustível**

A conversão do combustível de  $H_2$  em energia que seja aproveitada por um motor de uma aeronave pode se dar de duas formas: a) através de células de combustível de hidrogénio; b) eletrocombustíveis; e, c) do hidrogénio em forma líquida.

##### **3.2.1.1 Células combustíveis de $H_2$**

As células de combustível de hidrogénio funcionam ao converter diretamente a energia química do hidrogénio em energia elétrica através de reações eletroquímicas, sem necessidade de combustão (Adler & Martins, 2023). Estas células são compostas por ânodo, cátodo e membrana eletrolítica. O hidrogénio é introduzido no ânodo, onde se oxida, libertando prótons e eletrões. Os eletrões são forçados a percorrer um circuito externo, gerando eletricidade, enquanto os prótons atravessam a membrana eletrolítica em direção ao cátodo, onde reagem com oxigénio para formar água, o único subproduto da reação (MTU Aero Engines AG, 2024).

As células de combustível podem ser classificadas com base no tipo de eletrólito aplicado no sistema. Estes eletrólitos, sólidos ou líquidos, têm a função de transportar exclusivamente iões de um eletrodo para o outro. A escolha do eletrólito influencia a temperatura de

operação, a eficiência e a potência das células de combustível (Adler & Martins, 2023). Segundo Hwang *et al.* (2023) e Adler & Martins (2023), existem cinco tipos mais comuns de células de combustível: célula de combustível de membrana com troca de prótons (PEMFC), célula de combustível alcalina (AFC), célula de combustível de ácido fosfórico (PAFC), célula de combustível de carbonato fundido (MCFC) e célula de combustível de óxido sólido (SOFC).

Os principais desafios económicos associados às células de combustível incluem o elevado custo dos materiais, especialmente os catalisadores de platina, e a necessidade de infraestrutura para produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio (Hwang *et al.*, 2023). O desenvolvimento de catalisadores alternativos e métodos de produção de hidrogénio mais eficientes e ecológicos (transição para o hidrogénio verde) são áreas de pesquisa intensiva que visam reduzir esses custos (Hwang *et al.*, 2023).

Os benefícios das células de combustível são múltiplos e significativos. Em termos ambientais, a redução drástica das emissões de gases de efeito estufa e de poluentes locais como NO<sub>x</sub> e partículas, representam um avanço fundamental para a sustentabilidade. Do ponto de vista operacional, a alta eficiência energética das células de combustível pode resultar em menores custos operacionais a longo prazo, apesar do investimento inicial elevado (Hwang *et al.*, 2023).

Apesar das vantagens, a adoção das células de combustível de hidrogénio na aviação enfrenta desafios significativos. A densidade energética do hidrogénio, embora alta, ainda apresenta dificuldades em comparação com os combustíveis fósseis líquidos em termos de armazenamento e peso (Adler & Martins, 2023).

### **3.2.1.2 Eletrocombustíveis**

Os eletrocombustíveis, também denominados e-combustíveis, e-SAF ou combustíveis sintéticos não biogénicos, são produzidos através da combinação de hidrogénio com carbono (CO<sub>2</sub>), gerando um combustível líquido compatível com os motores de aviação convencionais. O hidrogénio é geralmente obtido por eletrólise da água (hidrogénio verde), enquanto o carbono é capturado da atmosfera ou de fontes industriais, num processo conhecido como *Power-to-Liquid* (PtL) (Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

Por utilizarem eletricidade, ar e água como matérias-primas, os e-SAF não enfrentam as limitações logísticas e agrícolas dos biocombustíveis, o que lhes confere maior potencial de escalabilidade. No entanto, estes combustíveis enfrentam grandes desafios económicos e energéticos: o processo de eletrólise requer elevada quantidade de energia renovável e a

captura de carbono atmosférico é tecnologicamente complexa e dispendiosa (Peacock *et al.*, 2023).

Os custos de produção atuais variam entre 1.550 e 5.600 USD por tonelada, tornando os e-SAF significativamente mais caros do que os combustíveis fósseis (Peacock *et al.*, 2023). Apesar disso, têm a vantagem de não exigir modificações nos motores das aeronaves, permitindo a sua utilização imediata com as infraestruturas existentes (Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

Tal como ocorreu com outras tecnologias energéticas emergentes, como a solar fotovoltaica, espera-se que os custos venham a diminuir com o avanço tecnológico, aumento da produção e políticas de incentivo. Ainda assim, estima-se que, a curto prazo, a utilização de e-SAF possa provocar um aumento no preço final dos bilhetes de avião.

Em termos de competitividade, os eletrocombustíveis ainda apresentam custos superiores ao diesel e ao querosene de aviação, sendo necessário aprofundar a investigação e desenvolver modelos económicos viáveis para garantir a sua integração futura no setor (Peacock *et al.*, 2023).

### **3.2.1.3 Hidrogénio Líquido (LH)**

O hidrogénio tem uma densidade energética maior, em termos relação-peso, que o querosene convencional, tornando-o adequado para aviões para rotas de grandes distâncias e que suportem grande quantidade de carga. O hidrogénio criogénico ou hidrogénio líquido (LH<sub>2</sub>) requer um armazenamento específico para se manter no estado líquido (-253°C). Para ser possível o uso de LH<sub>2</sub> no avião, tem de existir um tanque criogénico com isolamento, uma câmara de combustão para passar do estado líquido a gasoso e outras modificações necessárias (Su-ungkavatin *et al.*, 2023).

O LH<sub>2</sub> criogénico tem propensão a fugas, devido à alta taxa de ebulição do H<sub>2</sub> e ao pequeno tamanho da molécula. Em consequência disso, o uso de H<sub>2</sub> eleva a regulamentação e certificação de segurança em aeroportos, locais de produção, armazenamento, transporte, distribuição, bem como no interior do avião (Su-ungkavatin *et al.*, 2023). Apresenta uma menor inflamabilidade e tem uma temperatura de autoignição mais alta (550°C do LH<sub>2</sub> e 300°C, para querosene convencional). A grande dificuldade prende-se em gerir e reorganizar as mudanças estruturais no avião, para possibilitar o armazenamento de LH<sub>2</sub>, pois necessita de um maior espaço comparativamente ao querosene atual (Su-ungkavatin *et al.*, 2023; Yusaf *et al.*, 2023).

Os custos recorrentes do LH<sub>2</sub> derivam de fontes de energia renováveis, sistemas de

eletrólise e instalações de liquefação (Hoelzen *et al.*, 2023).

No que diz respeito a aviões comerciais a  $H_2$ , estes necessitam de abastecimento e armazenamento (a bordo) de  $LH_2$ , que possua uma densidade de energia volumétrica relativamente superior comparado com o hidrogénio gasoso comprimido (GH), originando armazenamentos menores e possibilitando assim a projeção de aviões eficientes (World Economic Forum, 2023b). A longo prazo, a estrutura de aeronaves híbridas-elétricas utilizando células de combustível e hidrogénio como combustível, revelou-se bastante promissora, com a condição de que os altos impactos para a saúde humana sejam atenuados (Ansell, 2023).

O uso do  $LH_2$  demonstra claras vantagens comparativamente com outros combustíveis, apresentando uma abordagem auspiciosa no cumprimento das metas ambientais para a aviação, sendo a remoção completa das emissões de  $CO_2$  a mais importante (Ansell, 2023; Yusaf *et al.*, 2023). Contudo, o seu uso a curto e médio prazo é limitado devido aos desafios relativamente ao armazenamento criogénico, inflamabilidade e infraestrutura necessária (Ansell, 2023), bem como os altos custos associados aos métodos de produção do  $H_2$  (Yusaf *et al.*, 2023). Mesmo perante estes desafios, mantém-se como a opção sustentável mais viável a médio e longo prazo (Ansell, 2023; Yusaf *et al.*, 2023).

### **3.2.2 Tipos de Eletrolisadores**

Existem vários tipos de eletrolisadores, de referenciar o eletrolisador alcalino, o eletrolisador *Alkaline Anion Exchange Membrane (AAEM)*, eletrolisador de Óxido Sólido e tipo *Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*. Um eletrolisador compreende um ânodo e um cátodo separados por um eletrólito. A função dos eletrolisadores varia entre si, pois diferentes tipos de eletrólitos são usados em diferentes eletrolisadores (Farhana *et al.*, 2024).

#### **3.2.2.1 Eletrolisadores Alcalinos**

Estes eletrolisadores utilizam uma solução de hidróxido de potássio ou sódio para realizar a separação das moléculas de  $H_2O$  (Noussan *et al.*, 2021). O processo ocorre em uma célula de eletrólise, que consiste em dois elétrodos (um ânodo e um cátodo), separados pelo eletrólito (Pashchenko, 2024). Esta técnica é relativamente madura e vem sendo usada há décadas em aplicações industriais, produzida em larga escala. Os eletrolisadores alcalinos comerciais atuam entre 100 – 150°C (Farhana *et al.*, 2024) e a eletrólise alcalina normalmente tem uma eficiência de cerca de 70% a 80% (Farhana *et al.*, 2024; Pashchenko, 2024). As principais desvantagens são: o alto valor de investimento, cinética lenta, alta corrosão eletrolítica, permeação de gás (Pashchenko, 2024).

### 3.2.2.2 Eletrolisadores AAEM

O processo de eletrólise Alkaline Anion Exchange Membrane (AAEM), envolve o uso de uma membrana alcalina de troca de aniões que separa os compartimentos de ânodo e cátodo numa célula eletrolítica. O uso potencial com energias renováveis, a capacidade de produzir  $H_2$  com alta pureza, eficiência até 75% e não requerer catalisadores caros são algumas das vantagens do eletrólise por este mecanismo. Espera-se que estes eletrolisadores num futuro próximo incluam sistemas mais eficientes e económicos para a produção de  $H_2$  em grande escala (Pashchenko, 2024).

### 3.2.2.3 Eletrolisadores Óxido Sólido

O eletrolisador contém dois elétrodos (ânodo e cátodo), separados por um eletrólito de óxido sólido (Noussan *et al.*, 2021). É uma forma promissora de obter  $H_2$  verde, apresenta até 97% de eficiência de conversão, pode operar em altas temperaturas, pode ser alimentado por fontes de energia renováveis e é escalável, ou seja, adapta-se à produção em grande ou pequena escala (Pashchenko, 2024). Algumas desvantagens baseiam-se nos altos custos de capital e o fato do eletrólito de óxido de sólido ser sensível às impurezas das águas. A eletrólise por óxido sólido ainda é um método laboratorial (Pashchenko, 2024).

### 3.2.2.4 Eletrolisadores PEM

Estes eletrolisadores utilizam uma solução de hidróxido de potássio ou sódio para realizar a separação das moléculas de  $H_2O$  (Noussan *et al.*, 2021). O processo ocorre em uma célula de eletrólise, que consiste em dois elétrodos (um ânodo e um cátodo), separados pelo eletrólito (Pashchenko, 2024). Esta técnica é relativamente madura e vem sendo usada há décadas em aplicações industriais, produzida em larga escala. Os eletrolisadores alcalinos comerciais atuam entre 100 – 150°C (Farhana *et al.*, 2024) e a eletrólise alcalina normalmente tem uma eficiência de cerca de 70% a 80% (Farhana *et al.*, 2024; Pashchenko, 2024). As principais desvantagens são: o alto valor de investimento, cinética lenta, alta corrosão eletrolítica, permeação de gás (Pashchenko, 2024).

A eletrólise PEM é dos métodos de eletrólise mais promissores e com maiores benefícios técnicos (Farhana *et al.*, 2024; Noussan *et al.*, 2021), pois produz oxigénio como subproduto e não emite carbono. Para além disso, quer o  $O_2$  e quer o  $H_2$  (com altíssima pureza) que são produzidos, podem ser imediatamente utilizados em células de combustível e outras aplicações industriais (Farhana *et al.*, 2024). A eletrólise PEM pode alcançar até 90% de eficiência (Pashchenko, 2024). A eficácia do sistema pode ser afetada por fatores de clima, humidade e circunstâncias operacionais (Karayel & Dinçer, 2024).

### **3.2.3 O armazenamento do H<sub>2</sub> como combustível**

O armazenamento do hidrogénio pode fazer-se de três formas (Ruihan *et al.*, 2024): a) armazenamento gasoso ou hidrogénio comprimido; b) armazenamento líquido; e, c) armazenamento sólido através de hidretos sólidos e nano-materiais.

#### **3.2.3.1 Armazenamento gasoso**

Realizado a pressões elevadas (350–950 bar) em recipientes reforçados com fibra de carbono, é adequado para pequenas quantidades (até 1000 kg). Em escala média (até 20 toneladas), pode ser armazenado subterraneamente a <100 bar (Papadias *et al.*, 2021). É uma tecnologia madura, mas limitada pela densidade energética relativamente baixa.

#### **3.2.3.2 Armazenamento líquido**

Utiliza tanques criogénicos com isolamento a vácuo para manter o H<sub>2</sub> a temperaturas próximas dos -253 °C. É possível armazenar até 250 toneladas em tanques no solo, ou até 3000 toneladas em cavernas geológicas. Tanques esféricos são mais eficientes energeticamente, mas os cilíndricos são mais económicos. Os principais desafios prendem-se com perdas térmicas, segurança e complexidade do isolamento (Yin *et al.*, 2024).

#### **3.2.3.3 Armazenamento sólido**

Baseia-se na absorção reversível do hidrogénio em metais ou ligas, formando hidretos metálicos. Esta tecnologia oferece elevada densidade de armazenamento, maior segurança e facilidade de transporte, sem necessidade de temperaturas ou pressões extremas. Contudo, está ainda em fase de desenvolvimento e enfrenta desafios relacionados com peso e eficiência (Farhana *et al.*, 2024; Ruihan *et al.*, 2024).

### **3.2.4 Mercado atual e projecções H<sub>2</sub>**

Mediante dados IEA (2023), no ano de 2021 o uso de hidrogénio foi 0,4 milhões de toneladas (Mt), prevêem que em 2030 seja 89,6 Mt e em 2050 452,8 Mt. Já dados da Hydrogen Council & McKinsey & Company (2022) têm uma projeção maior, 140 Mt para 2030 e 660Mt para 2050. Ambos os estudos mostram que a procura e produção de hidrogénio nas próximas décadas crescerá rapidamente, o que exigirá, por sua vez, um enorme investimento de centenas de milhares de milhões de euros por ano (Oesingmann *et al.*, 2024). O setor dos transportes será aquele em que haverá uma maior procura e produção de hidrogénio (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2022).

Atualmente, o hidrogénio utilizado é quase inteiramente fornecido por combustíveis fósseis, em que gera a emissão de CO<sub>2</sub> por ano é de 830Mt (IEA, 2019). O custo atualmente

para a produção de hidrogénio verde é elevado, a IEA prevê que, em 2030, o custo da produção de hidrogénio verde cairá 30%, devido à diminuição dos custos das energias renováveis e maior produção do hidrogénio (IEA, 2019).

O relatório “Global Hydrogen Flows” (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2022) apresenta um plano faseado de evolução do mercado de hidrogénio, sintetizado na Tabela 6.

**Tabela 6.** Evolução do mercado previsto para o hidrogénio (2025 até 2050).

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Até 2025</b> | ✓ Nesta fase o foco está na transição para produtos mais sustentáveis, aproveitando as infraestruturas existentes e começando a integrar fontes renováveis;                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Até 2030</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prevê-se que nesta fase os primeiros oleodutos de longa distância estejam estabelecidos, irá facilitar o transporte de hidrogénio em grande escala na América do Norte e na Europa. Fará com que haja um aumento significativo no comércio de derivados de hidrogénio, como amoníaco e metanol;</li> <li>✓ Surgem as primeiras rotas comerciais de hidrogénio;</li> <li>✓ A Europa começará a importar hidrogénio para suprir a procura interna;</li> <li>✓ A produção global de hidrogénio será dividida de forma equilibrada entre hidrogénio renovável e hidrogénio de baixo carbono;</li> </ul>                        |
| <b>Até 2040</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Esta fase caracterizada por um crescimento do mercado permitirá maior liquidez, com infraestruturas mais robustas e redes de distribuição mais amplas. O transporte de hidrogénio por gasodutos e transporte marítimo de hidrogénio atinge uma escala significativa;</li> <li>✓ Crescimento na produção de hidrogénio renovável e de baixo carbono;</li> <li>✓ Redução significativa do hidrogénio cinzento;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Até 2050</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nesta fase, o mercado de hidrogénio está totalmente maduro, com uma infraestrutura global bem estabelecida e um comércio internacional de hidrogénio e seus derivados em grande escala. O transporte por gasodutos continua a crescer;</li> <li>✓ Prevê-se que 70% do hidrogénio global será proveniente de fontes renováveis;</li> <li>✓ Prevê-se que haja a eliminação completa do hidrogénio cinzento;</li> <li>✓ O número de rotas comerciais crescerá substancialmente comprovando a evolução das infraestruturas de transporte e das parcerias internacionais;</li> <li>✓ Diversificação das Exportações;</li> </ul> |

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de Hydrogen Council & McKinsey & Company (2022).

Estas fases representam o crescimento progressivo e a maturidade do mercado de hidrogénio, desde a substituição inicial de produtos existentes por opções mais limpas, passando pelo desenvolvimento de infraestrutura de transporte, até a maturidade total do mercado, com um comércio global diversificado e robusto.

A partir de 2030, prevê-se que a produção de hidrogénio verde será 55 a 60% dos investimentos totais no setor, em que mais de 75% destes investimentos serão para a geração de energia renovável (eólica, solar). Também haverá um grande investimento em oleodutos, instalações de reconversão e transporte marítimo (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2022).

Até 2050, o comércio global de hidrogénio terá diferentes rotas comerciais que ligarão

diferentes países/regiões do mundo, por gasodutos ou via transporte marítimo. Haverá uma diversificação de exportações, aumentando a procura de derivados de hidrogénio (aço verde, amoníaco, metanol), em que esta maturidade do mercado permitirá com que haja uma rede global bem desenvolvida e eficiente para a produção, transporte e comércio de hidrogénio (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2022; IEA, 2023a). Esta rede permitirá uma descarbonização eficaz das economias ao redor do mundo.

A utilização de hidrogénio e seus derivados pode trazer vantagens económicas pois reduzirá os custos totais em 25%, que resulta numa poupança de 460 mil milhões de dólares até 2050, que engloba tanto as despesas de capital (investimento de infraestruturas), como operacionais (custos de funcionamento) ao longo de toda a cadeia de valor do hidrogénio. Prevê-se o custo de 140 mil milhões de dólares anuais para infraestrutura de transporte de hidrogénio até 2050 (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2022).

No total, o transporte e o comércio de longas distâncias podem poupar mais de 5 biliões de dólares em custos agregados do sistema até 2050, em comparação com um sistema sem comércio. Os custos de produção irão reduzir cerca de 570 mil milhões de dólares devido à expansão de áreas de produção mais económicas. O comércio de hidrogénio e seus derivados promove uma maior eficiência económica (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2022).

### **3.2.5 Projetos para o uso de H<sub>2</sub> na aviação comercial**

Os fabricantes de aeronaves e empresas aéreas comprometeram-se a reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> para metade até 2050 com inovação tecnológica, combustíveis de aviação sustentável e melhores infraestruturas. Para além disso, estão a trabalhar para fabricar aeronaves, mais eficientes que reduzem o consumo de combustível e a quantidade de emissões de carbono (Paraschi *et al.*, 2024).

As aeronaves a hidrogénio para além não terem emissões de carbono, do ponto de vista tecnológico, podem parecer-se com as aeronaves atuais, em que a mudança estrutural significativa será no armazenamento e sistema de combustível (Adler & Martins, 2023). O interesse por essas aeronaves é elevado atualmente, contudo apresentam desafios técnicos e económicos, pois manipular e armazenar hidrogénio, principalmente o hidrogénio líquido é um desafio. A projeção de sistemas de propulsão a hidrogénio, o custo das aeronaves e infraestruturas é significativo (Adler & Martins, 2023).

As empresas e projetos de hidrogénio na aviação procuram estar na vanguarda da

inovação. A nível internacional existem projetos como a ZeroAvia, Flyzero, Airbus, Universal Hydrogen, e a nível nacional o projeto Hydrogen Valley Leça da Palmeira produzirá combustíveis sintéticos.

Em Portugal, com o apoio da União Europeia, estão em curso projetos embrionários ligados à produção e aplicação de hidrogénio, consolidando o papel do país na transição para uma aviação sustentável.

### **3.2.5.1 Projetos Internacionais**

#### **A. ZeroAvia**

A ZeroAvia, fundada em 2018 e sediada nos Estados Unidos, tem como principal missão o desenvolvimento de soluções sustentáveis para a aviação, com foco na eliminação das emissões de carbono. A empresa aposta na utilização de motores elétricos alimentados por células de combustível a hidrogénio, substituindo os sistemas convencionais por propulsão hidrogénio-elétrica, posicionando-se na vanguarda tecnológica da aviação limpa (ZeroAvia, 2023a; 2023b; 2024a).

De acordo com análises realizadas pela empresa, a utilização de células de combustível a hidrogénio pode reduzir até 95% das emissões de gases com efeito de estufa, superando significativamente outras alternativas como os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) ou a combustão direta de hidrogénio.

O sistema ZA600, Figura 4, representa a principal tecnologia da empresa, combinando células de combustível, tanques de hidrogénio leve, motores elétricos e caixa de velocidades. Este sistema será instalado em aeronaves compatíveis, como a Grand Caravan, com capacidade para transportar entre 9 e 19 passageiros. A ZeroAvia prevê que a primeira aeronave com o sistema ZA600 esteja operacional em 2025 (ZeroAvia, 2023a; 2024b).

**Figura 4.** Aeronave com sistema ZA600.



**Fonte:** ZeroAvia, (2024b)

Num teste realizado em maio de 2024, a empresa alcançou um marco importante:

um voo de 35 minutos, o mais duradouro até então com esta tecnologia, reforçando o potencial do sistema para voos comerciais de curta distância no futuro próximo (Barabanova, 2024).

## **B. Flyzero**

O projeto FlyZero, lançado em 2021 após a COP26, é uma iniciativa do Instituto de Tecnologias Aeroespaciais do Reino Unido, com apoio governamental e envolvimento de empresas como Airbus, EasyJet e Rolls-Royce, com o objetivo de atingir zero emissões de carbono nos voos comerciais (Aerospace Technology Institute, 2024; Hughes & Gear, 2022; Town *et al.*, 2022).

O projeto avalia combustíveis alternativos, tecnologias de propulsão e as alterações necessárias nas infraestruturas aeroportuárias e aeronáuticas para alcançar a neutralidade carbônica. Segundo Hughes & Gear (2022), embora os SAF (Sustainable Aviation Fuels) possam ser uma solução de curto prazo para reduzir emissões, a sua dependência de matéria-prima limitada compromete a viabilidade a longo prazo. O relatório destaca o hidrogênio verde como a alternativa mais promissora, pela sua alta densidade energética e ausência de emissões de carbono.

A Flyzero destaca alguns projetos e compara-os com as aeronaves atuais, movidas a querosene/SAF. São estudados, então, três conceitos diferentes mediante o tamanho, alcance e combustível utilizado, dividindo o estudo em aeronave regional, aeronave de corpo estreito e aeronave de médio porte, conforme a Tabela 7.

O plano estratégico da FlyZero inclui uma entrada gradual no mercado regional, menos dispendioso, com ambição de lançar aeronaves de fuselagem estreita e médio porte a hidrogênio até 2030, contribuindo para a transição para uma aviação comercial descarbonizada (Town *et al.*, 2022).

**Tabela 7.** Conceitos teóricos de possibilidade de aeronaves, com características que variam mediante o tamanho, o alcance e o tipo de combustível.

| Conceito                          | Características                                                                 | Alterações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Exemplo                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aeronave regional</b>          | -Transporta até 75 passageiros;<br>-Alcance projetado de 800 milhas náuticas;   | ✓ Fuselagem mais larga que aeronaves regionais, devido ao tanque de H <sub>2</sub> (traseira do avião);<br>✓ Uso de células de combustível;<br>✓ Mais pesado e é necessário menos combustível (comparação ao utilizar SAF).                                                                                                                                                                   |                                                                                                      |
| <b>Aeronave de corpo estreito</b> | -Transporta até 179 passageiros;<br>-Alcance projetado de 2400 milhas náuticas; | ✓ Parte traseira serve para armazenamento e propulsão de energia;<br>✓ Uso de hidrogênio como combustível;<br>✓ Mais comprido, mais pesado e necessário menos combustível (comparação ao utilizar SAF);<br>✓ Desvantagem: peso traseiro, colocando asas perto da parte anterior do avião (fornece controle adicional de inclinação).                                                          | <br>❖ Exemplo de semelhantes: AirbusA320 ou Boeing737                                                |
| <b>Aeronave médio porte</b>       | -Transporta até 279 passageiros;<br>-Alcance projetado de 5750 milhas náuticas; | ✓ Diâmetro da fuselagem maior que o normal, com corredor duplo e mais comprido que as aeronaves atuais com carga e estrutura idênticas;<br>✓ Armazenamento de combustível na parte posterior e um tanque na fuselagem em frente à asa;<br>✓ Utilização de hidrogênio como combustível;<br>✓ Mais leve comparativamente a um avião semelhante que utiliza SAF, é necessário menos combustível. | <br>❖ Capacidade de carga útil igual ao Boeing 767<br>❖ Estrutura semelhante AirbusA350 e Boeing777 |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Town *et al.*, 2022.

### C. Airbus

O grupo Airbus é a maior empresa aeronáutica e espacial da Europa e líder mundial em fornecimento, conceção e fabrico de serviços, produtos e soluções aeroespaciais (Airbus, 2024a). A empresa possui uma gama variada de produtos/serviços e está focada nas questões ambientais e nas metas para a descarbonização até 2050. Por essa razão, e para uma diminuição das emissões, estão a aumentar o uso de SAF e toda a sua frota está capacitada para uma mistura de até 50% dos combustíveis sustentáveis. Têm a meta de até o final de 2024 atingir 15% de SAF do mix total do combustível e até 2030 cerca de 30%.

A Airbus identificou o hidrogénio como o combustível do futuro devido ao fato de não haver emissões de carbono e, por essa razão, criou, em 2022 o projeto Zeroe (Airbus, 2023). Este projeto está a desenvolver motores de aviação que funcionam com o uso de hidrogénio, por combustão ou por células de combustível e tem como objetivo de até 2035 ter o primeiro avião comercial movido a hidrogénio. Para além disso, criou centros de desenvolvimento em

alguns países europeus para trabalhar em tanques e sistemas de combustível criogénico (Airbus, 2023).

O projeto GOLIAT (Ground Operations of Liquid Hydrogen Aircraft) (Airbus, 2024b; European Commission, 2024), financiado pela União Europeia e liderado pela Airbus, apoiado por empresas aeroportuárias, como a Vinci Airports (ANA – Aeroportos de Portugal), investigadores e empresas líderes da indústria de hidrogénio, tem como objetivo:

- Desenvolver e demonstrar tecnologias de reabastecimento LH<sub>2</sub> para futuras aeronaves comerciais de grande porte;
- Desenvolver o quadro de certificações, para operações futuras com LH<sub>2</sub>;
- Avaliar a economia e a dimensão das cadeias de valor de hidrogénio nos aeroportos.

O projeto GOLIAT pretende analisar os impactos operacionais, regulamentares e de segurança da utilização do hidrogénio líquido nos aeroportos.

#### **D. Universal Hydrogen**

A Universal Hydrogen, start-up fundada em 2020 com o objetivo de tornar a aviação a hidrogénio uma realidade a curto prazo e alinhar o setor com as metas do Acordo de Paris, faliu em julho de 2024 devido à falta de financiamento, apesar do apoio de investidores de renome e dos avanços tecnológicos alcançados (GreenAir, 2024). Especialistas consideram que o legado tecnológico da empresa poderá ainda ser aproveitado por outros agentes do setor.

Durante a sua atividade, a Universal Hydrogen destacou-se pelo desenvolvimento de módulos criogénicos de hidrogénio líquido, concebidos para serem transportados por camião e conectados diretamente à aeronave. Cada dois módulos armazenavam 360 kg de hidrogénio, com autonomia de voo de 500 milhas náuticas, além de 45 minutos adicionais de reserva (Universal Hydrogen, 2024).

A empresa também investiu no desenvolvimento de sistemas de propulsão baseados em células de combustível para aviões regionais e nas respetivas infraestruturas aeroportuárias de apoio. Em março de 2022, realizou o primeiro voo do maior avião com célula de combustível de hidrogénio do mundo, marcando um feito relevante no setor da aviação sustentável (Universal Hydrogen, n.d.). Apesar do encerramento, o seu contributo para a inovação em armazenamento e propulsão a hidrogénio poderá influenciar o desenvolvimento futuro da aviação descarbonizada.

### 3.2.5.2 Projetos em Portugal

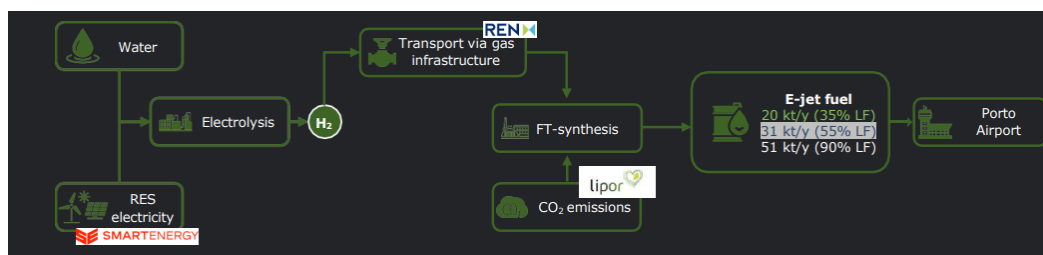
A Península Ibérica destaca-se como uma das regiões prioritárias da União Europeia para a produção de hidrogénio verde, devido às suas condições climáticas favoráveis, elevada capacidade instalada de energias renováveis, extensa área territorial disponível, rede elétrica interligada e infraestruturas logísticas e portuárias desenvolvidas. Adicionalmente, a presença de uma rede de gasodutos para o resto da Europa e o acesso direto aos incentivos europeus tornam Portugal e Espanha pontos estratégicos para a segurança energética da UE (World Economic Forum, 2023a).

Atualmente, o contexto é especialmente favorável para o desenvolvimento de hidrogénio verde, dado o aumento dos preços do gás natural, que torna o hidrogénio cinzento mais caro do que o verde em Portugal e Espanha.

Em Portugal, já estão em curso cinco projetos relevantes de produção de hidrogénio verde, identificados na plataforma *H2Valley* (Hydrogen Valley, 2024):

- 1) **Aveiro Green H2 Valley (Oliveira do Bairro):** eletrolisador de 100 MW com produção anual estimada de 9.116 toneladas de hidrogénio verde para uso industrial, transporte e injeção na rede de gás (início em 2027).
- 2) **Galileu Green H2 Valley (próximo de Lisboa):** hidrogénio verde a partir de 500 MW de energia solar, destinado à indústria do cimento.
- 3) **GREENH2Atlantic:** projeto liderado pela EDP e GALP, com aplicação em diversos setores.
- 4) **MadoquaPower2X (Sines Energy Hub):** produção integrada de hidrogénio e amoníaco verde com tecnologia de eletrolisador alcalino.
- 5) **Leça H2 Green Valley:** visa a produção de eletrocombustíveis (e-fuels), com aplicação direta na aviação, nomeadamente no Aeroporto Francisco Sá Carneiro. O projeto conta com o apoio da REN e da LIPOR, que asseguram a logística de transporte e produção local dos e-fuels (Smartenergy & Campos, 2023). (Figura 5)

Figura 5. Projeto Leça H2 Green Valley.



Fonte: Smartenergy & Campos, 2023.

Atualmente, todas as principais empresas de aviação mencionadas desenvolvem projetos com aeronaves movidas a células de combustível de hidrogénio, com alguns modelos de menor dimensão já em fase de testes de voo, como o caso do ZA600 da ZeroAvia, que requer poucas alterações estruturais em relação a aviões movidos a querosene. No entanto, para aeronaves de maior porte, como nos projetos da FlyZero e da Airbus, ainda não foram registados testes avançados, encontrando-se essas soluções em fases preliminares de desenvolvimento.

A nível de infraestrutura, a Airbus, através do projeto europeu GOLIAT, estuda os impactos, custos e exigências regulatórias associadas ao uso de hidrogénio líquido nos aeroportos. Já a Universal Hydrogen, que se destacou pelo desenvolvimento de tanques modulares de hidrogénio removíveis, desenhados para facilitar o abastecimento e melhorar a segurança a bordo, faliu em julho de 2024 devido à falta de financiamento, apesar dos avanços tecnológicos alcançados e do interesse da indústria. Ainda assim, como já mencionado anteriormente, a sua tecnologia poderá vir a ser aproveitada por outras empresas do setor.

## 4. Metodologia

A metodologia utilizada para este estudo fundamentou-se num processo de pesquisa misto, pois integra métodos qualitativos com métodos quantitativos (Kelle, 2006). Macdonald (2012), indica-nos que a pesquisa qualitativa é uma metodologia apoiada por referências que possibilitam a contextualização do assunto em questão, utilizando técnicas de leitura, avaliação, observação e interpretação do meio e das características para aumentar a compreensão do contexto pelo investigador.

O presente capítulo expõe os pressupostos ambientais e técnico-económicos que servirão de base para a análise comparativa no estudo de caso subsequente. Serão examinados os custos estimados para o desenvolvimento de aeronaves compatíveis com hidrogénio, os investimentos necessários para a adaptação de aeroportos a este tipo de combustível, o valor atual do LCOH e as projeções de evolução deste indicador, bem como a volatilidade histórica e expectável do preço do jet fuel.

Com o intuito de concretizar os objetivos delineados neste estudo e de responder às questões e hipóteses de investigação formuladas, foi adotada uma abordagem metodológica de natureza mista, combinando técnicas qualitativas e quantitativas para recolha e tratamento de dados. Esta estratégia permitiu não só contextualizar e caracterizar o panorama europeu relativamente ao hidrogénio verde, como também projetar possíveis cenários evolutivos até 2050, apresentados na secção dos resultados.

No que respeita à vertente qualitativa, recorreu-se à análise de conteúdo de documentos institucionais provenientes de entidades públicas e privadas. Após um processo de seleção criteriosa e triagem documental, foi possível identificar padrões e tendências emergentes nas políticas, investimentos e linhas de investigação associadas ao hidrogénio verde na Europa (Amado, 2017). A análise englobou fontes como planos governamentais, relatórios de organizações internacionais, literatura científica e cobertura mediática especializada, focando o período compreendido entre 2015 e 2025. Paralelamente, foi efetuada uma contextualização histórica, abrangendo iniciativas das décadas de 1970 e 1990, nas quais se antevia já a necessidade de transformações estruturais significativas nas infraestruturas aeroportuárias e nas aeronaves, para viabilizar a adoção do hidrogénio como vetor energético.

Quanto à componente quantitativa, procedeu-se à recolha e análise de dados secundários disponibilizados por entidades do setor da aviação, tanto a nível europeu como nacional,

através das suas plataformas digitais institucionais. Os dados extraídos, referentes ao intervalo temporal de 2015 a 2025, permitiram uma análise estatística rigorosa, orientada para a aferição da viabilidade técnico-económica da utilização do hidrogénio verde no setor da aviação.

A utilização de uma metodologia mista, ao integrar as duas abordagens, possibilitou que os dados quantitativos corroborassem e enriquecessem as evidências qualitativas, assegurando maior rigor, profundidade e fiabilidade à análise. Esta opção metodológica fortaleceu não só a solidez dos resultados alcançados, mas também a aptidão para compreender de forma mais ampla e detalhada a complexidade do fenómeno em estudo (Kelle, 2006).

Do ponto de vista económico, será realizada uma análise de investimento detalhada para a produção de hidrogénio, utilizando indicadores essenciais como o VAL, a TIR, o PR e o LCOH. Estes indicadores permitirão avaliar a viabilidade económica do combustível apenas, considerando tanto os custos de investimento (CAPEX) quanto os custos operacionais (OPEX). Esta abordagem, conforme descrito por Casarotto Filho & Kopittke (2010) será fundamental para a construção e análise do estudo de caso, proporcionando uma base sólida para decisões estratégicas sobre a implementação e sustentabilidade do projeto.

#### **4.1. Análise técnica**

A análise de viabilidade técnica para a substituição de combustíveis fósseis por hidrogénio verde em aeronaves comerciais precisa ser abrangente, considerar atributos técnicos de motorização das aeronaves, capacidade de armazenamento do combustível e a infraestrutura de abastecimento.

##### **4.1.1 Compatibilidade tecnológica das aeronaves**

Desde 1937, com as primeiras turbinas a gás de hidrogénio, têm sido realizados diversos estudos sobre a aplicação do hidrogénio na aviação. A crise do petróleo na década de 1970 impulsionou projetos emblemáticos, como os da Lockheed (Brewer *et al.*, 1975; 1981). Nos anos 1990, o projeto Cryoplane (Faaß, 2001) analisou a adaptação de aeronaves para hidrogénio líquido, mas os custos e a infraestrutura limitaram o progresso. Mais recentemente, iniciativas como o Pacto Ecológico Europeu e projetos como o FlyZero (Town *et al.*, 2022), Airbus Zeroe (Airbus, 2023) e os voos experimentais da ZeroAvia (2023a; 2023b) têm revitalizado o interesse por tecnologias baseadas em células de combustível e combustão de hidrogénio. Tiwari *et al.*, (2024) fizeram um estudo comparativo de três décadas diferentes com as alterações nas aeronaves referidas na Tabela 8.

**Tabela 8.** Conceitos Seleccionados de Vários Projetos de Viabilidade.

| Projeto                      | Categoria               | Configuração                                                                                                                                                 | Capacidade e alcance                |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Lockheed<br>(década de 1970) | Regional                | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan;<br>Tanque à frente e atrás da cabine de passageiros.                                                           | 135 pessoas<br>1500 milhas náuticas |
|                              | Curta a Média Distância | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan;<br>Tanque à frente e atrás da cabine de passageiros.                                                           | 200 pessoas<br>3000 milhas náuticas |
|                              | Média a Longa Distância | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan;<br>Tanque à frente e atrás da cabine de passageiros.                                                           | 400 pessoas<br>5500 milhas náuticas |
| Cryoplane<br>(década 2000)   | Regional                | Configuração Convencional;<br>Motor com Turboélice e Turbofan;<br>Tanque por cima da cabine de passageiros.                                                  | 70 pessoas<br>2000 milhas náuticas  |
|                              | Curta a Média Distância | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan;<br>Tanque por cima da cabine e atrás da cabine de passageiros.                                                 | 185 pessoas<br>4000 milhas náuticas |
|                              | Média a Longa Distância | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan;<br>Tanque à frente e atrás da cabine de passageiros.                                                           | 380 pessoas<br>8500 milhas náuticas |
| Flyzero<br>(2020)            | Regional                | Configuração Convencional;<br>Motor a Hélice de Célula de Combustível;<br>Tanque atrás da cabine de passageiros.                                             | 75 pessoas<br>800 milhas náuticas   |
|                              | Curta a Média Distância | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan;<br>Fuselagem Canard (asas mais pequenas a frente das asas do avião);<br>Tanque atrás da cabine de passageiros. | 179 pessoas<br>2400 milhas náuticas |
|                              | Média a Longa Distância | Configuração Convencional;<br>Motor Turbofan nas Asas;<br>Tanque atrás da cabine de passageiros.                                                             | 279 pessoas<br>5750 milhas náuticas |

**Fonte:** Elaborado pelo autor, adaptado de Tiwari *et al.*, (2024)

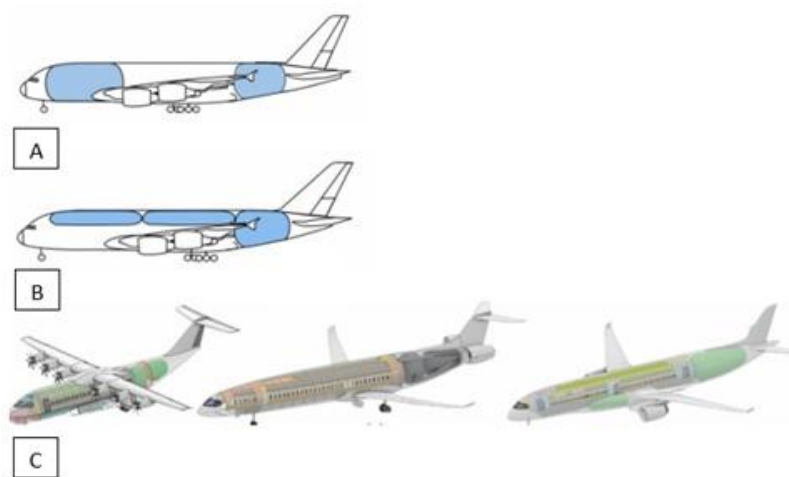
Na Tabela 8 verifica-se que estudos da Lockheed e da Flyzero assemelham-se relativamente ao armazenamento do tanque de combustível, pois no projeto Cryoplane quer na opção regional quer na opção curta a média distância, o tanque era colocado por cima da cabine de passageiros. Estudos revelaram que esta opção torna os aviões mais pesados, fazendo com que sejam menos eficientes. Na opção mais recente da FlyZero é possível verificar o uso de células de combustível de hidrogénio e na estrutura dos aviões na opção curta e média distância a fuselagem Canard que são umas asas mais pequenas que ficam à frente da cabine de passageiros. Todos os estudos concluíram que as aeronaves a hidrogénio seriam tecnologicamente viáveis no seu cronograma de projeto (Tiwari *et al.*, 2024).

O uso de hidrogénio exige novos projetos de propulsão, sistemas de combustível e

infraestrutura aeroportuária, com investimentos significativos necessários. Portanto, o avião de tubo e asas modificado para o hidrogénio está previsto entrar em serviço entre 2030 e 2035, enquanto conceitos mais inovadores e mais eficientes são esperados para depois de 2040 (Tiwari et al., 2024).

Tanques integrais são mais eficientes e um tanque único, localizado na parte traseira da fuselagem e estendendo-se por toda a secção transversal com uma forma cilíndrica, proporciona a máxima eficiência tanto em termos de peso (gravimétrica) como de volume (volumétrica).

**Figura 6.** Projetos e estudos de aeronaves na aviação



*Nota:* A) estudo Lockheed; B) projeto Cryoplane; C) Projetos da FlyZero. **Fonte:** Tiwari *et al.*, 2024

O hidrogénio criogénico, armazenado a  $-253,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , destaca-se pela elevada eficiência gravimétrica ( $>60\%$ ), sendo ideal para aeronaves de maior porte (IEA, 2022a). A ventilação controlada dos tanques pode reduzir o seu peso em até  $34\%$ , mas exige novas normas de certificação (Calabrese *et al.*, 2024). Para garantir a segurança e minimizar fugas, os tanques requerem materiais resistentes e leves, como ligas de alumínio e titânio (Osman *et al.*, 2024; Hematpu *et al.*, 2023), e isolamento com materiais como espumas, aerogéis ou multicamadas (Calabrese *et al.*, 2024; IEA, 2022a).

Antes da combustão, o  $\text{LH}_2$  deve ser aquecido e convertido em gás com o apoio de permutadores de calor, que utilizam energia térmica do sistema, como os gases de escape (IEA, 2022b). A temperatura mínima recomendada à entrada do combustor é de  $-123,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e a pressão deve ser superior à da câmara para garantir atomização e mistura adequadas (Hematpu *et al.*, 2023). Estas adaptações podem aumentar o empuxo e reduzir ligeiramente

o consumo específico face ao querosene (IEA, 2022b; Osman *et al.*, 2024).

Já as células de combustível são promissoras para voos curtos e regionais, apresentando maior eficiência, menor ruído e maior fiabilidade, embora persistam desafios relacionados com a gestão térmica e a integração de sistemas (Calabrese *et al.*, 2024).

Desde 2015, os avanços na potência específica das células de combustível permitiram o desenvolvimento de aeronaves regionais a hidrogénio, como os projetos da ZeroAvia e da Airbus (Calabrese *et al.*, 2024). Apesar do elevado potencial, o hidrogénio levanta preocupações quanto à inflamabilidade, fragilização de materiais e deteção de fugas. Embora tenha uma faixa de inflamabilidade mais ampla e temperatura de autoignição mais elevada do que o querosene, é mais suscetível à ignição. No entanto, estudos indicam que, com sistemas de armazenamento e deteção adequados, o hidrogénio pode ser utilizado com níveis de segurança comparáveis aos do querosene (Fan *et al.*, 2021; Hematpu *et al.*, 2023).

Sobre a configuração dos aviões a hidrogénio, estes serão obrigados a transportar um volume maior de combustível comparativamente ao *jetfuel*, pois embora o hidrogénio tenha uma densidade gravimétrica de alta energia, possui uma baixa densidade volumétrica (Steergroup, 2024). Ou seja, a densidade gravimétrica do hidrogénio é de 120 MJ/kg e da querosene é 43 MJ/kg, significa que basta aproximadamente 1/3 da quantidade de hidrogénio para produzir a mesma energia que a querosene. Já a densidade volumétrica é de 71 kg/m<sup>3</sup> para o hidrogénio e para o *jetfuel* é 804 kg/m<sup>3</sup>. Considerando que 1 m<sup>3</sup> são 1000 litros, então a densidade volumétrica em kg/L do hidrogénio será 0,071 kg/L (71/1000) e do *jetfuel* é 0,804 kg/L (804/1000) consideremos a seguinte Equação (4.1):

$$\text{Energia (MJ/L)} = \text{Densidade de Energia (MJ/kg)} \times \text{Densidade Volumétrica (kg/L)} \quad (4.1)$$

|                                                                                                                   |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\text{Energia (H}_2\text{)} [\text{MJ/L}] = 120 \text{ MJ/kg} \times 0,071 \text{ kg/L} = 8,52 \text{ MJ/L}$     | <b>Hidrogénio</b> |
| $\text{Energia}_{\text{jetfuel}} [\text{MJ/L}] = 43 \text{ MJ/kg} \times 0,804 \text{ kg/l} = 34,57 \text{ MJ/L}$ | <b>Jetfuel</b>    |

A densidade de energia por litro de hidrogénio líquido é apenas 25% do querosene, isto significa que é necessário aproximadamente 4 vezes o volume de armazenamento para o líquido hidrogénio para produzir a mesma produção de energia. O armazenamento do líquido de hidrogénio é um desafio pois ocupa 4 vezes mais que os tanques de armazenamento do querosene (Steergroup, 2024). Vários estudos foram feitos por causa da configuração estrutural do avião e esses estudos indicam que inicialmente os aviões

convencionais de tubo e asa, com algumas alterações na fuselagem e nos componentes, são a configuração mais promissora para ser usado o hidrogénio como combustível (Tiwari *et al.*, 2024). Ou seja, deverá usar-se aviões de tubo e asa com alterações na estrutura e componentes para o uso de hidrogénio.

A certificação de aeronaves movidas a hidrogénio ainda está em desenvolvimento e deverá incluir novos critérios, nomeadamente para sistemas criogénicos e cenários de fuga (Calabrese *et al.*, 2024). A introdução do hidrogénio na aviação deverá ocorrer em três fases: entre 2025-2030, com demonstrações técnicas e certificação; entre 2030-2040, com otimização e entrada de aeronaves regionais em operação; e entre 2040-2050, com o alargamento à aviação de médio e longo curso e adaptação plena das infraestruturas aeroportuárias (IATA, 2024a; Tiwari *et al.*, 2024). Durante esta transição, prevê-se o uso de aeronaves híbridas que combinem hidrogénio e querosene, como solução intermédia rumo à neutralidade carbónica até 2050 (IATA, 2024a; Tiwari *et al.*, 2024).

#### **4.1.2 Infraestrutura de abastecimento**

O abastecimento das aeronaves com H<sub>2</sub> verde é garantido, dentro das necessidades de cada rota aérea, através de duas opções de acesso aos combustíveis: a) o combustível ser adquirido por unidades produtivas dispersas e ter o transporte até a uma unidade de armazenamento do mesmo instalada no aeroporto; ou b) a usina de produção de H<sub>2</sub> verde estar instalada nas imediações ou no próprio terreno do aeroporto. Para cada uma das opções, uma infraestrutura de armazenamento, distribuição, transporte é necessária. Para manter o objetivo do estudo de caso sob o ponto de vista da companhia aérea, será considerada a opção da usina de hidrogénio estar instalada próxima ao aeroporto.

Para o armazenamento de hidrogénio estima-se que será necessário um tanque com diâmetro de 25 metros e capacidade de 4700m<sup>3</sup>, em que exigirá um espaço terrestre no aeroporto de 900 m<sup>2</sup> (Braun & Classen, 2023). Os tanques têm de ser isolados para manter as temperaturas criogénicas e será gasta uma grande quantidade de energia neste processo.

A Flyzero (2022) no estudo HYDROGEN INFRASTRUCTURE AND OPERATIONS, define o tipo de aeroporto conforme o número de passageiros e faz uma projeção para o ano de 2035 e 2050 e qual a quantidade especulada para a produção de hidrogénio, o tamanho necessário para uma central, entre outros fatores, conforme a Tabela 9.

**Tabela 9.** Tamanho do aeroporto com uma central de hidrogénio no próprio aeroporto, projeção para 2035 e 2050.

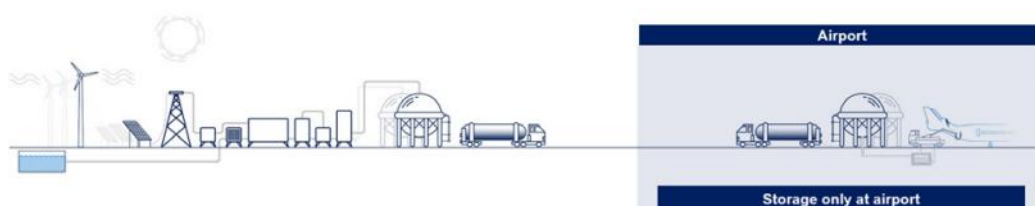
| Parâmetro                                            | Aeroporto Pequeno |        | Aeroporto Médio |         | Aeroporto Grande |         |
|------------------------------------------------------|-------------------|--------|-----------------|---------|------------------|---------|
|                                                      | 2035              | 2050   | 2035            | 2050    | 2035             | 2050    |
| Passageiros (M/ano)                                  | 7,5               | 10     | 35              | 50      | 110              | 135     |
| Procura média diária LH <sub>2</sub> (M/l)           | 0,1               | 0,7    | 0,6             | 6,5     | 1,5              | 22      |
| Potência do eletrolisador necessária (MW)            | 30                | 150    | 125             | 1.500   | 300              | 4.250   |
| Necessidade de água para eletrólise (l/h)            | 5.000             | 25.000 | 22.500          | 250.000 | 50.000           | 725.000 |
| Potência de liquefação necessária (MW)               | 5                 | 20     | 20              | 200     | 50               | 650     |
| Armazenamento de LH <sub>2</sub> (milhões de litros) | 0,5               | 2,5    | 1,5             | 16      | 3,5              | 50      |
| Espaço necessário (m <sup>2</sup> )                  | 4.000             | 18.000 | 13.000          | 130.000 | 30.000           | 325.000 |

Fonte: elaborado pelo autor, adaptado de Flyzero (2022)

#### 4.1.2.1 H<sub>2</sub> ser produzido fora do aeroporto

O hidrogénio ser produzido e liquefeito fora do aeroporto, sendo posteriormente transportado por camiões tanque (*bombers*) ou pode ser transportado, de forma gasosa, por gasodutos (pipelines) e é liquefeito e armazenado no aeroporto, tal qual ilustrado na Figura 7.

**Figura 7.** Produção externa de hidrogénio com transporte de camiões para aeroporto.



Fonte: Flyzero, 2022.

#### 4.1.2.2 H<sub>2</sub> ser produzido nas imediações do aeroporto

O hidrogénio ser produzido e liquefeito no local ou nas vizinhanças do aeroporto como mostrado pela Figura 8.

**Figura 8.** Hidrogénio produzido e liquefeito no aeroporto ou imediações.



**Fonte:** Flyzero, 2022.

A utilização do hidrogénio como combustível na aviação levanta desafios logísticos e operacionais, nomeadamente em termos de tempo de resposta comparável ao querosene e das exigências de segurança durante o reabastecimento em que a zona de segurança poderá variar entre 8 a 20 metros (Braun & Classen, 2023).

Caso o hidrogénio chegue ao aeroporto no estado gasoso, será necessária uma infraestrutura adicional para a sua liquefação, bem como oleodutos para o transporte até à zona de abastecimento (Flyzero, 2022). Com o aumento do consumo previsto, estima-se que a solução mais viável para o transporte de grandes volumes de hidrogénio gasoso será através de tubagens dedicadas (Flyzero, 2022; Braun & Classen, 2023).

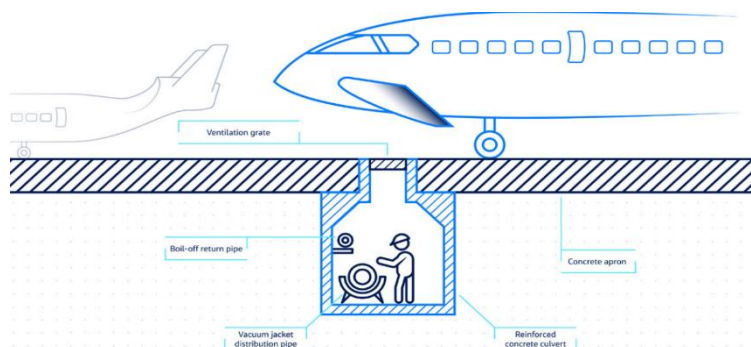
Nos cenários em que o hidrogénio é produzido localmente no aeroporto, será necessário implementar infraestruturas completas de produção, liquefação, armazenamento e distribuição, bem como equipamentos específicos para o abastecimento das aeronaves (Braun & Classen, 2023).

De acordo com o relatório Flyzero (2022), existem dois métodos principais para o abastecimento de aeronaves com hidrogénio líquido: através de bowzers (camiões-tanque móveis) ou por um sistema hidrante (rede subterrânea). O método com bowzers apresenta menor custo inicial e menos alterações estruturais, sendo mais indicado numa fase inicial. Já o sistema hidrante, apesar do investimento elevado e da necessidade de infraestrutura complexa, será mais eficiente em aeroportos com elevado tráfego de aeronaves a hidrogénio, utilizando gasodutos criogénicos semelhantes aos atuais sistemas de abastecimento de querosene (Flyzero, 2022).

Um dos sistemas de hidrantes poderia incluir a construção de um bueiro subterrâneo, como na Figura 9, ao longo do qual seria instalado um tubo com uma camisa de vácuo. O topo desse bueiro ficaria aberto para evitar a possibilidade de acúmulo de gás no caso de

vazamento de hidrogénio. Este método de abastecimento para além dos custos iria fazer com que o aeroporto deixasse de estar operacional (Flyzero, 2022).

**Figura 9.** Sistema hidrante para hidrogénio.



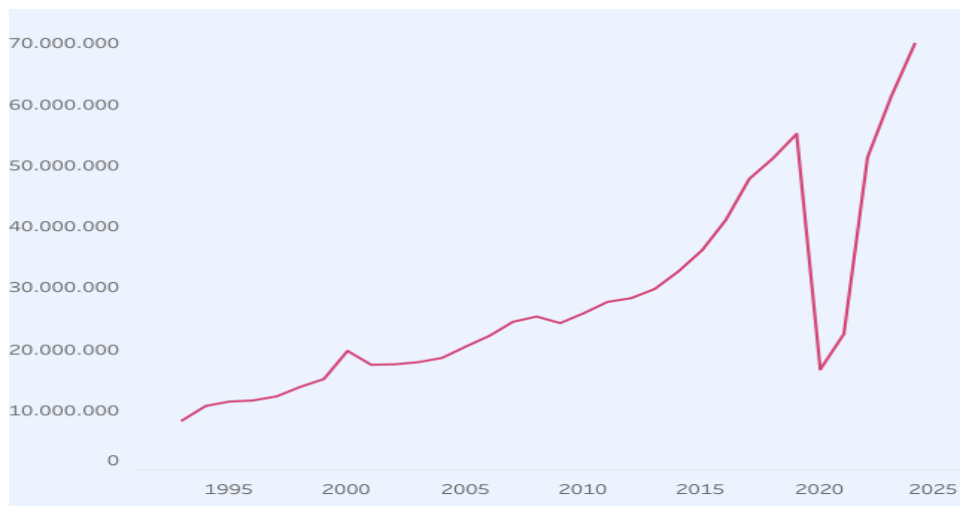
**Fonte:** Flyzero, 2022

## 4.2 Análise ambiental

A aviação civil representa atualmente cerca de 2,5% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo também responsável por outros impactos ambientais relevantes, como a emissão de óxidos de azoto, vapor de água em altitude e partículas finas, que contribuem para o efeito estufa e alterações climáticas (EASA, 2024; Clarke *et al.*, 2022). O contínuo crescimento da procura por transporte aéreo tem agravado estes impactos, sobretudo se não forem implementadas medidas eficazes de mitigação por parte do setor.

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento acentuado do tráfego aéreo a nível mundial, tendência também refletida em Portugal. Em 2024, o país ocupou o 7.º lugar no ranking da União Europeia com maior número de passageiros aeroportuários (INE, 2025; Pordata, 2025), conforme demonstrado na Figura 10, que ilustra a evolução do número total de passageiros (nacionais e internacionais) em aeroportos portugueses entre 1993 e 2025.

**Figura 10.** Número de passageiros (internacionais e nacionais) em aeroportos portugueses, entre 1993 e 2025.

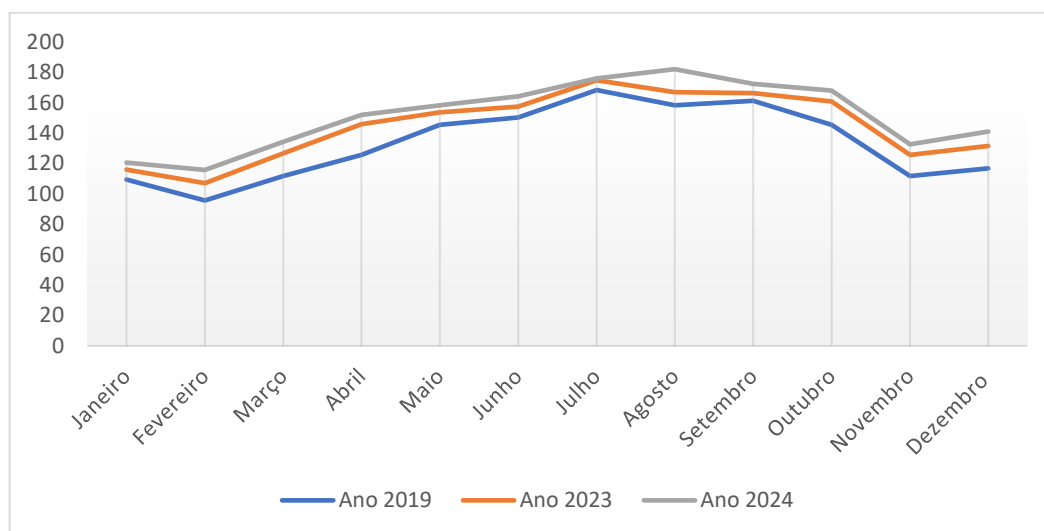


Fonte: Pordata (2025).

A análise da Figura 10 evidencia um crescimento contínuo da atividade aeroportuária em Portugal, ultrapassando os 70 milhões de passageiros em 2024, excluindo o período de queda abrupta registada durante a pandemia de COVID-19. O Aeroporto Francisco Sá Carneiro, no Porto, acompanhou essa tendência, atingindo mais de 15 milhões de passageiros em 2023 (PortoAirport, 2025).

Este crescimento sustentado do tráfego aéreo tem implicações diretas no consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, nas emissões de gases com efeito de estufa (GEE). De acordo com o INE (2025), o tráfego aéreo em Portugal aumentou significativamente entre 2023 e 2024, o que se traduziu num acréscimo do consumo de Jetfuel, como ilustrado na Figura 11.

**Figura 11.** Consumo de Jetfuel pela aviação em Portugal nos anos de 2019, 2023 e 2024, medido em kilotoneladas (kt).



**Fonte:** DGEG (2025a, b).

Conforme se observa na Figura 11, em 2023 consumo de Jetfuel ultrapassou os níveis pré-pandemia de 2019, e em 2024 atingiu um novo máximo histórico. Apesar de medidas como a renovação de frotas e otimização operacional, a redução de emissões continua limitada sem uma mudança estrutural nos combustíveis utilizados.

O combustível de aviação, conhecido como querosene, é utilizado em todas as aeronaves com motores a turbina e é derivado do petróleo bruto, representando cerca de 6% da produção mundial das refinarias (BP, 2022). O seu fabrico envolve processos complexos como dessalinização, destilação, remoção de impurezas e hidrocraqueamento, sendo posteriormente aditivado para garantir melhor desempenho e estabilidade. Os principais tipos utilizados são o Jet A e o Jet A-1, diferenciando-se sobretudo pelo ponto de congelamento, sendo que o Jet A-1 congela a  $-47^{\circ}\text{C}$  e o Jet A a  $-40^{\circ}\text{C}$  (BP, 2022).

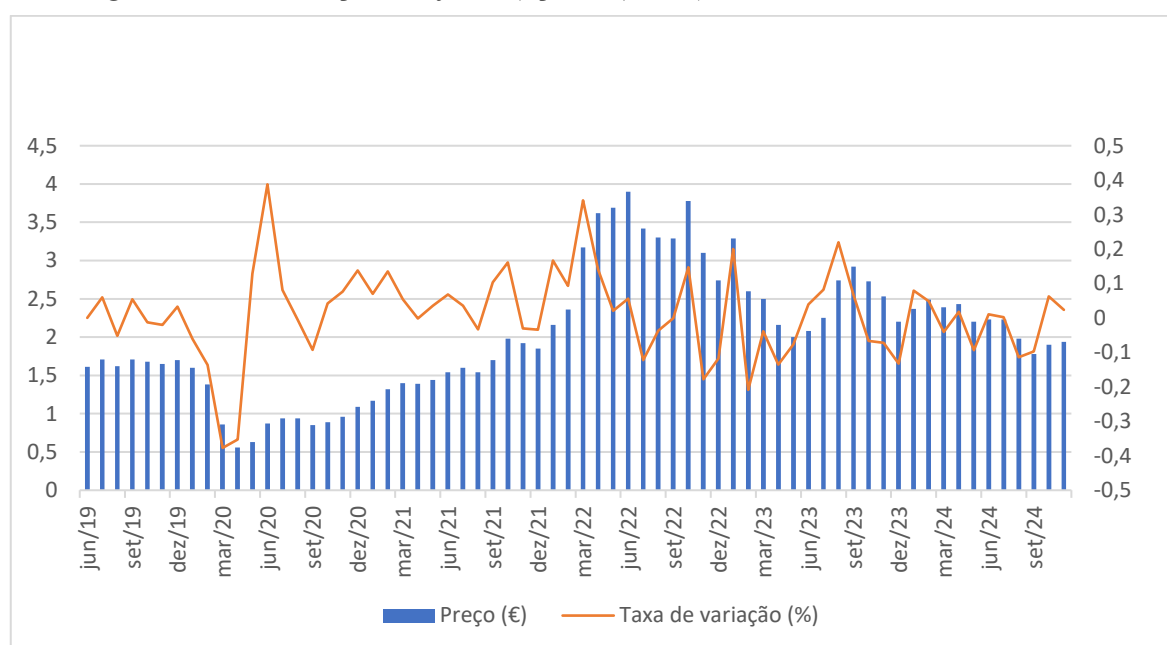
Neste cenário, os SAFs oferecem uma redução significativa das emissões no ciclo de vida, embora não as eliminem totalmente. A propulsão elétrica é viável para voos curtos, mas enfrenta restrições ligadas à densidade energética das baterias. Já o hidrogénio verde, produzido com energia renovável, destaca-se como solução de descarbonização de longo prazo. Quando usado em células de combustível, emite apenas vapor de água, eliminando  $\text{CO}_2$  direto. No entanto, a sua utilização em motores a combustão pode gerar  $\text{NO}_x$  residuais.

A eficácia ambiental do hidrogénio dependerá da origem da eletricidade usada na sua

produção. Se for proveniente de fontes fósseis, os benefícios poderão ser anulados, a menos que se recorra a tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

Para além das preocupações ambientais associadas à queima de combustíveis fósseis na aviação, é importante destacar a elevada volatilidade do preço do Jetfuel, que constitui um fator de risco económico significativo para o setor. A Figura 12 apresenta a evolução mensal do preço do Jetfuel entre junho de 2019 e novembro de 2024, evidenciando fortes oscilações provocadas por fatores geopolíticos, flutuações na procura global e choques externos, como a pandemia de COVID-19 e a guerra na Ucrânia.

**Figura 12.** Evolução do preço do Jetfuel (€ por litro) entre junho de 2019 e novembro de 2024.



**Fonte:** Dados compilados pelo autor (DGEG, 2025a, b; Indexmundi, 2024)

Observa-se, por exemplo, uma queda abrupta de cerca de 65% no preço do Jetfuel entre janeiro e abril de 2020, coincidindo com a paralisação do tráfego aéreo devido à pandemia. No entanto, entre janeiro de 2021 e março de 2022 registou-se uma recuperação acelerada, com aumentos mensais sucessivos que culminaram num pico de 3,90 €/L em junho de 2022, mais do que o dobro do valor registado no período pré-pandemia. Esta instabilidade prolongada evidencia a dependência do setor da aviação dos mercados internacionais de combustíveis fósseis, cuja imprevisibilidade compromete a sustentabilidade económica a longo prazo.

A substituição do Jetfuel por fontes energéticas mais estáveis e renováveis, como o

hidrogénio verde, pode representar não apenas uma estratégia ambiental, mas também uma resposta eficaz à volatilidade do mercado. Ao garantir preços de fornecimento contratualizados a médio e longo prazo, é possível mitigar os impactos financeiros de choques externos e assegurar maior previsibilidade na estrutura de custos operacionais das companhias aéreas. O preço do Jetfuel tem demonstrado alguma inconstância nos últimos tempos, noticiado várias vezes na comunicação social (ECO, 2022; Petronilho, 2022).

A metodologia de cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> considera a estimativa das reduções obtidas com a substituição de combustíveis fósseis por hidrogénio verde e biocombustíveis (SAF). Esta abordagem é essencial para avaliar os benefícios ambientais destas alternativas, com implicações diretas na sustentabilidade e viabilidade económica da transição energética. O cálculo depende de variáveis como o tipo de aeronave, distância do voo, consumo e natureza do combustível utilizado (IPCC, 2006), sendo aplicadas duas metodologias reconhecidas para quantificar as emissões associadas à aviação.

#### 4.2.1 Metodologia de Cálculo de Emissão de CO<sub>2</sub> ao usar *Jetfuel*

##### 4.2.1.1 Metodologia IPCC (2006)

Segundo o IPCC (2006), o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> num voo requer dados como o consumo horário de combustível, disponível nos manuais das aeronaves (ex. Airbus A300-600 – AIRBUS, 2009), e o tempo de voo de cruzeiro, determinado pela Equação (4.2).

$$\text{Tempo de Voo cruzeiro} = \frac{\text{Distância}}{\text{Velocidade de Cruzeiro}} \quad (4.2)$$

A distância é medida em quilómetros ou milhas náuticas entre dois aeroportos, e a velocidade de cruzeiro, expressa em nós, corresponde à velocidade mantida na fase mais longa do voo, podendo ser consultada em manuais técnicos ou plataformas de aviação especializadas.

O consumo total de combustível pode ser calculado multiplicando o consumo por hora pelo tempo de voo, Equação (4.3):

$$\text{Consumo Total de Combustível} = \text{Consumo por Hora} \times \text{Tempo de Voo} \quad (4.3)$$

A partir desse valor, obtêm-se as emissões de CO<sub>2</sub> através da Equação (4.4):

$$\text{Emissões de CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Consumo Total de Combustível} \times \text{Fator de Emissão} \quad (4.4)$$

- *Fator de Emissão* – quantidade de CO<sub>2</sub> (kg) existentes num galão de combustível de aviação ou em 1 litro de combustível. O valor de referência é 3,16 kg CO<sub>2</sub>/kg para Jet-A e para AvGas ou Jet-B o valor é 3,10 kg CO<sub>2</sub>/kg de combustível (ICAO, 2018).

Esta metodologia, recomendada pelo IPCC (2006), é simplificada e geralmente aplicada a aeronaves de pequeno porte ou quando não há dados detalhados disponíveis. Contudo, apresenta limitações, pois considera apenas a fase de cruzeiro e pode não refletir com exatidão as emissões reais de um voo completo.

#### 4.2.1.2 Metodologia ICAO (2023)

Esta metodologia, proposta por ICAO (2023) é mais detalhada, pois permite saber a emissão de CO<sub>2</sub> por passageiro num voo e baseia-se também em parte na metodologia do IPCC (2006) (cálculo do consumo total de combustível). A Equação (4.5) para o cálculo é a seguinte:

$$\text{CO}_2 \text{ por pessoa} = 3,16 \times ("Consumo total de combustível" \times "Fator passageiro - carga") / (n^\circ \text{de assentos classe económica} \times \text{fator ocupação de passageiros}) \quad (4.5)$$

- *3,16* – Trata-se de uma constante reconhecida internacionalmente, utilizada como fator de emissão de referência para o combustível de aviação. De acordo com este coeficiente, a combustão de uma tonelada de querosene (Jet A1) origina, em média, cerca de 3,16 toneladas de CO<sub>2</sub>;
- *Consumo total de combustível* – baseia-se no que fora descrito para o cálculo da metodologia 1.
- *Fator passageiro-carga* – Fator que ajusta a proporção do combustível usado para transportar passageiros em comparação com a carga. Pode variar dependendo do tipo de voo, da aeronave utilizada e da proporção de carga em relação aos passageiros. É possível obter este dado através dos dados do fabricante, dados operacionais das companhias aéreas, entre outros.
- *Número (n°) de assentos da classe económica* – calcular o número de assentos descrito nos dados do fabricante;
- *Fator de ocupação dos passageiros* – é a percentagem dos assentos ocupados durante o voo;

O cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> para bilhetes do tipo “Classe Premium”, com distâncias iguais ou superiores a 3000km, é obtido pela Equação (4.6). Os passageiros em classe premium emitem até duas vezes mais CO<sub>2</sub> do que os da classe económica em voos superiores a 3.000 km, devido ao maior espaço, peso adicional das cabines e maior volume de bagagem (ICAO, 2023).

$$CO_2 \text{ pessoa premium} = 2 \times \text{emissões de } CO_2 \text{ pessoa económica} \quad (4.6)$$

Para facilitar a estimativa das emissões por passageiro, a ICAO desenvolveu uma calculadora virtual baseada em dados de aeronaves, rotas e estatísticas de transporte (ICAO, 2019b). Esta ferramenta apoia programas de compensação de carbono e sensibiliza os viajantes para o impacto ambiental dos seus voos.

Apesar de o uso de hidrogénio verde eliminar completamente as emissões de carbono, a transição plena para este combustível exigirá ainda algumas décadas. Até lá, os cálculos atuais continuam essenciais para monitorizar e reduzir as emissões no setor da aviação (IEA, 2019).

#### 4.2.2 Metodologia de Cálculo de Emissão de CO<sub>2</sub> ao usar SAF

Os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) são fundamentais para a descarbonização do setor, podendo representar mais de 60% da redução necessária para alcançar a neutralidade carbónica até 2050 (IATA, 2025). Para garantir transparência e evitar dupla contabilização, a IATA desenvolveu uma metodologia padronizada de reporte do uso de SAF, baseada na compra direta por parte das companhias aéreas. Esta abordagem atribui a redução de emissões à empresa que adquire e utiliza o combustível, desde que devidamente comprovado por documentação (faturas, relatórios de sustentabilidade, auditorias). A metodologia não substitui sistemas regulatórios como o CORSIA ou o RCLE-EU, mas complementa-os, oferecendo um modelo compatível para relatórios voluntários e inventários de emissões (IATA, 2025). A equação para o cálculo é a seguinte:

$$RE_y = EF \times \left[ \sum m_{SAF_y} \left( 1 - \frac{LCA(SAF)}{LCA(CAF)} \right) \right] \quad (4.7)$$

- $RE_y$  - redução de emissões no ano  $y$ ;
- $EF$  - fator de emissão (TTW é 3,16kgCO<sub>2</sub>/kg ou WTW é 3,84kgCO<sub>2</sub>e/kg);
- $m_{SAF_y}$  - massa total de SAF adquirido;

- *LCA (SAF)* - valor do ciclo de vida SAF (por norma é 16,7gCO<sub>2</sub>e/MJ);
- *LCA (CAF)* - valor do ciclo de vida do combustível fóssil (valor fixo 89gCO<sub>2</sub>e/MJ)

No caso do fator de emissão, assumimos TTW (*Tank-to-Wake*) quando queremos considerar só a queima do combustível, enquanto o WTW (*Well-to-Wake*) quando queremos ter o resultado de emissões da produção, transporte até à queima de combustível no avião (ciclo de vida).

Para as empresas permite somar as emissões evitadas ao longo do tempo ou por frota, colocando em relatório, por exemplo de sustentabilidade. As companhias aéreas devem reportar as emissões provenientes do combustível convencional, as emissões biogénicas do SAF e a redução absoluta de emissões obtida com a sua utilização.

### 4.3 Análise económica

A propulsão de hidrogénio para aviões é uma das opções para a descarbonização do setor, reduzindo substancialmente o impacto climático da indústria da aviação. Contudo, os estudos e projetos de desenvolvimento dessa tecnologia em escala comercial são ainda muito recentes (Hoelzen *et al.*, 2022). Os custos económicos precisam ser projetados e analisados para que uma decisão sobre a viabilidade dessa tecnologia seja alcançada.

#### 4.3.1 Custos de produção ou adaptação das aeronaves

Atualmente, o custo associado ao desenvolvimento de novas aeronaves a hidrogénio aparece pouco divulgado devido a serem projetos confidenciais e que dará uma competitividade no mercado aéreo nos próximos anos (Steergroup, 2024). Brewer (1991) fez um estudo de simulação comparativa de preços entre um avião movido a Jetfuel e hidrogénio, que aparece na Tabela 10.

**Tabela 10.** Custo em dólares (\$10<sup>6</sup>) de desenvolvimento e Produção – Aviões de passageiros JetA e LH<sub>2</sub> (5500 milhas náuticas, 400 passageiros)

| <b>Custos</b>                                    |                      | <b>JET A</b>  | <b>LH<sub>2</sub></b> |
|--------------------------------------------------|----------------------|---------------|-----------------------|
| <b>Desenvolvimento</b>                           | Fuselagem            | 692,5         | 669,5                 |
|                                                  | Motor                | 416,6         | 455,0                 |
|                                                  | <b>Total</b>         | <b>1109,1</b> | <b>1124,0</b>         |
| <b>Produção</b>                                  | Fuselagem            | 19,86         | 20,10                 |
|                                                  | Motor                | 3,29          | 3,50                  |
|                                                  | Sistemas Eletrónicos | 0,50          | 0,50                  |
|                                                  | Amortização de P&D*  | 2,81          | 2,82                  |
|                                                  | <b>Total</b>         | <b>26,46</b>  | <b>26,92</b>          |
| <b>*baseado em 350 aeronaves e 2000 motores.</b> |                      |               |                       |

**Fonte:** elaborado pelo autor, adaptada de Brewer (1991)

A tabela tem valores referentes para a década de 1990, os custos totais de desenvolvimento e produção são semelhantes quer nos aviões a hidrogénio quer a jetfuel mas com uma pequena diferença a favor do Jet A, principalmente por causa do menor custo de desenvolvimento dos motores.

O estudo atual da Clean Sky 2 relacionado a aviação a hidrogénio prevê que o gasto de capital para aeronaves movidas a hidrogénio será maior do que para aeronaves convencionais, que se deve aos custos da estrutura do tanque de LH<sub>2</sub> integrado na fuselagem, à complexidade aumentada da distribuição de combustível, aos custos elevados com a propulsão e ao tamanho maior das aeronaves (Air Transport Action Group, 2021). Já os custos de manutenção podem aumentar até 47% devido ao tamanho maior da estrutura e aos tanques de LH<sub>2</sub>, que irão exigir mais inspeções, especialmente nos primeiros anos após a introdução das aeronaves a hidrogénio, sendo que a longo prazo, os custos de manutenção podem diminuir com o avanço tecnológico e estudos científicos.

Steergroup (2024) indica no relatório que a Airbus referiu que o custo de desenvolvimento da primeira geração de aviões a hidrogénio demoraria cerca de 10 anos e teria uma estimativa mínima de 12,5 mil milhões de euros. Já as estimativas da Clean Aviation (2022) proveem um custo de desenvolvimento mínimo de cerca de 15 mil milhões de euros em 10 anos.

#### **4.3.2 Custos operacionais do sistema de abastecimento**

A utilização de hidrogénio líquido ainda não é real na aviação, mas alguns relatórios, como o relatório da Flyzero (2022), referem os custos estimados para as infraestruturas. No

relatório referido, os autores encontram um valor mediano dos custos agregados de 2030 a 2050, posteriormente colocam um limite superior e um limite inferior dos possíveis custos. As variáveis são: tamanho do aeroporto (pequeno, médio ou grande); o tipo de abastecimento (bowers ou sistema hidrante) e os três cenários de aeroportos (hidrogénio líquido entregue no aeroporto; hidrogénio gasoso entregue por gasodutos e por último, o hidrogénio produzido no aeroporto).

Na Tabela 11 e na Tabela 12, vem descrito os custos agregados de 2030 a 2050, associados às alterações das infraestruturas nos aeroportos. Em ambas as tabelas as variáveis são o tamanho do aeroporto (que pode ser pequeno, médio ou grande) e se a produção de hidrogénio é feita no próprio aeroporto ou fora, e se for fora, se o transporte é feito por camiões tanque de abastecimento ou através de gasodutos.

A diferença entre as tabelas está relacionada com a forma como é abastecido o tanque dos aviões. Na Tabela 11 é o custo agregado estimado ao usar bowers e na Tabela 12 é o custo agregado estimado ao usar o sistema de hidrante.

**Tabela 11.** Custo estimado agregados (M€) de 2030 a 2050, uso de bowers para abastecer os aviões.

| Tamanho<br>do aeroporto | Hidrogénio líquido<br>entregue no aeroporto |               | Hidrogénio gasoso<br>entregue por gasodutos no<br>aeroporto |               | Hidrogénio produzido<br>no aeroporto |               |
|-------------------------|---------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
|                         | <i>Custo Médio</i>                          | <i>+ ou –</i> | <i>Custo Médio</i>                                          | <i>+ ou –</i> | <i>Custo Médio</i>                   | <i>+ ou –</i> |
| <b>Grande</b>           | 383,5                                       | 265,5         | 737,50                                                      | 590           | 2950                                 | 1534          |
| <b>Médio</b>            | 118                                         | 70,8          | 236                                                         | 177           | 1003                                 | 472           |
| <b>Pequeno</b>          | 23,6                                        | 18,1          | 29,5                                                        | 29,5          | 118                                  | 59            |

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de Flyzero, 2022.

**Tabela 12.** Custo estimado agregados (M€) de 2030 a 2050, assumindo o uso de sistema hidrante para abastecimento.

| Tamanho<br>do aeroporto | Hidrogénio líquido<br>entregue no aeroporto |               | Hidrogénio gasoso<br>entregue por gasodutos no<br>aeroporto |               | Hidrogénio produzido<br>no aeroporto |               |
|-------------------------|---------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------|
|                         | <i>Custo Médio</i>                          | <i>+ ou –</i> | <i>Custo Médio</i>                                          | <i>+ ou –</i> | <i>Custo Médio</i>                   | <i>+ ou –</i> |
| <b>Grande</b>           | 619,5                                       | 295           | 1003                                                        | 619,5         | 3245                                 | 1534          |
| <b>Médio</b>            | 206,5                                       | 88,5          | 324,5                                                       | 206,5         | 1091,5                               | 501,5         |
| <b>Pequeno</b>          | 47,2                                        | 17,7          | 59                                                          | 29,5          | 12,98                                | 50            |

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de Flyzero, 2022.

Devido à complexidade, incertezas e riscos envolvidos de novas infraestruturas, os

autores referem que os custos reais podem se aproximar ao limite superior do valor, em que, por exemplo, o custo agregado de 2030 a 2050 para as infraestruturas num aeroporto médio, com os aviões a serem abastecidos por sistema hidrante em que o hidrogénio é produzido no aeroporto, o valor final será entre 590M€ (1091,50 (custo médio) – 501,5 (limite inferior)) e 1593 M€ (1091,50 (custo médio) – 501,5 (limite superior)). Sendo que, conforme os autores, o valor será muito mais próximo de 1593M€.

A transição para uma economia baseada no hidrogénio poderá gerar novas fontes de receita para os aeroportos, como a venda de hidrogénio excedente, o seu uso em outras áreas operacionais do aeroporto, em veículos terrestres, como energia de reserva para indústrias vizinhas ou para aquecimento (Flyzero, 2022). No entanto, Riedel *et al.* (2023) alertam que a maioria dos aeroportos ainda não está preparada para essa transição, sendo necessárias adaptações significativas ao nível do planeamento do solo, infraestruturas, segurança e formação. Prevê-se que os primeiros voos comerciais com hidrogénio ocorram a partir de 2026, com entrada em operação de aeronaves regionais entre 2030 e 2035.

#### **4.3.3 Custos de produção do H<sub>2</sub> Verde**

O European Hydrogen Observatory (2024) analisou o custo do hidrogénio para uma parte dos países europeus para o ano de 2022 e 2023, no qual verificaram o CAPEX, OPEX, custo da eletricidade, as taxas de rede, o custo da matéria-prima necessária e mediante o tipo de hidrogénio e a forma como era produzido.

De forma a obter-se um termo comparativo dos custos para os dois anos (2022 e 2023), foi feita a Tabela 13, com os valores comparativos médios do LCOH dos países europeus na produção de hidrogénio cinzento (processo de reforma de metano a vapor), hidrogénio azul (reforma de metano a vapor com captura de carbono) e o processo de eletrólise que se divide em eletrólise através de fonte renováveis e eletrólise através de rede elétrica.

**Tabela 13.** Comparação dos custos médios de produção de hidrogénio na Europa entre 2022 e 2023, por tipo de processo e variação percentual aproximada;

| Tipo de hidrogénio/processo                                        | Custo médio 2022 (€/kg H <sub>2</sub> ) | Custo médio 2023 (€/kg H <sub>2</sub> ) | Variação aproximada (%) |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| Hidrogénio Cinzento (reforma de metano a vapor)                    | 6                                       | 3,76                                    | -37,00%                 |
| Hidrogénio Azul (reforma de metano a vapor com captura de carbono) | 6,38                                    | 4,41                                    | -31,00%                 |
| Eletrólise (rede elétrica)                                         | 10,65                                   | 7,94                                    | -26,00%                 |
| Eletrólise (renováveis)                                            | 6,81                                    | 6,61                                    | -3,00%                  |

**Fonte:** Elaborado pelo autor a partir de European Hydrogen Observatory 2024;

A comparação dos custos médios de produção de hidrogénio entre 2022 e 2023 revela uma redução significativa nos processos baseados em combustíveis fósseis, com destaque para o hidrogénio cinzento e azul, cujos custos diminuíram aproximadamente 37% e 31%, respetivamente. Esta descida está associada à queda dos preços do gás natural, ao aproveitamento de infraestruturas já existentes e à estabilização do mercado energético europeu (Comissão Europeia, 2024a). A eletrólise ligada à rede elétrica registou igualmente uma redução expressiva de cerca de 26%, beneficiando da normalização dos preços da eletricidade e de avanços tecnológicos nos eletrolisadores (Comissão Europeia, 2024a). Por outro lado, a eletrólise com fontes renováveis apresentou uma variação mais discreta, de apenas 3%, refletindo a estabilização dos custos da energia renovável e os limites impostos pela intermitência dessas fontes (Comissão Europeia, 2024a).

Em Portugal, no ano de 2022, o valor do hidrogénio cinzento era 6,04€/kg de H<sub>2</sub>, do hidrogénio azul 6,15€/kg de H<sub>2</sub>, do hidrogénio verde (através das renováveis) foi 5,20€/kg de H<sub>2</sub> e o hidrogénio através de eletrólise da rede elétrica o valor era 7,83€/kg de H<sub>2</sub>. Ao contrário de outros países, Portugal, Grécia e Bulgária introduziram medidas a curto prazo para atenuar o impacto dos elevados preços da eletricidade na indústria. Estas medidas assumem a forma de impostos negativos fazendo com que seja o custo do hidrogénio verde mais baixo comparativamente a outros países (European Hydrogen Observatory, 2024). Contudo, em 2023, essas medidas deixaram de vigorar, então o valor do hidrogénio verde através da eletrólise da renovável aumentou para 5,77€, já os outros valores do LCOH se mantiveram na mesma linha de diminuição que o resto dos países da UE, o hidrogénio cinzento diminuiu para 3,40€/kg, o azul para 4€/kg e o de eletrólise através da rede para

4,71€/kg.

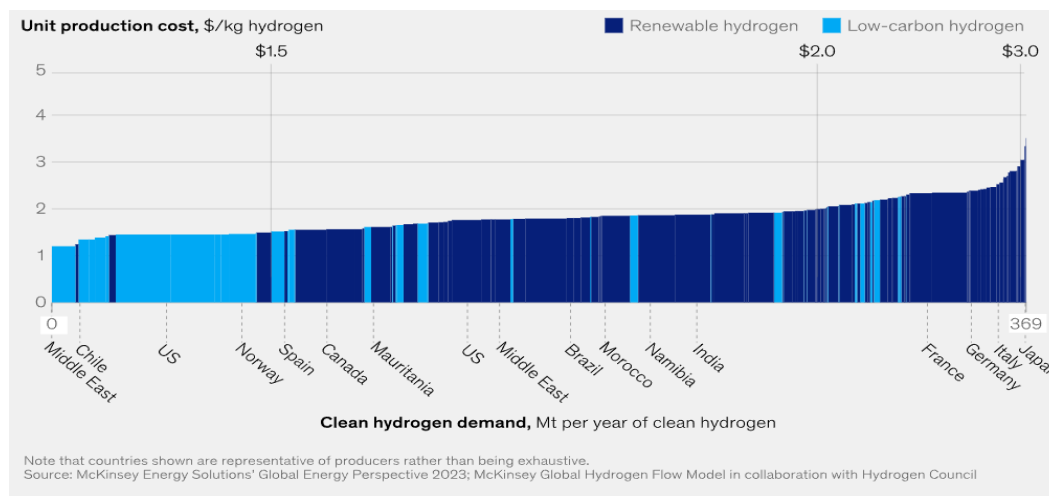
Os principais fatores que influenciam o custo de produção do hidrogénio verde são o custo do investimento inicial no eletrolisador e o custo da eletricidade renovável (IEA, 2023b). O preço da eletricidade é crucial, pois a eletrólise da água requer uma quantidade significativa de energia. A eficiência do eletrolisador e a frequência de manutenção afetam diretamente os custos operacionais. A durabilidade do equipamento também impacta os custos ao longo do tempo (Oesingmann *et al.*, 2024).

Na produção de hidrogénio, a pilha de eletrolisadores é responsável de 50 a 60% do custo de CAPEX. Oesingmann *et al.*, (2024) referem que os custos atualmente variam mediante o tipo de eletrolisador, sendo que os Alcalinos têm um custo médio 500–1.400 dólares/kWe (quilowatt elétrico), os PEM entre 1.100–1.800 dólares/kWe e os SOEC variam entre 2.800– 5.600 dólares/kWe. Já o IEA (2023b), refere que o custo do eletrolisador Alcalino na China tem um valor inferior devido a inflação ser maior na Europa, levando a custos mais altos e devido aos padrões e condições técnicas existentes nesse país, levando a uma maturidade tecnológica e consequentemente um preço mais baixo. O IEA (2023b) cita, então, que o custo do eletrolisador Alcalino na China varia entre 750-1300 dólares/kW e na Europa os eletrolisadores PEM e Alcalinos variam entre 1700 dólares/kW e 2000 dólares/kW.

Futuras reduções do preço serão influenciadas pelas inovações tecnológicas, como a AIoT (Artificial Intelligence of Things), que irá gerenciar e analisar dados aprimorados que serão fundamentais para a otimização e automação de sistemas. Com isto, prevê-se que reduza o CAPEX e o OPEX entre 15-25% (World Economic Forum, 2021). A diminuição dos custos da energia renovável fará com que o custo de produção de hidrogénio diminua até 30% (IEA, 2019; IEA, 2023b; Oesingmann *et al.*, 2024).

McKinsey & Company *et al.*, (2024) preveem que os custos de produção de hidrogénio (verde e azul) varie mediante regiões do mundo (Figura 13). Referem que entre 2030 e 2050, o custo de produção diminua significativamente e que regiões com recursos a gás natural e sistema de captura de carbono, que leva à produção de hidrogénio azul, deva responder a 30% das exportações, com um custo de produção abaixo de 1,5 dólares/kg (por exemplo Estados Unidos, Médio Oriente). Já as regiões com acesso à energia renovável de baixo custo, como Austrália ou África do Norte, que podem representar até 60% das exportações, com um custo de produção que varia entre 1,5 a 2 dólares/kg.

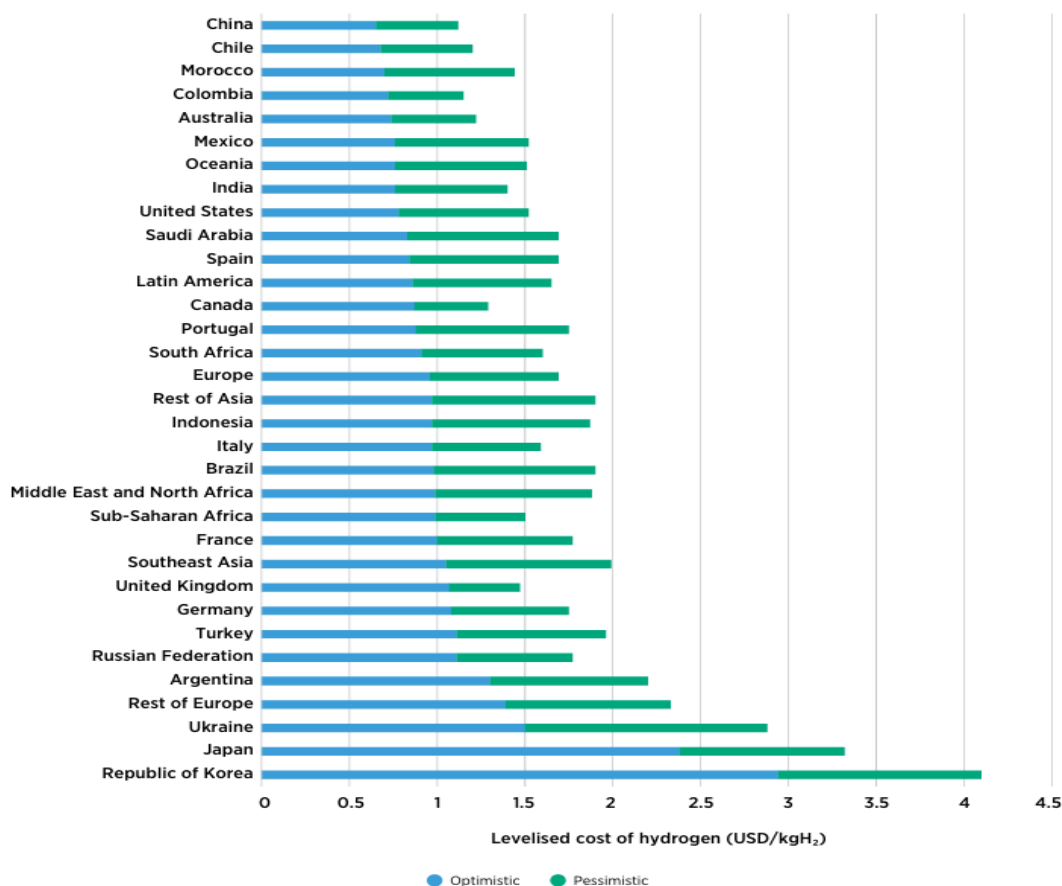
**Figura 13.** Previsão dos custos de produção em 2050, de hidrogénio azul e verde, em diferentes regiões mundiais.



Fonte: McKinsey & Company *et al.*, 2024.

Mediante a informação da Figura 13, o custo do hidrogénio azul na maior parte do mundo tem um valor inferior ao valor do custo hidrogénio verde e em 2050, na maior parte do mundo, o custo da produção de hidrogénio será inferior a 3 dólares o kg. Quer hoje, quer em 2050, a média do custo, na fabricação do hidrogénio azul, será mais baixa, que a média na produção do hidrogénio verde. Já o estudo da IRENA (2022), menciona que os países da África subsariana têm o maior potencial de produção hidrogénio (variando 602 EJ e 1845 EJ/ano), seguida da Austrália (584 EJ a 659 EJ/ano). Portugal neste relatório é considerado um dos que tem um menor potencial económico, com produção de 1,9 EJ a 2,4 EJ/ano. Na Figura 14, é apresentado o custo nivelado do hidrogénio em 2050, derivado da análise das curvas de custo de oferta, de países e regiões individuais, com base na procura estimada de hidrogénio para 2050. A disponibilidade da água para a eletrólise é considerada neste estudo nas curvas de custo de oferta de hidrogénio.

**Figura 14.** Custo nivelado do hidrogénio em 2050, derivado da análise de oferta e procura.



Fonte: IRENA (2022)

Na visão mais otimista a China, a Índia e os Estados Unidos parecem ser os locais mais indicados para a produção e consumo de hidrogénio verde, pois possuem um grande potencial de produção a um custo baixo (entre 0,65 e 0,78 USD/kgH<sub>2</sub>), isto devido à alta qualidade de seus recursos solares. Já países europeus como França, Alemanha, Espanha e Portugal, apresentam um custo mais elevado, que varia entre 0,8 e 1,1 USD/kgH<sub>2</sub> (IRENA, 2022).

Em ambos os cenários, ótimo ou péssimo, a República da Coreia é a que apresenta valores mais altos (IRENA, 2022).

#### 4.4 Parâmetros de Análise de Investimento

A viabilidade de qualquer negócio é iniciada pela esfera económica. Para mostrar sua consistência é preciso que seja feito com base em estimativas coerentes e confiáveis dos elementos de custos e de receitas. Para tanto, inicialmente, elaborase um fluxo de caixa constituído, basicamente, das projeções de entradas e saídas de recursos ao longo do período.

Um estudo de viabilidade económico-financeira objetiva um empreendimento que proporcione lucro suficiente aos investidores, a proporcionar um fluxo de caixa positivo ao longo da vida útil do empreendimento. Diante disso serão abordados os métodos de Valor Atual Líquido (VAL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Levelized Cost of Hydrogen* (LCOH).

#### 4.4.1 Valor Atual Líquido (VAL)

O Valor Atual Líquido (VAL) é um conceito financeiro fundamental, usado para avaliar a viabilidade de projetos ou investimentos ao considerar a diferença entre o valor presente das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa ao longo do tempo. Se o VAL for positivo, o projeto é economicamente viável. É calculado da seguinte forma:

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I \quad (4.8)$$

#### 4.4.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma medida financeira usada para avaliar a rentabilidade de um investimento. A TIR é uma métrica que ajuda a determinar a taxa de retorno anual esperada de um investimento, facilitando a avaliação da sua rentabilidade e a comparação com outros investimentos. Equação (4.9):

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - Investimento \quad (4.9)$$

#### 4.4.3 *Levelized Cost of Hydrogen* (LCOH)

O cálculo do custo nivelado do hidrogénio (LCOH) é essencial para avaliar a viabilidade económica do hidrogénio como combustível alternativo, permitindo compará-lo com outras fontes energéticas. Este indicador considera o investimento inicial, os custos operacionais e a vida útil do projeto, ajudando a identificar oportunidades de redução de custos e a tornar o hidrogénio mais competitivo. O LCOH é também uma ferramenta estratégica no planeamento de políticas públicas, atração de investimentos e promoção da transição energética e descarbonização. Equação (4.10):

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t + O_t + E_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{P_t}{(1+r)^t}} \quad (4.10)$$

- $C$  – Representa o custo de capital, considerando apenas o custo do eletrolisador, no ano  $t$ ;
- $O$  – Representa os custos operacionais no ano  $t$ ;
- $E$  – Representa os custos com eletricidade, ano  $t$ ;
- $P$  – Representa o hidrogénio produzido, ano  $t$ ;
- $R$  – Representa a taxa de desconto no ano  $t$ ;
- $n$  – Vida útil da planta em anos;

#### 4.4.4 PR (Período de Retorno ou Payback)

Payback é o tempo (em anos) que um projeto demora a recuperar o investimento inicial com base nos fluxos de caixa anuais líquidos, representado na Equação (4.11).

$$PR = \frac{\textit{Investimento Inicial}}{\textit{Fluxo de Caixa Anual}} \quad (4.11)$$

## 5. Estudo de Caso

A integração do hidrogénio verde no setor da aviação apresenta um conjunto de desafios de natureza técnica, económica e infraestrutural. O desenvolvimento de tecnologias de propulsão seguras e energeticamente eficientes, nomeadamente as células de combustível a hidrogénio, constitui um requisito essencial para a sua implementação em larga escala. Paralelamente, a expansão da capacidade de produção de hidrogénio verde depende de investimentos substanciais em energias renováveis, capazes de assegurar a sua origem sustentável. Do ponto de vista logístico, a criação de uma infraestrutura global de abastecimento e armazenamento de hidrogénio nos aeroportos representa um fator determinante para a viabilidade operacional. Adicionalmente, a harmonização regulatória e a padronização internacional assumem um papel central, sendo igualmente imprescindível a redução dos custos de produção, de forma a tornar o hidrogénio verde uma alternativa economicamente competitiva face ao querosene.

O estudo de caso contempla uma avaliação ambiental e económica de uma ligação aérea doméstica no trajeto Porto–Lisboa, considerando três cenários de abastecimento: hidrogénio verde, *jet fuel* e biocombustíveis sustentáveis. Para assegurar a maior fidedignidade possível dos resultados, a análise pressupõe a construção de uma central de produção de hidrogénio de raiz, permitindo o cálculo do LCOH e de outros parâmetros financeiros relevantes para aferir a viabilidade de um projeto com horizonte temporal de 25 anos.

A presente investigação recorre a uma abordagem metodológica dividida em dois cenários complementares, o cenário ambiental e o cenário económico-financeiro, com o objetivo de avaliar de forma integrada, os impactos ambientais e económico-financeiros da substituição progressiva de combustíveis fósseis por hidrogénio verde no setor da aviação regional, utilizando como caso de estudo a rota doméstica Porto–Lisboa.

No primeiro cenário, recorre-se à metodologia de quantificação das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para determinar a pegada carbónica associada à utilização de Jet A-1, numa aeronave Embraer 195 operada pela TAP Air Portugal. Foram calculadas as emissões totais por voo e por passageiro, considerando todas as fases da operação aérea, permitindo assim estabelecer uma linha de base mais representativa da realidade operacional.

Com base nesses dados, estimou-se a redução de emissões que se obteria mediante a substituição por hidrogénio líquido, assumindo combustão direta ou o uso de células de combustível, ambas sem emissões diretas de CO<sub>2</sub>. Paralelamente, foi também avaliado um

cenário intermédio com a adoção de SAF, nomeadamente o HEFA-SPK, comparando-se a respetiva percentagem de redução em relação ao Jetfuel convencional.

No segundo cenário, a análise incide sobre a viabilidade técnico-económica da produção descentralizada de hidrogénio verde por parte de uma empresa aeroportuária, com base na instalação de uma central de eletrólise da água localizada nas imediações do Aeroporto Francisco Sá Carneiro, junto ao rio Leça. Esta central será alimentada por um sistema energético híbrido, combinando eletricidade gerada localmente por uma central fotovoltaica com energia fornecida pela rede elétrica nacional, ambas com certificação de origem 100% renovável. Em termos hídricos, considera-se uma abordagem igualmente híbrida, com recurso tanto à captação direta de água do rio Leça como à utilização de água potável proveniente da rede pública, assegurando a redundância e fiabilidade do processo.

Neste contexto, será modelado o custo nivelado de produção de hidrogénio (Levelized Cost of Hydrogen – LCOH) ao longo de todo o período do projeto, até 2052, fazendo uma comparação com as projeções futuras para o custo de mercado do hidrogénio verde e com os preços médios de aquisição de Jetfuel e SAF. Esta avaliação técnica explora também a valorização do oxigénio gerado como subproduto do processo de eletrólise, o qual poderá ser comercializado para fins industriais ou medicinais, melhorando a rentabilidade do projeto. Além disso, esta segunda vertente integra uma análise de fluxo de caixa descontado, considerando todo CAPEX, OPEX, manutenção, substituição de componentes e receitas previstas com a venda de hidrogénio e oxigénio. Serão estimados os fluxos financeiros anuais, bem como os principais indicadores financeiros de viabilidade de investimento, nomeadamente o Valor Atual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR), o Período de Payback (PR) e o custo nivelado do hidrogénio produzido (LCOH). Será ainda calculado os custos associados ao uso de combustível a hidrogénio verde, jetfuel e SAF (HEFA-SPK) na viagem Porto-Lisboa.

A combinação destas duas abordagens, ambiental e económico-financeira, irá permitir compreender o impacto sistémico de uma eventual transição energética no transporte aéreo regional, identificando os *trade-offs* entre sustentabilidade ambiental, viabilidade económica e operabilidade aeroportuária. Esta análise visa, por fim, oferecer contributos concretos para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais de descarbonização do setor aeronáutico em Portugal e na União Europeia.

## 5.1 Caracterização do estudo de caso

Este estudo de caso aborda a ligação aérea regular entre o Aeroporto Francisco Sá Carneiro, no Porto, e o Aeroporto Humberto Delgado, em Lisboa, numa distância estimada de 280 km. A investigação incide sobre a operação deste percurso com recurso à aeronave Embraer 195, pertencente à frota da companhia aérea TAP Air Portugal. O objetivo é avaliar comparativamente o impacto energético e ambiental da operação com combustível fóssil tradicional (Jet A-1) face à alternativa com hidrogénio líquido (LH<sub>2</sub>), que não gera emissões diretas de dióxido de carbono durante a sua utilização.

A opção pela aeronave Embraer 195 fundamenta-se no facto de se tratar de um avião de médio porte, especialmente vocacionado para voos regionais de curta duração, como é o caso da rota Porto–Lisboa. Este equipamento já assegura este serviço diariamente em condições operacionais reais, o que viabiliza a utilização de dados técnicos concretos e testados para efeitos de modelação energética e análise económica. Trata-se de um modelo amplamente adotado por companhias europeias, conjugando eficiência e capacidade de transporte de passageiros, o que o torna apropriado para esta análise.

Adicionalmente, a escolha desta aeronave prende-se com a sua capacidade de adaptação ao uso de combustíveis alternativos, como o hidrogénio líquido, desde que sejam realizadas alterações técnicas, nomeadamente no sistema de armazenamento de combustível, devido à menor densidade energética volumétrica do LH<sub>2</sub> em comparação com o Jet A-1.

A Tabela 14 apresenta as principais especificações técnicas do modelo Embraer 195, que servem de base aos cálculos de consumo energético, emissões poluentes e à análise do seu potencial de reconversão tecnológica.

**Tabela 14.** Características da aeronave Embraer 195 - TAP

**EMBRAER 195 – TAP**



|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| <b>Comprimento (m)</b>               | 38,65  |
| <b>Envergadura (m)</b>               | 28,72  |
| <b>Altura (m)</b>                    | 10,55  |
| <b>Área das asas (m<sup>2</sup>)</b> | 92,50  |
| <b>Velocidade de cruzeiro (km/h)</b> | 870    |
| <b>Altitude de cruzeiro (m)</b>      | 12,500 |
| <b>Alcance (km)</b>                  | 4,260  |
| <b>Capacidade de combustível (L)</b> | 12,793 |
| <b>Número de passageiros</b>         | 118    |
| <b>Consumo por hora (L/h)</b>        | 2321   |

**Fonte:** elaborada pelo autor, adaptado de TAP, 2024b.

## 5.2 Adaptações técnicas

Como mencionado anteriormente, serão necessárias alterações técnicas no avião e no próprio aeroporto para ser possível abastecer as aeronaves. A transição de combustíveis fósseis para o hidrogénio líquido no setor da aviação exige modificações estruturais significativas nas aeronaves, especialmente ao nível do armazenamento de combustível. Esta necessidade decorre das diferenças fundamentais entre as propriedades físico-químicas do Jet A-1 e do hidrogénio. Embora o LH<sub>2</sub> possua uma densidade energética gravimétrica superior (cerca de 120 MJ/kg face a 43 MJ/kg do Jet A-1), a sua densidade volumétrica é substancialmente inferior (cerca de 8,5 MJ/L contra 35 MJ/L do Jet A-1) (Buttler & Spliethoff, 2018; IEA, 2022b).

No caso específico do Embraer 195, que dispõe de uma capacidade atual de combustível de 12.793 litros (aproximadamente 10.234 kg de Jet A-1, considerando uma densidade média de 0,8 kg/L), a substituição por hidrogénio líquido implicaria a necessidade de aproximadamente 51.900 litros de LH<sub>2</sub> para garantir a mesma autonomia operacional. Esta estimativa baseia-se na densidade energética volumétrica do LH<sub>2</sub> (aproximadamente 8,5 MJ/L) ser cerca de quatro vezes inferior à do Jet A-1 (aproximadamente 34,6 MJ/L) (Buttler & Spliethoff, 2018; IEA, 2022b).

A instalação de tanques criogénicos de grande volume impõe desafios de engenharia

relevantes, nomeadamente no que se refere à segurança, à aerodinâmica e à distribuição de massas na aeronave. A solução estrutural mais viável, segundo os estudos mais recentes, é a instalação de tanques na secção posterior à cabine de passageiros, minimizando o impacto na estabilidade longitudinal e no centro de gravidade (Airbus, 2023). Outras soluções, como tanques sobre a fuselagem ou divididos entre a dianteira e a traseira, tendem a comprometer a aerodinâmica e o desempenho estrutural.

Adicionalmente, o armazenamento de  $LH_2$  requer temperaturas criogénicas de aproximadamente  $-253^\circ C$ , sendo imprescindível o uso de tanques de dupla parede com isolamento a vácuo e sistemas de ventilação ativa para evitar a formação de sobrepressões e perdas por evaporação (US Department of Energy, 2024). Estes sistemas aumentam o peso estrutural da aeronave e requerem manutenção específica, embora os ganhos em termos de sustentabilidade e emissões possam justificar o investimento.

### **5.3 Cenário Ambiental (Estimativa das Emissões de $CO_2$ no Voo Porto–Lisboa)**

Este estudo de caso tem como base o trajeto aéreo doméstico entre o Aeroporto Francisco Sá Carneiro (Porto) e o Aeroporto Humberto Delgado (Lisboa), com uma distância aproximada de 280 km. Para o cálculo das emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) associadas à operação com combustível fóssil (Jet A-1), foi utilizada uma abordagem baseada em dados reais de operação da companhia aérea TAP Air Portugal, que realiza esta ligação regularmente com a aeronave Embraer 195.

O cálculo das emissões considerou o tempo total de voo de 1 hora, integrando todas as fases do voo (decolagem, subida, cruzeiro, descida e aterragem). Optou-se por não isolar apenas a fase de cruzeiro, ainda que esta represente a maior parte do consumo de combustível, de modo a refletir com maior fidelidade as emissões reais associadas a cada operação completa. A fase de cruzeiro, definida como o segmento do voo realizado a altitudes superiores a 914,4 metros, apresenta consumos mais eficientes por quilómetro, mas a sua análise isolada poderia conduzir a uma subestimação das emissões totais. Assim, a adoção do tempo de voo total permite um cálculo mais robusto e representativo (IEA, 2022a; BP, 2022).

Adicionalmente, foi assumido um fator de ocupação média de 90%, tendo em consideração dados estatísticos da operação da TAP em voos domésticos e regionais. Esta taxa de ocupação, aplicada à configuração do Embraer 195 com 118 lugares em classe

económica, traduz-se num total médio de 106 passageiros por voo.

5.3.1 Ao utilizar Combustível Jet A-1

Com base nestas premissas e na utilização de uma folha de cálculo específica para estimativas de emissões de CO<sub>2</sub>, foi determinado que, para cada voo entre Porto e Lisboa, a aeronave consome 2.321 litros de Jet A-1, resultando na emissão de aproximadamente 7.334,36 kg de CO<sub>2</sub>. Este valor corresponde a cerca de 60,08 kg de CO<sub>2</sub> por passageiro em cada trajeto, considerando o fator carga-passageiro de 0,87, conforme ilustrado na Tabela 15.

Tabela 15. Cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>

| Cálculo emissões CO <sub>2</sub> : | EMBRAER 195 – TAP |
|------------------------------------|-------------------|
| Tempo de voo (h)                   | 1                 |
| Consumo total de combustível:      | 2321              |
| Emissões de CO <sub>2</sub> (kg)   | 7334,36           |
| CO <sub>2</sub> por pessoa:        | 60,08             |
| Consumo total de combustível       | 2321              |
| Factor passageiro-carga            | 0,87              |
| Nº assentos classe económica       | 118               |
| Factor ocupação de passageiros     | 0,9               |

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas equações da secção 4.2.1

Este resultado demonstra a magnitude das emissões associadas a voos de curta distância com aeronaves regionais, sublinhando a necessidade de transição para combustíveis alternativos, como os Sustainable Aviation Fuels (SAFs) ou o hidrogénio verde, especialmente em rotas de alta frequência como a que liga Porto-Lisboa.

5.3.2 Ao utilizar SAF

As diferentes vias de produção de combustíveis sustentáveis para a aviação (SAF) encontram-se em distintos níveis de maturidade técnica e comercial. A via HEFA (ésteres e ácidos gordos hidroprocessados) destaca-se como a mais consolidada, representando atualmente a principal fonte de SAF disponível no mercado. Mesmo sabendo que as emissões de GEE são baixas, a tecnologia é a mais madura. No estudo de Bell *et al.*, (2024), constataram

que o valor da LCA (análise do ciclo de vida) da HEFA variava de país ou de instituição (Tabela 16).

**Tabela 16.** Valores de Emissões de Ciclo de Vida para HEFA-SPK, diferentes países e CORSIA.

| Origem                          | LCA<br>(GCO <sub>2E</sub> / MJ) |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Alemanha (base cinza)           | 12,6                            |
| França                          | 13,7                            |
| EUA (média)                     | 14,9                            |
| China                           | 19,5                            |
| UE (com eletricidade renovável) | entre 10–11                     |
| CORSIA                          | 12,6                            |

Fonte: Elaborado pelo autor e adaptado de Bell *et al.*, 2024.

Por esta razão vamos optar pelo valor da CORSIA, os 12,6 g CO<sub>2</sub>e/MJ.

Na Tabela 17 temos alguns parâmetros e como o HEFA-SPK o máximo de mistura que pode ser colocado junto ao JETfuel é 50%, optamos por ver quanto seria a redução mediante a percentagem de SAF colocado na mistura, em que na tabela já aparece calculada a massa com percentagem de mistura de 10, 20, 30, 40 e 50%.

**Tabela 17.** Parâmetros Técnicos e Ambientais para Cálculo das Emissões no Voo Porto–Lisboa com Mistura SAF HEFA-SPK

| PARÂMETROS                                         |     | Valores | Unidades               |
|----------------------------------------------------|-----|---------|------------------------|
| EF(Fator de Emissão)                               | TTW | 3,16    | kgCO <sub>2</sub> /kg  |
|                                                    | WTW | 3,84    | kgCO <sub>2</sub> e/kg |
| MSAFY (massa total SAF)                            | 10% | 171,30  | Kg                     |
|                                                    | 20% | 342,58  |                        |
|                                                    | 30% | 513,87  |                        |
|                                                    | 40% | 685,16  |                        |
|                                                    | 50% | 856,45  |                        |
| LCA (SAF) (valor do ciclo de vida SAF)             |     | 12,60   | g CO <sub>2</sub> e/MJ |
| LCA (CAF) (valor ciclo de vida combustível fóssil) |     | 89      | gCO <sub>2</sub> e/MJ  |
| Densidade do HEFA-SPK                              |     | 0,74    | kg/L                   |
| Consumo JETfuel Embraer- 195 Porto-Lisboa          |     | 2321    | L                      |

Fonte: elaborada pelo autor

Através da Fórmula IATA (2025), e sabendo que num voo Porto-Lisboa a quantidade de CO<sub>2</sub> produzido foi 7334,36 kg e como no estudo não fizemos a emissão do ciclo de vida JetFuel iremos só considerar o fator de emissão TTW 3,16 kgCO<sub>2</sub>/kg. Mediante isto os resultados são os seguintes:

**Tabela 18.** Resultados das diferentes percentagens de HEFA em Jetfuel e a redução das emissões em %

| Percentagem da mistura | Redução | Percentagem reduzida |
|------------------------|---------|----------------------|
|                        | (kg)    | (%)                  |
| 10%                    | 464,65  | 6,34                 |
| 20%                    | 929,29  | 12,67                |
| 30%                    | 1393,94 | 19,01                |
| 40%                    | 1858,58 | 25,34                |
| 50%                    | 2323,23 | 31,67                |

**Fonte:** Elaborado pelo autor com base nas equações da secção 4.2.2;

Como já era de esperar, quanto maior for a percentagem de mistura de HEFA-SPK, maior será a quantidade de redução de emissão de CO<sub>2</sub>. Contudo esta informação não corrobora com a informação encontrada na literatura descrito na Tabela 3, pois afirma que o máximo de redução é cerca de 28% e aqui é 31,67%. Mesmo que a diferença percentual seja mínima, o que poderá estar a fazer a diferença no valor são as Emissões de Ciclo de Vida para HEFA-SPK que variam mediante o estudo, país ou instituição.

## 5.4 Cenário Económico

Este trabalho propõe uma análise técnico-económica da viabilidade do uso de hidrogénio verde no setor da aviação. Será colocada uma central de hidrogénio perto do aeroporto Francisco Sá Carneiro em que será produzido o hidrogénio líquido para abastecer a frota de aviões. Mediante o que foi visto anteriormente na Tabela 9, sobre a designação do aeroporto relativamente ao tamanho, que se constatou que o aeroporto seria um aeroporto pequeno a médio, iremos adotar as premissas relativamente ao estudo da FlyZero para a procura diária de hidrogénio, a potência do eletrolisador, a quantidade de água para a eletrólise o armazenamento e o espaço necessário para a central de hidrogénio, conforme a Tabela 19.

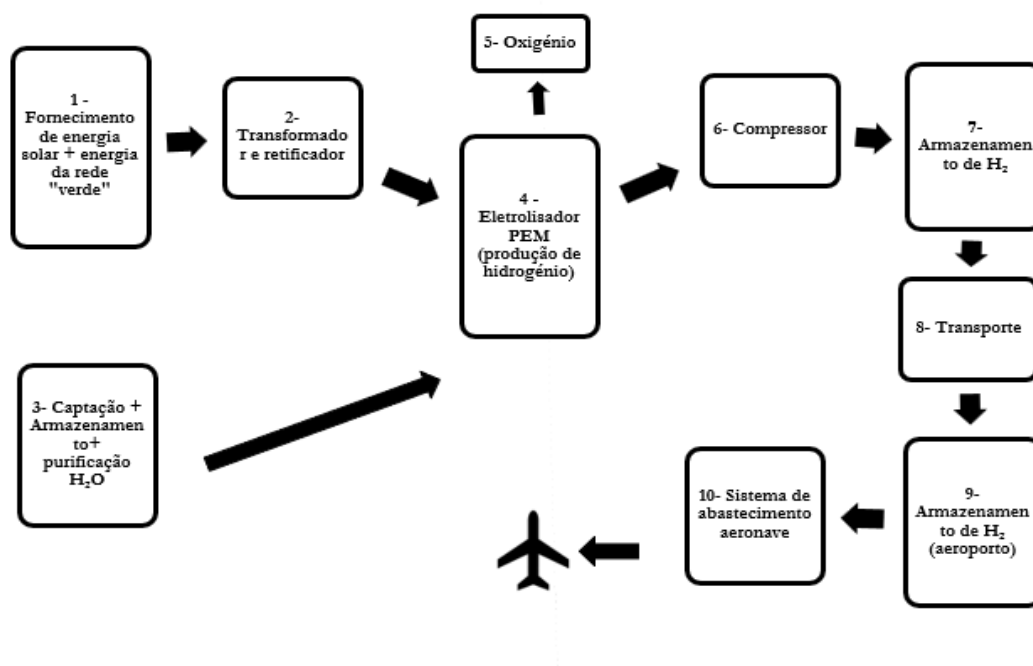
**Tabela 19.** Dados padrão mediante estudos da Flyzero para o aeroporto Francisco Sá Carneiro

| Aeroporto Francisco Sá Carneiro – 2035 (previsão) |                       |
|---------------------------------------------------|-----------------------|
| Procura média diária                              | 0,6 milhões de litros |
| Potência do eletrolisador                         | 125 MW                |
| Quantidade h <sub>2</sub> O eletrólise            | 22500 litros por hora |
| Potência de liquefação                            | 20MW                  |
| Armazenamento de LH <sub>2</sub>                  | 1,5 milhões de litros |
| Espaço necessário                                 | 13000 m <sup>2</sup>  |

Mediante o que fora referido na tabela anterior, conseguimos perceber as necessidades mais relevantes para o estudo, como um eletrolisador com potência de 125MW, ou um espaço necessário para a central de hidrogénio de 13000 m<sup>2</sup>, que servem de referência para encontrar equipamentos adequados, custos e dimensões para o local. Contudo, optou-se numa fase inicial pela implementação de uma central de produção de hidrogénio líquido com capacidade de 10.000 kg por dia, valor substancialmente inferior à projeção futura de 600.000 kg/dia. Esta abordagem justifica-se por critérios técnicos, económicos e estratégicos, permitindo validar a operação da infraestrutura em menor escala, testar a viabilidade dos processos envolvidos e mitigar os riscos inerentes a investimentos de grande dimensão. A central modular concebida para este cenário servirá como base para o estudo de caso e permitirá a futura expansão, de forma faseada, em função do crescimento da procura de hidrogénio verde nos setores da aviação, transporte pesado e aplicações industriais.

O diagrama seguinte, Figura 15, ilustra as diversas etapas que compõem a cadeia integrada de produção, compressão, armazenamento e distribuição de hidrogénio verde, com especial destaque para a produção e valorização do oxigénio como subproduto do processo de eletrólise.

**Figura 15.** Diagrama do sistema integrado de produção, compressão, armazenamento e distribuição de hidrogénio verde, com coprodução de oxigénio.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O esquema representa todas as etapas da cadeia de valor do hidrogénio verde aplicado à aviação, desde o fornecimento de eletricidade renovável até ao abastecimento direto de aeronaves. A produção de hidrogénio é realizada por eletrólise PEM, utilizando água previamente purificada e acompanhada da separação e valorização do oxigénio gerado. O hidrogénio é posteriormente comprimido, armazenado e transportado para o aeroporto, onde é novamente armazenado antes de ser utilizado no abastecimento de aeronaves com zero emissões no ponto de uso.

Neste trabalho, serão analisadas quase todas as etapas representadas no diagrama de processo, que abrangem: o fornecimento de energia elétrica proveniente de fontes renováveis (ponto 1); a conversão da energia através de transformador e retificador (ponto 2); a captação, armazenamento e purificação da água (ponto 3); a produção de hidrogénio por eletrólise de membrana de troca protónica – PEM (ponto 4); a separação e valorização do oxigénio (ponto 5); a compressão do hidrogénio (ponto 6); o armazenamento intermédio (ponto 7); o transporte até ao aeroporto (ponto 8); o armazenamento final (ponto 9); e, por fim, o sistema de abastecimento direto à aeronave (ponto 10). Cada uma destas fases será abordada de forma pormenorizada, tendo em conta os requisitos técnicos, consumos

energéticos, custos envolvidos e contributo para a sustentabilidade global da cadeia de valor do hidrogénio verde aplicada à aviação.

### 5.4.1 Central de Hidrogénio

Espera-se que a planta de produção de hidrogénio seja construída em dois anos, tal como a central fotovoltaica, e tenha um período operacional de 20 anos. Além disso, presume-se que 80% do capital inicial necessário para o projeto será obtido através de financiamento de diferente fonte de capital. Os detalhes específicos do investimento utilizados na análise económica são fornecidos na Tabela 20.

**Tabela 20.** Parâmetros de Investimento financeiro

| Parâmetros                                      | Referências base |                           |
|-------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Vida útil do Projeto                            | 27anos           | n/a                       |
| Vida útil da Planta                             | 25 anos          | n/a                       |
| Tempo de construção                             | 2 anos           | (Christensen, 2020)       |
| Inflação (ano 2024)                             | 1,9%             | (Banco Portugal, 2025)    |
| Taxa de depreciação                             | 5%               | (Christensen, 2020)       |
| Taxa de desconto                                | 8%               | (IEA, 2022b)              |
| Imposto sobre o Rendimento de Pessoas Coletivas | 21%              | (Governo, 2022)           |
| Capital Próprio                                 | 20%              | n/a                       |
| Capital Emprestado                              | 80%              | n/a                       |
| Taxa de juros                                   | 2,55%            | (Banco de Portugal, 2025) |

**Fonte:** elaborado pelo autor

Será considerado uma taxa de Imposto sobre Rendimento de Pessoas Coletivas de 21%, visto ser a taxa aplicada em Portugal Continental para a generalidade das empresas. Taxa de juro de 2,55%, mediante dados do Banco de Portugal. A taxa de desconto é um parâmetro crucial na avaliação económico-financeira, influenciando diretamente o LCOH em que taxas mais elevadas aumentam o LCOH, reduzindo a atratividade do projeto, enquanto taxas mais baixas favorecem a sua viabilidade. Em projetos de energia renovável, situam-se normalmente entre 6% e 10% (IEA, 2022b). Para o presente estudo, adotou-se o valor médio de 8%, em linha com as práticas internacionais.

Para a produção de hidrogénio foi selecionada a tecnologia baseada em eletrolisador PEM, devido às suas vantagens técnicas face a outras tecnologias de eletrólise. Entre os benefícios mais relevantes estão a elevada eficiência, a resposta rápida a variações na entrada de energia renovável (como solar e eólica), a elevada densidade de corrente e, sobretudo, a

produção de hidrogénio com elevada pureza. Esta última característica é particularmente importante para aplicações que exigem hidrogénio líquido, como é o caso da aviação, uma vez que impurezas podem causar problemas no processo de liquefação e armazenamento criogénico (Nnabuife *et al.*, 2024).

O dimensionamento da central baseou-se numa necessidade energética anual de 211,7 GWh para alimentar os eletrolisadores, garantindo uma produção contínua de 10.000 kg de hidrogénio por dia. Considerando uma eficiência energética de 70% para os eletrolisadores PEM, estimou-se uma potência instalada de aproximadamente 24,17 MW. Os principais parâmetros técnico-económicos considerados para esta central são apresentados na Tabela 21. Estes valores foram obtidos a partir da literatura científica e técnica.

**Tabela 21.** Parâmetros técnico-económicos dos principais equipamentos da central de hidrogénio

| Dispositivo / componente                      | Parâmetros                                | Valor / cálculo                | Referências                                       |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Eletrolisador PEM</b>                      | Consumo de água                           | 14 litros/kg de H <sub>2</sub> | (AHC & ARUP, 2022)<br>(Tractebel & Hinicio, 2017) |
|                                               | Eficiência energética                     | 70%                            |                                                   |
|                                               | Vida útil do sistema                      | 25 anos                        |                                                   |
|                                               | Vida útil da pilha                        | 40.000 h                       |                                                   |
|                                               | Potência instalada                        | 24,17 MW (base 211,7 GWh/ano)  |                                                   |
|                                               | CAPEX (1200 €/kW)                         | 29000004€                      |                                                   |
|                                               | OPEX anual (2%)                           | 580000€                        |                                                   |
|                                               | Substituição da pilha (420 €/kW *4 vezes) | 40187760€                      |                                                   |
| <b>Armazenamento de H<sub>2</sub> líquido</b> | Capacidade do tanque                      | 68 m <sup>3</sup> (4,8 t)      | (Houchins & James, 2022)                          |
|                                               | CAPEX (115.000 €/t H <sub>2</sub> )       | 1656000 €                      |                                                   |
|                                               | OPEX anual (2%)                           | 33120 €                        |                                                   |
|                                               | Vida útil                                 | 25 anos                        |                                                   |
| <b>Compressor criogénico</b>                  | Vida útil                                 | 15 anos                        | (Khan <i>et al.</i> , 2021)                       |
|                                               | CAPEX (2 unidades de 720.132 €)           | 1440264 €                      |                                                   |
|                                               | OPEX energético (anual)                   | 176,66 €                       |                                                   |
|                                               | OPEX não energético (anual)               | 28923 €                        |                                                   |

|                                                  |                                               |              |                     |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|---------------------|
| <b>BoP (Balance of Plant)</b>                    | Percentagem do CAPEX do eletrolisador (10%)   | 2900000 €    | (AGORA, 2023)       |
|                                                  | OPEX anual estimado                           | 500000 €     |                     |
| <b>Infraestrutura Civil e Edifícios Técnicos</b> | Inclui telhados, obras, fundações – 15% CAPEX | 4350000 €    | (AGORA, 2023)       |
| <b>Recursos Humanos</b>                          | 50 funcionários a 1.000 €/mês                 | 600000 €/ano | Definido pelo autor |

Os parâmetros descritos acima são essenciais para o cálculo do custo nivelado de produção de hidrogénio (LCOH), bem como para a construção dos fluxos de caixa do projeto ao longo de seu tempo de vida útil. A estimativa dos investimentos em CAPEX e OPEX foi baseada em estudos técnicos de referência e valores praticados em projetos piloto.

Um aspeto particularmente relevante é a inclusão do Balance of Plant (BoP), que compreende todos os sistemas auxiliares indispensáveis ao funcionamento seguro e eficiente da central. Entre estes incluem-se os sistemas de controlo e automação, unidades de refrigeração, ventilação, segurança industrial, subestações elétricas internas, instrumentação, redes de comunicação e outras infraestruturas complementares. Para este estudo, o valor do BoP foi estimado em 10% do CAPEX do eletrolisador, em consonância com diretrizes técnicas como as propostas por AGORA (2023). Adicionalmente, foi considerado um OPEX anual fixo associado ao BoP, o qual cobre custos operacionais e de manutenção contínua desses sistemas, como contratos de assistência técnica, peças sobressalentes e calibração de sensores, entre outros.

A componente de infraestrutura civil, englobando obras de engenharia, fundações, coberturas e edifícios técnicos, foi também considerada de forma detalhada, representando aproximadamente 15% do CAPEX do eletrolisador. Esta inclusão assegura que os custos indiretos, mas estruturantes para a instalação da central, não sejam subestimados.

No que respeita aos recursos humanos, foi adotado um cenário de 50 trabalhadores, com uma remuneração média de 1.000 € mensais. Esta equipa contempla operadores, técnicos de manutenção, especialistas em segurança, engenheiros e pessoal administrativo, repartidos entre a unidade de produção de hidrogénio e o sistema de geração solar. Este valor anual estimado de 600.000 €, permite captar os custos laborais diretos de operação, contribuindo para uma análise de OPEX mais realista e alinhada com as práticas do setor.

De salientar a previsão de substituição das pilhas do eletrolisador e o compressor, quatro vezes e duas vezes respetivamente, devido o projeto ser de 25 anos e o tempo de vida é

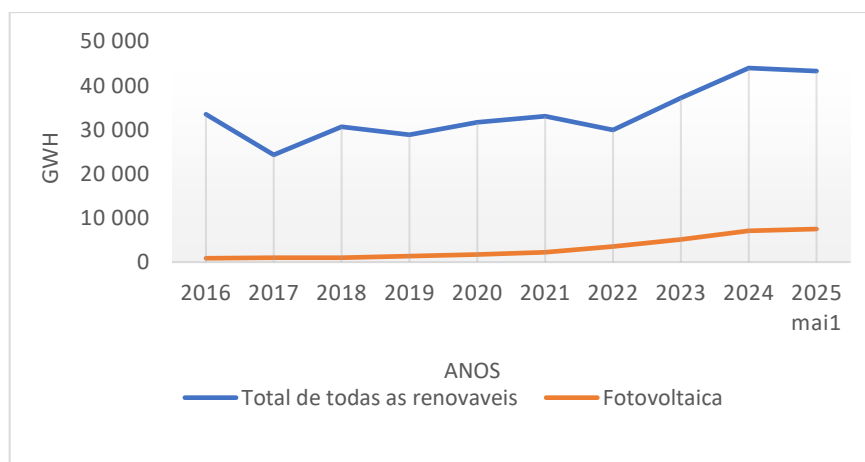
inferior.

#### 5.4.2 Matérias-primas para produção H<sub>2</sub> verde

A produção de hidrogénio líquido por eletrólise da água é um processo altamente intensivo em energia. No presente estudo, considerou-se a utilização de eletrolisadores PEM com uma eficiência média de 70% (IEA, 2022b; Buttler & Spliethoff, 2018), resultando num consumo energético estimado de 58 kWh por kg de H<sub>2</sub> produzido (Borges *et al.*, 2024). Com uma produção anual prevista de 3.650.000 kg de H<sub>2</sub>, a necessidade energética total atinge 211,7 GWh/ano.

Para responder a esta procura energética, foi selecionada a energia fotovoltaica como fonte primária, devido ao seu crescimento contínuo, carácter limpo e abundante, e aos incentivos governamentais em Portugal. Como mostra a Figura 16 a produção de energia fotovoltaica cresceu de forma constante entre 2016 e 2025, ultrapassando em maio de 2025 o total anual de 2024 (DGEG, 2025).

**Figura 16.** Produção de energia renovável em Portugal (2016 a maio de 2025) do total de energias renováveis e exclusivamente a energia fotovoltaica (em GWh)



Fonte: adaptado de DGEG, 2025.

Este crescimento reflete os esforços nacionais de transição energética, sustentados por políticas como o Decreto-Lei n.º 15/2022, que promove a produção descentralizada e o autoconsumo, e o Decreto-Lei n.º 85/2022, que facilita a comercialização de excedentes de energia (Diário da República, 2022, 2025).

No entanto, o fim da aplicação da taxa reduzida de IVA (6%) para aquisição e instalação de painéis solares a partir de junho de 2025 poderá comprometer o incentivo ao investimento privado nesta área (EDP, 2025a).

#### **5.4.2.1 Energia elétrica a ser consumida**

Portugal apresenta um elevado potencial para a produção de energia solar fotovoltaica, com uma média anual de 2.200 a 3.000 horas de sol no continente e entre 1.700 e 2.200 nas regiões autónomas (ADENE, 2017). Estes fatores favorecem a viabilidade técnica e económica da produção de hidrogénio verde em modelos híbridos de autoconsumo que reduzem a dependência da rede elétrica e promovem a neutralidade carbónica (ADENE, 2017).

Para garantir o funcionamento contínuo da central durante 24 horas por dia, adota-se uma solução técnica híbrida, com energia solar fotovoltaica a suprir cerca de 6 horas por dia (25% do total) com irradiação solar média de  $1500 \text{ kWh/m}^2$ , e a compra de energia da rede elétrica com certificado de origem 100% renovável (energia “verde”) para cobrir as restantes 18 horas (75%). Esta solução permite manter o hidrogénio produzido dentro da classificação de “verde”, conforme os critérios da Diretiva (UE) 2018/2001 (RED II) (Parlamento Europeu e do Conselho, 2018).

Então precisaremos de:

$$\text{Energia Solar} = 0,25 \times 211,7 = 52,93 \text{ GWh/ano} \quad (5.12)$$

$$\text{Energia da rede necessária} = 0,75 \times 211,7 = 158,78 \text{ GWh/ano} \quad (5.13)$$

#### **A. Energia Solar**

Para garantir o fornecimento de energia solar fotovoltaica à central de produção de hidrogénio líquido, estima-se uma necessidade anual de 52,93 GWh/ano. Iremos considerar que, na zona do Porto, a produtividade média anual de um sistema solar fotovoltaico é de aproximadamente 1.500 MWh por megawatt-pico (MWp) instalado (ADENE, 2017). Comparativamente temos o estudo feito na Turquia (Şen & Özcan, 2023) em que 1 MW da usina de energia solar poderia gerar 1.685,78 MWh de eletricidade por ano. Estes são valores aproximados, então assumiremos no estudo como sendo dados certos.

Ao sabermos a potência instalada total (MWp), isso nos levará às dimensões da nossa usina fotovoltaica e nos ajudará nos custos inerentes da mesma. Então:

$$\begin{aligned} \text{Potência de Pico em corrente contínua (MWp)} \\ = (\text{Energia anual (kWh)})/(\text{Produção específica (kWh} \\ \text{/MWp/ano)}) \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\text{Potência de pico em corrente contínua (MWp)} = \frac{52930000}{1500}$$

$$\text{Potência de Pico em corrente contínua (MWp)} = 35,29 \text{ MWp}$$

Para a produção de hidrogénio verde em larga escala, a adoção de sistemas fotovoltaicos com seguimento solar horizontal de um eixo (1-axis tracking) representa uma solução mais eficiente e sustentável em comparação com sistemas fixos. Estes sistemas permitem um aumento da produção anual de eletricidade entre 25 a 35% (KSENG, 2025) ao acompanhar o movimento diário do sol, otimizando a incidência solar nos módulos (KSENG, 2025). Esse ganho traduz-se numa menor área necessária por unidade de energia útil (GWh) entregue aos eletrolisadores, o que é crucial para o planeamento de centrais solares associadas à produção de hidrogénio.

Segundo o National Renewable Energy Laboratory (NREL) (NREL, 2013), a área total média necessária para instalações com seguimento de 1 eixo é de aproximadamente 3,4 hectares por MWac instalado, enquanto a área diretamente ocupada (painéis, inversores, cablagem e acessos) ronda os 2,5 hectares por MWac.

No entanto, como a potência disponível é expressa em MWp (potência de pico em corrente contínua), é necessário convertê-la para MWac (potência útil entregue em corrente alternada). Conforme NREL (2013) o fator típico de conversão é 0,85 entre MWp e MWac, então:

$$\begin{aligned} \text{Potência útil (MWac)} \\ = \text{Potencia de pico (MWp)} \times 0,85 \\ = 35,29 \text{ MWp} \times 0,85 = \pm 30 \text{ MWac} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Com estes dados conseguimos saber a área total estimada e a área diretamente ocupada, sendo que:

$$\begin{aligned} \text{Área total estimada (ha)} \\ = \text{Potencia Instalada (MWac)} \times \text{Fator de área total} \\ = 30 \text{ MWac} \times 3,4 = 102 \text{ hectares} \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\text{Área total ocupada (ha)} \quad (5.17)$$

$$= \text{Potencia Instalada (MWac)} \times \text{Fator de área total}$$

$$= 30\text{MWac} \times 2,5 = 75 \text{ hectares}$$

Estes valores representam uma estimativa robusta da ocupação de solo necessária para a instalação solar, considerando não apenas os painéis, mas também os espaçamentos técnicos, inversores, acessos e infraestruturas de apoio.

Para sabermos o CAPEX e o OPEX, baseamo-nos no estudo de Farracho & Castro (2024), em que eles indicaram que o CAPEX era 598,50€/kWp e de OPEX 17,04€/kWp/ano.

Lembrando que 35,29MWp é a capacidade instalada estimada para o projeto, que o projeto terá uma duração de 30 anos, o espaço para instalação dos painéis e central de hidrogénio foi doado pelo estado e que 80% do capital será financiado com juros de 6% e capital próprio 20% (equity) com um custo de 12% (Lazard, 2024) em que o WACC (*Weighted Average Cost of Capital*) que é o custo médio ponderado de capital que será calculado através da equação:

$$WACC (\%) = (E \times iE) + (D \times iD) \quad (5.18)$$

- $E$  é proporção de equity (capital próprio) (%);
- $iE$  taxa de retorno exigida sobre o equity;
- $D$  é proporção da dívida (%);
- $iD$  é a taxa de juro da dívida;

$$WACC = 0,8 \times 6\% + 0,2 \times 12\% = 4,8 + 2,4 = 7,2\%$$

Esta taxa de 7,2 % representa o retorno mínimo exigido pelo projeto para garantir a sua viabilidade económico-financeira, assegurando a remuneração proporcional dos financiadores e investidores, de acordo com o risco assumido por cada parte.

O CAPEX total e o OPEX anual serão:

$$CAPEX \text{ total} = 598,5\text{€/kWp} \times 35290\text{kWp} = 21121065\text{€}$$

$$OPEX \text{ ANUAL} = 17,04\text{€/kWp} \times 35290\text{kWp} = 601341,6\text{€}$$

Mas para além de saber o CAPEX total e o OPEX anual é necessário perceber quanto um investimento de capital (CAPEX) precisa gerar por ano para recuperar o investimento inicial (incluindo juros). Para isso é necessário recorrer ao CRF (*Capital Recovery Factor*):

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.19)$$

- $i$  é o WACC (Custo Médio Ponderado de Capital);
- $n$  é o número de anos do projeto (vida útil);

Assim sendo, o CRF será aproximadamente 0,0823. Já com o valor CRF conseguimos obter a Anuidade CAPEX, que é a multiplicação do CAPEX total pelo CRF, resultando no valor de 1734623,64 milhões.

O Custo Total Anual é o valor do CAPEX anual mais o OPEX anual, o que dará um valor de 2335965,24€.

## B. Energia da Rede

No segundo semestre de 2024, através dos dados da Eurostat (2024), Portugal registou o maior aumento de eletricidade nos consumidores domésticos dentro dos países da UE, cerca de 14,2%, face ao mesmo período de 2023. Este crescimento deveu-se ao aumento do custo da rede e pela redução dos subsídios governamentais, mas apesar de tudo, o preço da eletricidade em Portugal ainda se mantém abaixo da média da UE (Eurostat, 2024). O aumento de preço não se deu somente a consumidores domésticos, os consumidores não domésticos (industriais) também sofreram esse aumento. Entre o segundo semestre de 2023 e o segundo semestre de 2024, Portugal registou o maior aumento no preço da eletricidade para consumidores não domésticos na União Europeia, com uma subida de 14,7%, considerando todos os impostos e taxas não recuperáveis (Eurostat, 2024).

Conforme já falado anteriormente, para o produto final ser considerado hidrogénio verde, as fontes terão de ser de origem renovável. Por isso, consideremos, então, que a energia da rede é sempre proveniente de energias renováveis.

Conforme também já referido anteriormente, a energia de rede irá ser utilizado durante 75% do dia, em que a quantidade necessária será 158,78GWh/ano.

Para nos orientar na melhor escolha, tentaremos descobrir a melhor potência a contratar. Mediante E-REDES (2021), Portugal está distribuído da seguinte maneira, Tabela 22:

**Tabela 22.** Tipos de Ligação à Rede Elétrica e Suas Aplicações.

| Tipo de ligação   |                             | Potência contratada   | Tensão de alimentação                                   | Utilização (exemplos)                                                   |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Baixa Tensão (BT) | Baixa Tensão Normal (BTN)   | 1,15 kVA a ≤ 41,4 kVA | ××××××                                                  | Pequenos escritórios, residências, lojas, iluminação de rua (ex. Natal) |
|                   | Baixa Tensão Especial (BTE) | >41,4 kVA             | ××××××                                                  | Pequenas e médias empresas                                              |
|                   | Média Tensão (MT)           | >200 kVA              | 10 kV, 15 kV ou 30 kV (mediante localização geográfica) | Indústria                                                               |
| Alta Tensão (AT)  |                             | >10 MVA               | 60 kV                                                   | Grande Indústria                                                        |

Fonte: elaborado pelo autor, adaptado de E-REDES (2021)

Conforme os dados da tabela referida anteriormente, conseguimos perceber que mediante a potência anual que vamos precisar, a opção de “Alta Tensão” será a mais indicada. Verificamos então, conforme a informação disposta no Anexo I, referente a informação do preço da eletricidade para a ligação de “Alta Tensão” (EDP, 2025b), que o preço é de 9,55€/MWh. Assim, o preço anual será:

$$\text{Preço Anual da Energia} \quad (5.20)$$

$$= \text{Energia a utilizar (MWh)} \times \text{Tarifa(€/MWh)}$$

$$\text{Preço Anual de Energia} = 158780 \text{ MWh/ano} \times 9,55 \text{ €/MWh}$$

$$\text{Preço anual de Energia} = 1516349 \text{ €}$$

Para suprir parte das necessidades energéticas da central de produção de hidrogénio, será necessário recorrer ao fornecimento de eletricidade através da rede elétrica nacional. Estimando-se um consumo anual de 158.780 MWh provenientes da rede, e considerando uma tarifa média em Alta Tensão (AT) de 9,55 €/MWh, o custo anual com energia elétrica ascende a aproximadamente 1516349 €.

#### 5.4.2.2 Água a ser consumida

As necessidades de água para a eletrólise variam entre 9 litros/kg H<sub>2</sub> (estequiometria da reação) e 22,4litros/kg de H<sub>2</sub> (dito por fornecedores de equipamentos), estes valores variam mediante a tecnologia, fornecedor e qualidade da água (Simões *et al.*, 2021).

Em média, eletrolisadores alcalinos consomem cerca de 5,70 m<sup>3</sup>/MWh H<sub>2</sub>, enquanto os PEM requerem cerca de 6,33 m<sup>3</sup>/MWh H<sub>2</sub> (Simões *et al.*, 2021). Adicionalmente, se a eletricidade for proveniente de fonte solar fotovoltaica, a limpeza dos painéis representa um consumo adicional de água equivalente a 3–4% do volume usado na eletrólise. (Simões *et al.*, 2021).

A qualidade da água para eletrólise deve ser de alta pureza, como a desmineralizada Tipo I ou II (ASTM - Advancing Standards Transforming Markets) (ASTM, 2019), com condutividade inferior a 5 µS/cm, para evitar danos aos elétrodos e membranas. Impurezas podem comprometer a eficiência do processo, por isso, muitos eletrolisadores incluem sistemas integrados de purificação da água (Simões *et al.*, 2021).

Em Portugal, diversas fontes de água podem ser utilizadas para alimentar o processo de eletrólise, incluindo água superficial (rios, albufeiras), subterrânea (aquíferos), da rede pública, águas residuais tratadas, água de estuário e água do mar. Cada fonte apresenta vantagens e desafios, como a necessidade de garantir continuidade no abastecimento, exigências de tratamento, restrições de uso (como no caso da água subterrânea) ou custos adicionais (como na dessalinização da água do mar).

Conforme já dito anteriormente, um dos grandes objetivos do projeto é usar a água do rio Leça para eletrólise. Inicialmente, aquando da escrita do projeto, não foi verificada a questão da poluição do rio, mas mediante as notícias recentes do Greensavers (2025), irá ser investido no tratamento do rio para acabar com a poluição até 2028. Com base nisso, iremos considerar que não é um rio poluído, havendo na mesma a necessidade de um tratamento, contudo o custo do CAPEX será mais reduzido. Usaremos uma solução híbrida, água superficial (rio Leça) mais água da rede pública.

O rio Leça nasce em Monte Córdova (Santo Tirso), a 475 m de altitude, e percorre cerca de 46,75 km até desaguar no Oceano Atlântico, em Leixões (Matosinhos). Atravessa os concelhos de Santo Tirso, Valongo, Maia e Matosinhos, integrando uma bacia hidrográfica de 190 km<sup>2</sup> (CMMatosinhos, 2017).

A Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro (Diário da República, 2005), aprova a Lei da Água, transpondo para a legislação portuguesa a Diretiva 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho. Esta lei estabelece os critérios para uma gestão sustentável das águas superficiais e subterrâneas, com os objetivos de: proteger e melhorar os ecossistemas aquáticos, promover o uso sustentável da água, reduzir a poluição, mitigar os efeitos de inundações e secas, assegurar o fornecimento de água de qualidade e cumprir os acordos

internacionais relativos à proteção do ambiente aquático. Mediante a lei referenciada, a captação de água do rio Leça terá de ser comunicada e licenciada às Administrações das Regiões Hidrográficas (ARH) (ANECRA, 2025).

De acordo com Simoes *et al.*, (2021), o processo de legalização da captação é muito demorado e existe o risco de escassez de água devido ao grande volume utilizado, daí optarmos na mesma pelo uso de uma percentagem de água do rio, mas numa proporção menor, optando então por usar 80% da água da rede e 20% da água do rio Leça.

Assim sendo, e presumindo que o eletrolisador PEM consome 14 litros de água, contando com as perdas ocorridas ao longo do processo, para produção de 1 litro de hidrogénio, e sabendo que diariamente irá produzir 10000kg de H<sub>2</sub>, a quantidade de água diária necessária será 140000 litros (= 140m<sup>3</sup>/ dia). Diariamente iremos usar 112m<sup>3</sup> (140m<sup>3</sup>\*0,8) de água da rede e 28m<sup>3</sup> (140m<sup>3</sup>\*0,2) do rio Leça.

Através dos dados dos Serviços Municipalizados de Água e de Saneamento da Maia (SMASMAIA, 2025) conseguimos verificar os valores anuais dos serviços de rede que entrarão como CAPEX anual e OPEX anual. SMASMAIA (2025) refere que o valor mensal do contador industrial de 100 mm é 4,4991/dia, anualmente terá um custo de 1642,17€/ano sem IVA (com IVA a 23% é 2019,87€). O valor do “Preço da tarifa de água” Industrial com valor superior a 200 m<sup>3</sup> é 2,6384€ /m<sup>3</sup>/mês s/IVA, o valor anual é 132741,38 € já com Iva incluído. Acresce aos valores já referidos a “Taxa de Recursos Hídricos” que é 0,0410€/m<sup>3</sup>/mês sem IVA, anualmente terá uma taxa de 67,78€/ano com IVA incluído.

De acordo com o estudo analisado, os custos associados à captação, transporte, tratamento e rejeição da água de rios (com necessidade de osmose reversa) são de 1,674 €/m<sup>3</sup> para CAPEX e 1,570 €/m<sup>3</sup> para OPEX (Simoes *et al.*, 2021). Sabendo que 28m<sup>3</sup> são diários, anualmente será necessário 10220m<sup>3</sup>, sendo que o valor anual do CAPEX será 17108€ e OPEX 16045€/ano.

#### **5.4.3 Produção de Oxigénio subproduto**

A eletrólise da água para produção de hidrogénio verde origina oxigénio como subproduto, numa proporção de cerca de 8 kg de O<sub>2</sub> por cada 1 kg de H<sub>2</sub> gerado (Silva, 2021). A valorização deste oxigénio, sempre que tecnicamente exequível, pode contribuir significativamente para a redução do custo nivelado de produção de hidrogénio (LCOH). Contudo, tal valorização exige operações complementares de purificação, secagem e compressão, acarretando custos adicionais em termos de CAPEX e OPEX (Panchawadkar,

2024).

A remoção do hidrogénio residual é efetuada através de leitos catalíticos de platina-cobalto (Pt-Co), que promovem a oxidação completa. A secagem é assegurada por adsorção térmica (TSA), utilizando zeólitas, de forma a garantir níveis de humidade compatíveis com as exigências dos setores industrial e médico (Panchawadkar, 2024).

O OPEX é fortemente influenciado pelo preço da eletricidade e pela taxa de recuperação de oxigénio. O nível de pureza alcançado serve para o uso médico e industrial que é 99,87% (Eckl *et al.*, 2025).

O estudo de Silva (2021) destaca que em Portugal, o aproveitamento do oxigénio pode ser particularmente vantajoso em regiões com elevada procura, como Lisboa, Porto e Coimbra no setor da saúde, e Marinha Grande e Figueira da Foz para a indústria do vidro. A produção de vidro, principal consumidora de oxigénio no país, pode utilizar até 400 kg O<sub>2</sub>/tonelada, enquanto o tratamento de águas residuais consome 50 kg O<sub>2</sub>/tonelada de água tratada. A indústria da celulose consome cerca de 45 kg O<sub>2</sub>/tonelada de pasta, e as unidades siderúrgicas até 435 kg O<sub>2</sub>/tonelada de aço. Silva (2021), refere ainda que o aproveitamento local do oxigénio, através de entrega direta por pipeline, elimina custos de compressão e armazenamento, aumentando significativamente a viabilidade do projeto.

O preço de mercado do oxigénio varia entre 0,08–0,1 €/kg para aplicações industriais e pode atingir 2,38 a 8,8 €/kg no caso do oxigénio medicinal engarrafado (Silva, 2021). A nível internacional, Assunção *et al.* (2024) estimam que a integração da liquefação de oxigénio pode melhorar entre 15% e 20% o retorno económico de plantas de hidrogénio verde, especialmente quando existe licenciamento para a sua venda como produto medicinal.

A Tabela 23 apresenta os principais parâmetros técnicos e económicos associados à liquefação, armazenamento e distribuição do oxigénio subproduto, considerando a sua valorização como coproduto da eletrólise da água.

**Tabela 23.** Parâmetros técnicos e económicos para valorização do oxigénio subproduto da eletrólise

|                                                                                    | Parâmetros                                     | Valor                 | Referencias                 |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <b>Liquefação</b>                                                                  | CAPEX                                          | 8830000€              | (Eckl <i>et al.</i> , 2025) |
|                                                                                    | OPEX (4% CAPEX liquefação)                     | 353200 €              |                             |
|                                                                                    | Consumo específico (450 kWh/ tO <sub>2</sub> ) | 657000€               |                             |
|                                                                                    | custo a (0,05 €/kWh)                           |                       |                             |
|                                                                                    | Compressores (30% do CAPEX liquefação)         | 2649000 €             |                             |
|                                                                                    | Vida projeto                                   | 25 anos               |                             |
| <b>Armazenamento de O<sub>2</sub> líquido (tanque de armazenamento criogénico)</b> | CAPEX                                          | 138000 €              | (Eckl <i>et al.</i> , 2025) |
|                                                                                    | OPEX (2% do CAPEX Tanque de Armazenamento)     | 2760€                 |                             |
|                                                                                    | Vida do projeto                                | 25 anos               |                             |
|                                                                                    |                                                |                       |                             |
| <b>Distribuição</b>                                                                | Número de camiões em 25 anos                   | 2                     | (Eckl <i>et al.</i> , 2025) |
|                                                                                    | Vida útil dos camiões                          | 13 anos               |                             |
|                                                                                    | Custo total (*2)                               | 300000€               |                             |
|                                                                                    | Combustível                                    | 32,6 l/100km (Diesel) |                             |
|                                                                                    | Combustível diário total (dos 2 camiões)       | 156,48 litros         |                             |
|                                                                                    | Custo diesel (1,58€/litro)                     | 247,23 €/dia          |                             |
|                                                                                    | Custo anual combustível                        | 37960€                |                             |
|                                                                                    | Salário do motorista 13€/hora * (3 motoristas) | 113.880 €/ano         |                             |
|                                                                                    |                                                |                       |                             |
|                                                                                    |                                                |                       |                             |
| <b>Venda de O<sub>2</sub></b>                                                      | Industrial                                     | 0,08–0,1 €/kg         | (Silva, 2021)               |
|                                                                                    | Médico (H <sub>2</sub> líquido)                | 2,38 a 8,8 €/kg       |                             |

**Fonte:** Elaborado pelo autor

A produção diária estimada de 80.000 kg de oxigénio justifica a implementação de uma unidade de liquefação com capacidade adequada, cujo investimento inicial ronda os 8,83 milhões de euros, com um OPEX anual estimado em 353 mil euros mediante os dados obtidos pelo estudo de Eckl *et al.*, (2025).

A armazenagem será feita em tanque criogénico com capacidade para 115 toneladas, estimando-se um custo de 138 mil euros e manutenção anual de 2% desse valor. A distribuição será realizada com dois camiões cisterna durante todo o período do projeto, tendo em conta uma vida útil estimada de 13 anos para cada veículo. A operação será assegurada em regime diário com três motoristas em rotação, garantindo a entrega contínua do produto. Os custos logísticos, incluindo combustível e salários, totalizam cerca de 204 mil

euros anuais.

#### 5.4.4 Transporte e Armazenamento do LH<sub>2</sub> no Aeroporto

O transporte de hidrogénio líquido até ao Aeroporto Francisco Sá Carneiro será realizado por camiões-cisterna criogénicos, projetados para manter o H<sub>2</sub> a temperaturas inferiores a -253 °C. Este modo de transporte é comum em curtas distâncias e adequado à realidade do projeto, dado que a unidade de produção será instalada nas imediações (cerca de 5 km). Nazir *et al.*, (2020) indicam que o hidrogénio gasoso é indicado para transporte a curtas distâncias e o líquido, para longas distâncias por meio terrestre ou marítimo. No mesmo no estudo, os autores comparam o preço e características de dois camiões com tanques diferentes, constatando que, mesmo sendo mais caro, o tanque criogénico para transporte consegue transportar maior quantidade e a distâncias maiores sem grandes perdas. Na Tabela 24 colocamos parte do estudo (transporte de hidrogénio criogénico) que foi adaptada a euros (taxa de câmbio de 1 USD = 0,92 €) e foram adicionadas informações relevantes de outro estudo científico de Eckl *et al.*, (2025) relevantes (o preço do diesel e o gasto em litros dos camiões).

**Tabela 24.** Comparação entre modos de transporte rodoviário de hidrogénio

| Parâmetro                                | Camião-cisterna<br>criogénico (lh <sub>2</sub> ) | Fonte                         |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Carga útil (kg)                          | 4000                                             | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Entrega líquida (kg)                     | 4000                                             | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Tempo de carga/descarga (h por viagem)   | 4                                                | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Taxa de ebulição (% por dia)             | 0,3                                              | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Taxa de utilização dos veículos (%)      | 80                                               | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Módulo criogénico / reboque de tubos (€) | 414000                                           | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Chassis / estrutura (€)                  | 55200                                            | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Cabeça motora (trator) (€)               | 82800                                            | Nazir <i>et al.</i> , (2020); |
| Custo total de 4 camiões (€)             | 2208000                                          | Cálculo do autor              |
| Vida útil                                | 13 anos (4 camiões<br>durante o projeto)         | Eckl <i>et al.</i> , (2025)   |
| Nº de funcionários condutores            | 6                                                | Definido pelo autor           |
| Nº de camiões                            | 2 iniciais                                       | Definido pelo autor           |
| Custo por hora por funcionário           | 13 €/h                                           | Definido pelo autor           |

|                                         |               |                             |
|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Combustível (diesel) (32,6 l/100 km)    | 156,48 litros | Eckl <i>et al.</i> , (2025) |
| Consumo diário total (2 camiões)        |               |                             |
| Custo anual com diesel (1,58 €/l)       | 90238,95 €    | Cálculo do autor            |
| Salário anual dos motoristas (3 turnos) | 113880 €      | Definido pelo autor         |

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Iremos usar 4 camiões no total do projeto, sendo 2 inicialmente e, posteriormente, devido ao ciclo de vida ser de 13 anos, serão substituídos por outros 2, em que o CAPEX já inclui os 4. Sobre o combustível, baseamo-nos na informação de Eckl *et al.*, (2025) para tanques para transporte de oxigénio e adaptamos a estes camiões.

Apesar da curta distância entre a central de produção e o Aeroporto Francisco Sá Carneiro (cerca de 5 km), o transporte de hidrogénio líquido exige cuidados especiais devido à sua alta inflamabilidade e ao manuseamento criogénico, o que pode prolongar cada operação logística em até 4 horas por viagem, incluindo o tempo de carregamento, deslocação e descarga.

O transporte poderia ser através de pipeline, conforme já citado anteriormente, mas o preço inicial para instalação será mais caro que o uso de camiões criogénicos (browsers) e por mais que o aeroporto do Porto se torne, mediante a Tabela 9, muito próximo de um médio aeroporto, é de ressaltar a inviabilidade da questão tamanho/custo. Existem desvantagens do uso dos camiões criogénicos, como o trânsito, contudo a distância do aeroporto à central são cerca de 5km e isso não será um empecilho e deixará o investimento mais barato.

Para assegurar o abastecimento contínuo e seguro de hidrogénio líquido às aeronaves, será implementado um sistema de armazenamento criogénico no Aeroporto Francisco Sá Carneiro. Este sistema será composto por três tanques criogénicos, com características idênticas às utilizadas na unidade de produção, garantindo assim uniformidade técnica e operacional, conforme descrito na Tabela 25.

**Tabela 25.** Armazenamento de H<sub>2</sub> líquido no Aeroporto (Tanques criogénicos)

| Parâmetro                                             | Valor                                                | Referências              |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|
| Quantidade                                            | 68 m <sup>3</sup> (aproximadamente 4,8 t) por tanque | (Houchins & James, 2022) |
| N.º de tanques                                        | 3 tanques                                            |                          |
| CAPEX total<br>(115000 €/T H <sub>2</sub> *3 tanques) | 4968000 €                                            |                          |
| OPEX anual<br>(2% do CAPEX total)                     | 298080 €                                             |                          |
| Vida útil do projeto                                  | 25 anos                                              |                          |
|                                                       |                                                      |                          |

Fonte: elaborado pelo autor

A instalação de 3 tanques permite não só aumentar a capacidade de reserva, como também introduzir redundância ao sistema, melhorando a resiliência da operação em caso de manutenção ou falhas técnicas. Cada tanque terá um volume de 68 m<sup>3</sup>, equivalente a aproximadamente 4,8 toneladas de H<sub>2</sub> líquido permitindo armazenar no aeroporto cerca 14,4t de hidrogénio.

## 5.5 Previsão de ganhos

A totalidade do hidrogénio produzido na central, estimada em 10.000 kg por dia (cerca de 3.650.000 kg por ano), será destinada à comercialização. O oxigénio, gerado como subproduto inevitável do processo de eletrólise da água, constitui também uma potencial fonte de receita, com uma produção prevista de aproximadamente 80.000 Nm<sup>3</sup> por dia, considerando a proporção estequiométrica média de 8 kg de oxigénio por cada 1 kg de hidrogénio produzido.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade financeira do projeto, foram definidos três cenários de preço de venda do hidrogénio: 4,00 €/kg, 5,00 €/kg e 3,00 €/kg. Paralelamente, foram analisadas quatro opções de valorização do oxigénio: ausência de valorização; valorização como gás industrial, ao preço de 0,10 €/Nm<sup>3</sup>; valorização mista, com 50% da produção destinada ao setor industrial e 50% ao setor medicinal; e valorização integral como gás medicinal, com um preço de referência de 2,38 €/Nm<sup>3</sup>.

Embora a valorização do oxigénio permita reduzir o custo LCOH e melhorar indicadores económicos como o Valor Atualizado Líquido e a Taxa Interna de Rentabilidade, esta estratégia implica simultaneamente um aumento substancial do investimento inicial, dos

custos operacionais e do consumo energético, devido à necessidade de instalação de sistemas adicionais para purificação, liquefação, armazenamento e transporte do oxigénio.

Importa ainda destacar que os cenários que consideram a valorização medicinal do oxigénio, apesar de mais rentáveis, estão condicionados por regulamentações rigorosas, exigindo certificações técnicas, farmacêuticas e controlo de rastreabilidade. Neste contexto, a valorização como gás industrial revela-se como a alternativa mais viável e exequível a curto prazo, assegurando equilíbrio entre retorno económico e complexidade operacional (Assunção *et al.*, 2024; Panchawadkar, 2024).

## 6 Resultados e Discussão

A secção de resultados reúne os dados ambientais e técnico-económicos obtidos no estudo da aplicação do hidrogénio verde na aviação. Através da modelação da produção por eletrólise e da comparação com o Jet A-1 e o HEFA-SPK na rota Porto–Lisboa, foi possível avaliar o custo por passageiro, as emissões de CO<sub>2</sub> e a viabilidade financeira da central de produção. A análise contemplou ainda diferentes cenários de valorização do oxigénio e sensibilidade a variáveis como o preço de venda, a taxa de desconto e o custo da eletricidade. Os resultados oferecem contributos relevantes para decisões estratégicas e políticas públicas, evidenciando o papel do hidrogénio verde na descarbonização da aviação e a importância de uma abordagem integrada entre ambiente, economia e tecnologia.

### 6.1 Resultados Ambientais percurso Porto-Lisboa

Este estudo calculou as emissões diretas de CO<sub>2</sub> associadas a todas as fases operacionais do voo doméstico entre o Aeroporto Francisco Sá Carneiro (Porto) e o Aeroporto Humberto Delgado (Lisboa), numa distância de cerca de 280 km, utilizando a aeronave Embraer 195 da TAP Air Portugal. Considerou-se uma taxa média de ocupação de 90% (106 passageiros), e apenas as emissões “*tank-to-wake*” (TTW), ou seja, provenientes da combustão do combustível a bordo, ficando de fora as emissões “*well-to-tank*” (WTT), associado as restantes etapas do ciclo de vida do combustível.

Foram analisados três cenários distintos: utilização de Jet A-1, de SAF (HEFA-SPK) e de hidrogénio verde. No cenário base, o consumo de 2.321 litros de Jet A-1 resultou numa emissão de 7334,36 kg de CO<sub>2</sub> por voo. Ao substituir parcialmente por SAF (mistura máxima de 50%, conforme as normas atuais), obteve-se uma redução de 31,68% nas emissões, o que equivale a 2323,23 kg de CO<sub>2</sub> evitados. Embora a literatura aponte para reduções máximas médias de 28% com HEFA-SPK, os valores superiores encontrados neste estudo são coerentes com variações nos parâmetros técnicos utilizados (fatores de emissão, densidade e consumo).

No cenário com hidrogénio verde, assumindo o uso por combustão ou células de combustível, as emissões diretas de CO<sub>2</sub> durante o voo são nulas, configurando o melhor desempenho ambiental. Apesar de potenciais emissões indiretas associadas ao transporte e produção do hidrogénio (nomeadamente se for distribuído por camiões a diesel), estas não foram consideradas nesta análise, dado o foco exclusivo na operação aérea.

Conclui-se que, embora os SAF representem uma melhoria face ao Jet A-1, apenas o

hidrogénio verde tem o potencial de eliminar completamente as emissões diretas de CO<sub>2</sub> durante o voo, evidenciando o seu papel estratégico na descarbonização do setor.

## **6.2 Resultados Financeiros**

No âmbito da análise financeira, optou-se pela utilização de uma folha de cálculo em Excel, na qual foram estimadas todas as premissas relevantes para avaliar a viabilidade económica do projeto. Um dos objetivos principais consistiu em verificar a relevância da valorização do oxigénio, subproduto do processo de eletrólise, como estratégia para reduzir o custo nivelado do hidrogénio (LCOH) e, consequentemente, aumentar a atratividade económica da central.

Na configuração da central sem valorização do oxigénio, procedeu-se à simulação do LCOH com três preços distintos de venda do hidrogénio, de modo a avaliar a viabilidade do projeto em diferentes cenários de mercado.

Por outro lado, na configuração com valorização do oxigénio como subproduto, foi realizada uma análise comparativa com três cenários distintos de distribuição da venda:

- 100% para uso industrial;
- 50% para uso industrial e 50% para uso medicinal;
- 100% para uso medicinal.

Estas simulações permitiram comparar os diferentes valores finais do LCOH e perceber em que circunstâncias a valorização do oxigénio contribui de forma mais significativa para a rentabilidade do projeto.

Após a determinação dos valores de LCOH em cada cenário, procedeu-se à estimativa do custo por quilómetro de voo na rota Porto–Lisboa com recurso ao hidrogénio líquido como combustível. Este valor foi, posteriormente, comparado com os custos correspondentes ao uso de Jet A-1 (combustível fóssil) e de biocombustíveis (SAF), permitindo uma análise integrada da competitividade económica das diferentes alternativas energéticas.

### **6.2.1 Resultados Financeiros central sem opção oxigénio**

Inicialmente estava previsto analisar diretamente os resultados económico-financeiros da central de produção de hidrogénio com integração da valorização do oxigénio como subproduto. Contudo, para avaliar com maior rigor a validade da premissa amplamente discutida na literatura segundo a qual a comercialização do oxigénio pode reduzir significativamente o LCOH, optou-se por realizar, numa primeira fase, a simulação

económica da central sem os sistemas complementares de aproveitamento do oxigénio.

Isto significa que, nesta etapa, não foram considerados os investimentos e custos operacionais associados aos seguintes processos: purificação, liquefação, compressão e armazenamento do oxigénio gerado durante a eletrólise da água. Tal abordagem visa estabelecer uma linha de base de custo, permitindo, posteriormente, comparar o impacto direto da inclusão desse subproduto no desempenho económico da central.

Com base nos dados apurados no Anexo II, o valor do LCOH para a central de hidrogénio sem valorização do oxigénio foi estimado em 5,29 €/kg H<sub>2</sub>. Este valor reflete exclusivamente os custos associados à produção e armazenamento de hidrogénio, com base na utilização de eletricidade de origem renovável (híbrida, com componente solar fotovoltaica e fornecimento da rede com certificação verde), incluindo as componentes de CAPEX, OPEX, e o custo da eletricidade consumida.

Importa destacar que, segundo o *European Hydrogen Observatory* (2024), o valor médio do hidrogénio verde produzido em Portugal por eletrólise com eletricidade 100% renovável atingiu os 5,77 €/kg em 2023, refletindo o impacto do fim de alguns apoios públicos e isenções aplicados até 2022. Já o hidrogénio produzido por eletrólise com energia proveniente da rede elétrica (não totalmente renovável) apresentou, no mesmo período, um custo inferior de 4,71 €/kg. Estes dados permitem reforçar a validade dos resultados obtidos no presente estudo e evidenciam que o valor calculado de 5,29 €/kg para a central sem subproduto se enquadra de forma plausível nas estimativas atuais, embora sem atingir ainda a competitividade dos vetores baseados em gás natural. A integração do oxigénio como subproduto, analisada na fase seguinte do estudo, surge assim como uma estratégia potencial para melhorar a viabilidade económica e reduzir o LCOH final da central.

Além da definição do LCOH, estimado em 5,29 €/kg para a situação sem valorização do oxigénio como subproduto, também foram calculados os principais indicadores de viabilidade económico-financeira do projeto: VAL, TIR e o Período de Retorno do Investimento (PR). Esses indicadores foram analisados considerando três cenários diferentes de preço de venda do hidrogênio durante a duração do projeto (25 anos de operação após 2 anos de construção), ver Tabela 26.

**Tabela 26.** Impacto do Preço de Venda do Hidrogénio nos Indicadores de Viabilidade Económica

|                    | <b>Cenário 1 - hidrogénio<br/>a 3€</b> | <b>Cenário 2 -<br/>hidrogénio a 4€</b> | <b>Cenário 3 -<br/>hidrogénio a 5€</b> |
|--------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>VAL</b>         | -58 011 350,22 €                       | -18 554 930,69 €                       | 20 901 488,83 €                        |
| <b>TIR</b>         | 3%                                     | 7%                                     | 10%                                    |
| <b>PR</b>          | Ano após o projeto                     | Ano após o projeto                     | No ano 2045                            |
| <b>Viabilidade</b> | Não viável                             | Não viável                             | Viável                                 |

**Fonte:** elaborado pelo autor

Importa salientar que, para que o projeto seja considerado viável do ponto de vista financeiro, a TIR deverá ser igual ou superior à taxa de desconto adotada, que neste estudo foi fixada em 8%. Adicionalmente, o VAL deverá apresentar-se positivo, e o PR deverá situar-se dentro do horizonte temporal definido para o projeto, ou seja, até ao final da sua vida útil, nesta caso até 2052.

No cenário mais conservador, com o preço de venda a 3 €/kg, o projeto demonstra ser economicamente inviável, apresentando um VAL bastante negativo e uma TIR abaixo do custo de capital considerado, o que impede o investimento. Este montante de 3 € refere-se à meta de competitividade a longo prazo para rivalizar com combustíveis fósseis como o gás natural.

Com um custo de 4 €/kg, o projeto permanece sem alcançar a viabilidade financeira, apesar de uma diminuição considerável no défice do VAL. Um TIR de 7% neste caso indica que o retorno ainda não compensa o risco do investimento, principalmente em um setor com alto consumo de capital e vulnerável a incertezas regulatórias.

A viabilidade financeira é atingida apenas no cenário mais favorável, com um preço de venda de 5 €/kg, onde se obtém um VAL positivo de aproximadamente 20,9 milhões de euros, uma TIR de 10% e um tempo de retorno (payback) previsto para o ano de 2045. Este preço de venda é um pouco menor que o valor médio do mercado de hidrogénio verde em Portugal em 2023 (5,77 €/kg) (European Hydrogen Observatory, 2024), mas bastante próximo do LCOH estimado neste estudo (5,29 €/kg). Isto prova que o projeto só é financeiramente viável se o hidrogénio puder ser vendido a um preço igual ou superior ao seu custo de produção, especialmente sem receitas adicionais da valorização do oxigénio.

Os resultados indicam que a incorporação do oxigénio como subproduto valorizado pode ser fundamental para otimizar os indicadores financeiros do projeto, possibilitando atingir um ponto de equilíbrio mesmo com preços de venda do hidrogénio abaixo de 5 €/kg.

### 6.2.2 Resultados Financeiros - Central com opção de oxigênio

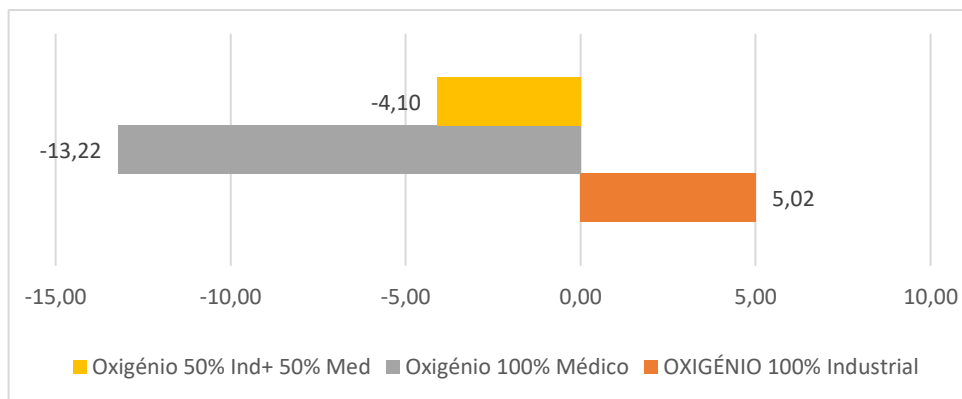
No presente trabalho também foi analisado o efeito da valorização do oxigênio, subproduto gerado através da eletrólise da água, na diminuição do LCOH, pela inclusão de receitas provenientes de sua comercialização. Como mostrado no Anexo III, os preços do oxigênio variam mediante o setor de aplicação, sendo os valores médios considerados neste trabalho 0,10€/Nm<sup>3</sup> para o uso industrial e 2,38€/Nm<sup>3</sup> para uso medicinal.

Com base nisso, três cenários diferentes de valorização foram examinados:

- a) 100% do oxigênio comercializado para a indústria;
- b) 100% para o setor de saúde;
- c) distribuição de 50% para cada um dos setores;

Os resultados estão ilustrados na Figura 17, onde é evidenciado que em todas as situações, o LCOH é inferior ao valor calculado para o cenário sem qualquer valorização do oxigênio (5,29 €/kg).

**Figura 17.** Valores do LCOH com subproduto de oxigênio, mediante o uso de 100% venda industrial, 100% venda medicinal e 50% venda para cada setor.



Fonte: elaborado pelo autor

Este comportamento é causado pela compensação parcial dos custos de produção de hidrogênio pelas receitas oriundas da venda do oxigênio, destacando a relevância de considerar subprodutos na viabilidade financeira do projeto.

Nos cenários com valorização medicinal (total ou parcial), o LCOH reduz-se significativamente, chegando mesmo a registrar valores negativos. Este resultado não significa que o custo de produção seja inferior a zero, mas sim que as receitas com o oxigênio

compensam parte relevante do investimento e da operação, reduzindo o custo atribuível ao hidrogénio. No entanto, tendo em conta o princípio da prudência e os potenciais riscos associados à volatilidade do mercado medicinal, optou-se por assumir como valor de referência o cenário com 100% de venda para o setor industrial, garantindo maior robustez e realismo ao modelo económico.

Apesar da redução do LCOH com a valorização do oxigénio, os indicadores de viabilidade económico-financeira global (VAL, TIR e PR) mostram um desempenho mais fraco quando comparados com o cenário sem subproduto. Esta situação decorre do aumento substancial do CAPEX, OPEX e consumo de eletricidade, necessários para suportar as etapas adicionais associadas ao tratamento do oxigénio, nomeadamente purificação, compressão, liquefação, armazenamento e logística de distribuição. Além disso, os encargos com recursos humanos e transporte (incluindo camiões especializados) também influenciam negativamente os custos operacionais, Tabela 23.

Concretamente, os resultados obtidos para o cenário com valorização do oxigénio (100% uso industrial) e preço de venda do hidrogénio a 5,02 €/kg evidenciam:

- ✓ VAL a 141170,97 €;
- ✓ TIR a 8%;
- ✓ Payback: ano 2052 (último ano do projeto);

Ou seja, embora o LCOH baixe com a valorização do oxigénio, o retorno financeiro é marginal, e a rentabilidade global do projeto encontra-se no limite da viabilidade, exigindo uma exploração integral até ao fim do horizonte temporal definido (27 anos) para recuperar o investimento. Este resultado demonstra que, apesar das vantagens técnicas e ambientais da valorização do subproduto, a viabilidade económica continua fortemente dependente do preço de venda do hidrogénio, sendo o valor de 5,02 €/kg ligeiramente superior ao LCOH do cenário sem oxigénio (5€/kg), mas necessário para sustentar o projeto com as infraestruturas adicionais.

### **6.2.3 Viagem Porto- Lisboa – Custos por Combustível**

Neste estudo, considerou-se o menor valor estimado para o custo do hidrogénio produzido na central com valorização do oxigénio, fixando-se em 5,02 €/kg, correspondente ao cenário em que a totalidade do oxigénio gerado é comercializada para fins industriais. Este valor poderá, no entanto, ser reduzido caso parte do oxigénio seja vendida para o setor medicinal, onde o preço por unidade de volume é substancialmente superior.

No que respeita ao combustível fóssil Jet A-1 (Jet Fuel), foi adotado um valor médio de 2,36 €/kg, com base na análise de preços observados entre dezembro de 2022 e novembro de 2024, conforme ilustrado na Figura 12.

Adicionalmente, foi incluído neste estudo o custo associado a um biocombustível sustentável, o HEFA-SPK, amplamente reconhecido na literatura como uma das tecnologias mais maduras para a produção de SAF. As estimativas de custo para este combustível, contudo, variam significativamente consoante as fontes consultadas. Segundo Van Dyk & Saddler (2021), o HEFA-SPK pode custar entre 3 a 4 vezes mais do que o Jet Fuel convencional. Por sua vez, Cui & Chen (2024) apontam um acréscimo de aproximadamente 120% face ao custo do combustível fóssil. Já o estudo de Peacock *et al.* (2023) fornece estimativas absolutas, situando o preço entre 221 e 332 dólares por barril.

Considerando que um barril contém 159 litros, os preços indicados correspondem a 1,39 \$/L a 2,09 \$/L. Convertendo para euros, à taxa média de câmbio de 1 € = 1,09 \$, obtém-se um intervalo de 1,28 €/L a 1,92 €/L. Para efeito comparativo, o valor médio do Jet Fuel durante o mesmo período foi de 142 \$/barril, o que corresponde a aproximadamente 0,82 €/L. Desta forma, é possível estabelecer que o HEFA-SPK apresenta um custo por litro entre 1,56 a 2,33 vezes superior ao do Jet Fuel. Aplicando esta relação ao valor de referência do Jet Fuel (2,36 €/kg), estima-se que o custo do HEFA-SPK varie entre 3,68 €/L e 5,50 €/L.

Considerando a Tabela 14 referente as características da aeronave Embaer 195, a rota Porto-Lisboa tem um consumo de 2321 litros de Jetfuel, com uma ocupação média de 90% (106 passageiros).

No primeiro cenário, foi considerado o Jet A-1, com preço médio de 2,36€/kg com densidade de 0,804kg/L (ACELEN, 2023), em que o preço por litro ficou 2,95€/L. Nesta rota, houve um gasto total em combustível de 6847,95€. Por passageiro, o gasto foi de 64,62€.

No segundo cenário foi considerado o biocombustível HEFA-SPK, cujo custo é bastante superior ao do JetFuel. Para facilitar os cálculos, optamos por colocar a média dos dois valores referidos que é 4,59€. Assim sendo, chegamos ao valor total de 10653,39€ e de 100,50€ por passageiro.

No terceiro cenário foi analisado o hidrogénio verde, combustível que apresenta uma densidade energética gravimétrica significativamente superior ao Jet-A1, (120MJ/kg para 43MJ/kg), o que representa ter mais energia por unidade de massa. Contudo a sua densidade energética volumétrica é superior (8,5MJ/L para 35 MJ/L de jetfuel), o que significa que

precisa de um volume maior para transportar energia equivalente. Neste sentido, e com base na diferença, serão necessários 51900 litros de LH2 por voo Porto-Lisboa para substituir o Jetfuel, considerando uma densidade de 0,071kg/L, que corresponde a 3684,9kg de hidrogénio. Então, considerando o valor de 5,02€/kg, o custo total do voo é de 18495,20€ e por passageiro é de 174,48€.

### 6.3 Resultados Finais

Com base nos dados e cálculos desenvolvidos ao longo deste estudo, a Tabela 27 apresenta os custos totais estimados por voo na rota Porto–Lisboa, o custo por passageiro, as emissões diretas de CO<sub>2</sub> e o preço médio por litro ou por quilograma (no caso do hidrogénio) para os três principais combustíveis analisados: o Jet A-1, HEFA-SPK e o hidrogénio verde.

**Tabela 27.** Comparação dos custos e emissões por voo na rota Porto–Lisboa para diferentes combustíveis (Jet A-1, HEFA-SPK e Hidrogénio Verde)

| VOO PORTO LISBOA |                 |                          |                                  |                                  |
|------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Combustível      | Preço total (€) | Preço por Passageiro (€) | Emissões de CO <sub>2</sub> (kg) | Preço por litro/kg (€/l ou €/kg) |
| Jet A-1          | 6 847,95 €      | 64,62 €                  | 7 334,36 kg                      | 2,95 €/l                         |
| HEFA-SPK         | 10 653,39 €     | 100,50 €                 | 5 011,13 kg                      | 4,59 €/l                         |
| Hidrogénio verde | 18 495,20 €     | 174,48 €                 | 0,00 kg                          | 5,02 €/kg                        |

**Fonte:** Elaborada pelo autor

A análise demonstra que o Jet A-1 continua a ser, atualmente, a opção mais económica, com um custo total por voo de 6.847,95 € e um custo por passageiro de 64,62 €, mas também a mais poluente, com 7.334,36 kg de CO<sub>2</sub> emitidos por trajeto. O HEFA-SPK, apesar de representar uma melhoria a nível ambiental (com apenas 5011,13 kg de CO<sub>2</sub>), ainda apresenta um custo elevado de 10.653,39 € por voo, o que equivale a 100,50 € por passageiro. Isto reflete os elevados preços atuais dos SAF. No presente cálculo, foi considerado o valor médio de 4,59 €/L, resultante da média ponderada das fontes mais atualizadas disponíveis na literatura.

Já o hidrogénio verde apresenta-se como a opção mais limpa, com zero emissões diretas de CO<sub>2</sub> durante o voo. No entanto, é também a opção mais dispendiosa neste momento, com um custo total de 18.495,20 € por voo, correspondente a 174,48 € por passageiro,

considerando um preço unitário de 5,02 €/kg, baseado no cenário mais conservador da central de produção que inclui valorização parcial do oxigénio como subproduto industrial.

#### 6.4 Análise de sensibilidade

Um dos fatores mais críticos é o LCOH, cuja redução está associada ao custo da eletricidade, à eficiência do eletrolisador e à valorização dos subprodutos. Conforme fora demonstrado anteriormente, o valor do LCOH para a central sem valorização do oxigénio foi 5,29€/kg, enquanto que a inclusão de receitas oriundas da venda de oxigénio para a indústria fez com que o valor reduzisse para 5,02€/kg. Caso o oxigénio seja vendido para o setor médico, este valor irá baixar ainda mais, embora conforme Assunção *et al.* (2024) e Panchawadkar (2024) indicam, a venda para o setor médico envolve riscos elevados devido às exigências legais e à complexidade logística associada.

A viabilidade financeira também se revela sensível ao preço de venda do hidrogénio, como visto no cenário da central sem subproduto oxigénio (Anexo II), onde verificou-se, num cenário de três valores diferentes de venda, em que somente o de 5€/kg atingiu um VAL positivo (20,9 milhões de euros), um TIR 10% e um PR em 2045. Com os outros valores a viabilidade económica é comprometida, com VALs negativos e períodos de retorno economicamente inviáveis. A taxa de desconto exerce um papel determinante nos indicadores financeiros, pois uma variação de mais ou menos 2% pode alterar o valor do VAL, refletindo a sensibilidade do projeto ao custo do capital (OECD, 2024). Tal consideração é particularmente importante em contextos de incerteza macroeconómica ou de financiamento público.

O custo da eletricidade é outra variável com bastante influência, visto representar mais de 60% do custo total do hidrogénio produzido por eletrólise (IEA, 2022b). A adoção de soluções como o autoconsumo fotovoltaico, contratos de fornecimento direto de energia (*Power Purchase Agreements* - PPAs) e a participação em comunidades de energia revela-se estratégica para aumentar a competitividade energética a médio prazo. Estas abordagens permitem reduzir a dependência do mercado grossista, estabilizar os custos com energia e promover o acesso direto a fontes renováveis. O autoconsumo oferece maior previsibilidade de preços, os PPAs asseguram contratos estáveis com produtores renováveis e as comunidades de energia fomentam a produção e partilha local de eletricidade limpa.

Do ponto de vista regulatório, o agravamento progressivo das taxas sobre carbono nomeadamente através do RCLE-EU e das medidas previstas no *Fit for 55*, tende a encarecer

os combustíveis fósseis, promovendo um ambiente mais favorável ao hidrogénio verde e aos SAF (European Commission, 2019). Neste sentido, a análise de sensibilidade deve também considerar diferentes cenários de evolução legislativa, refletindo a crescente pressão regulatória sobre as emissões do setor da aviação.

Para além da questão regulatória, foi o fim da aplicação da taxa reduzida de IVA (6%) para aquisição e instalação de painéis solares a partir de junho de 2025 que compromete o incentivo ao investimento na área sustentável (EDP, 2025a).

A maturidade tecnológica influencia diretamente os custos e a fiabilidade das centrais de hidrogénio. Tecnologias mais maduras tendem a reduzir custos e aumentar a eficiência. Simultaneamente, a economia de escala permite diminuir o CAPEX unitário em projetos de maior capacidade, favorecendo uma redução sustentada do LCOH e reforçando a viabilidade económica futura.

Também é de salientar que qualquer incentivo público, como subsídios, benefícios fiscais podem alterar substancialmente os resultados da análise. Considerou-se, por exemplo, que tanto o local da central de hidrogénio, quanto onde serão instalados os painéis fotovoltaicos, foram dados. Caso não fossem, haveria um custo extra na compra ou aluguer do espaço, o que iria aumentar o CAPEX anual e/ou inicial.

## 6.5 Projetos Futuros

Com base nos resultados obtidos, identificam-se diversas áreas que merecem aprofundamento e continuidade investigativa. Assim, propõem-se os seguintes projetos futuros:

- ✓ Cálculo completo das emissões no ciclo de vida dos combustíveis, no qual deve-se incluir não apenas as emissões “*tank-to-wake*”, mas também as “*well-to-tank*” considerando todas as etapas desde a extração de matérias-primas, produção, transporte, armazenamento e consumo final do hidrogénio, SAF e Jet A-1;
- ✓ Avaliação do impacto ambiental total (incluindo todos os GEE), para além das emissões de CO<sub>2</sub>. É essencial contabilizar outros poluentes gerados, principalmente no uso de motores a combustão adaptados para hidrogénio;
- ✓ Estudo técnico e económico para integração do hidrogénio em voos internacionais;
- ✓ Avaliação da viabilidade da produção de hidrogénio offshore através de plataformas marítimas com energia eólica offshore, reduzindo o impacto sobre o solo disponível em zonas aeroportuárias;

- ✓ Outra linha de investigação futura diz respeito à valorização dos terrenos ocupados por infraestruturas fotovoltaicas. Estudos recentes, como os de Williams *et al.* (2025) e Pascaris *et al.* (2021), demonstram o potencial da integração de sistemas agrivoltaicos, permitindo que a produção de energia solar coexista com atividades agrícolas. Esta abordagem não só maximiza o uso do solo, como também pode gerar receitas adicionais, contribuindo para melhorar a viabilidade económica global do projeto de hidrogénio verde. A exploração desta sinergia entre produção energética e agricultura poderá revelar-se estratégica, sobretudo em regiões com pressão sobre o uso do solo ou interesse em desenvolver economias circulares locais;
- ✓ Avaliar a previsão dos custos do LCOH numa perspetiva futura, nomeadamente para o horizonte de 2040, caso fosse construída uma central de produção de hidrogénio nesse período, considerando os avanços tecnológicos, economias de escala e evolução dos custos energéticos.

## 7 Conclusão

A descarbonização do setor da aviação representa um dos maiores desafios da transição energética global. Este trabalho demonstrou que, apesar dos avanços tecnológicos e das metas ambiciosas estabelecidas por organizações como a ICAO e a União Europeia, a substituição dos combustíveis fósseis por alternativas sustentáveis ainda enfrenta barreiras significativas de natureza económica, regulatória e infraestrutural.

Atualmente, a produção e utilização de hidrogénio verde na aviação permanece economicamente inviável. A ausência de infraestruturas aeroportuárias adaptadas, a inexistência de regulamentação específica para o abastecimento de aeronaves com hidrogénio e a escassez de aeronaves certificadas para operar com este vetor energético constituem barreiras estruturais à sua adoção no curto prazo. Adicionalmente, os elevados custos de investimento inicial, aliados ao aumento dos encargos operacionais, sobretudo relacionados com a liquefação, armazenamento e transporte criogénico, tornam o hidrogénio substancialmente mais dispendioso do que os combustíveis fósseis convencionais.

Um exemplo paradigmático dessa dificuldade é o caso da Universal Hydrogen, uma das empresas pioneiras no desenvolvimento de módulos criogénicos para abastecimento com hidrogénio líquido, que embora tenha deixado um legado tecnológico relevante e avanços significativos no conhecimento do setor, acabou por declarar falência por falta de recursos para viabilizar a continuidade do projeto.

O estudo de caso permitiu quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à rota Porto–Lisboa. Numa única viagem são emitidos cerca de 7.334 kg de CO<sub>2</sub> e, considerando a média diária de oito voos de ida e oito de regresso, o valor diário ascende a aproximadamente 117.350 kg. Projetando estes resultados para um ano, obtém-se um total de cerca de 42.832 toneladas de CO<sub>2</sub> apenas nesta rota doméstica, o que evidencia um impacto ambiental significativo e reforça o potencial de redução de emissões com a substituição do *jet fuel* por hidrogénio verde. A adoção desta alternativa permitiria eliminar essas emissões, contribuindo de forma relevante para as metas de descarbonização do setor da aviação. Contudo, a análise económico-financeira mostra uma limitação importante, dado que o custo médio do bilhete por passageiro aumentaria de 64,62 € para 174,48 €, o que corresponde a um acréscimo de cerca de 170%. Este diferencial de preço revela que, apesar da relevância ambiental, a competitividade do hidrogénio verde depende da implementação de medidas complementares, como incentivos fiscais, subsídios à produção e políticas de

descarbonização mais rigorosas.

Os combustíveis sustentáveis (SAF), como o HEFA-SPK, apresentam-se como uma solução intermédia. Reduzem até 90% das emissões de GEE, não exigem alterações significativas nas aeronaves nem nas infraestruturas aeroportuárias, e podem ser utilizados em mistura com Jet A-1. Contudo, o seu preço continua 120% a 700% superior ao do querosene tradicional, levando muitas companhias aéreas a preferirem pagar penalizações de carbono do que investir em SAF. Esta realidade sublinha a necessidade de políticas públicas mais agressivas, como taxas de carbono elevadas, subsídios à produção e mecanismos de mercado que favoreçam os combustíveis de baixo carbono.

Através da análise de sensibilidade realizada, verificou-se que o sucesso económico da central de produção de hidrogénio está intimamente ligado à valorização do oxigénio como subproduto, ao custo da eletricidade e à escala de produção. A inclusão da venda de oxigénio como gás industrial reduz o LCOH de 5,29 €/kg para 5,02 €/kg. No entanto, mesmo este valor é superior ao preço atual de venda considerado competitivo. Para alcançar a viabilidade económica, o hidrogénio deverá atingir um custo inferior a 3 €/kg, o que só será possível com incentivos públicos robustos e redução de custos tecnológicos até 2050.

Adicionalmente, iniciativas como o programa ReFuelEU Aviation e o GOLIAT da União Europeia estão a estabelecer bases para a futura integração do hidrogénio nos aeroportos. A estratégia europeia também aponta para o hidrogénio como elemento central do mix energético, com destaque para a Península Ibérica, que reúne condições naturais e tecnológicas para se tornar um polo de produção e exportação deste vetor energético.

No futuro próximo, é expectável que o custo de produção de hidrogénio líquido (LH<sub>2</sub>) sofra uma redução superior a 60%, impulsionada pela industrialização em larga escala e pela maturidade tecnológica do setor. Esta tendência poderá tornar o LH<sub>2</sub> significativamente mais competitivo face ao querosene, invertendo o panorama atual. Estudos recentes indicam que, a partir de 2040, o custo do hidrogénio poderá ser inferior ao do Jet A, o que criará condições para a sua adoção em larga escala na aviação comercial.

Deste modo, os resultados deste trabalho permitem concluir que o hidrogénio verde constitui a solução com maior potencial para alcançar a neutralidade carbónica no setor da aviação, embora ainda exija investimentos avultados, incentivos financeiros e uma estrutura política e regulatória favorável. Os SAF surgem como uma alternativa intermédia e transitória, capazes de reduzir substancialmente as emissões de gases com efeito de estufa, mas que, no contexto económico atual, ainda apresentam limitações em termos de

competitividade. Assim, a concretização da transição energética no setor aeronáutico dependerá de uma atuação coordenada entre inovação tecnológica, implementação regulatória, incentivos fiscais e aumento da escala produtiva. O caminho para uma aviação verdadeiramente sustentável dependerá, por isso, das decisões estratégicas tomadas hoje, que deverão criar as bases para viabilizar as soluções tecnológicas de amanhã.

## Referências Bibliográficas

- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- ACELEN. (2023). *FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS*. [https://www.acelen.com.br/2022/wp-content/uploads/2023/05/FISPQ\\_QAV6QB\\_JET-A-QUEROSENE-DE-AVIACAO\\_V01\\_20230414085018.pdf](https://www.acelen.com.br/2022/wp-content/uploads/2023/05/FISPQ_QAV6QB_JET-A-QUEROSENE-DE-AVIACAO_V01_20230414085018.pdf)
- ADENE. (2017). *Sistemas Solares Fotovoltaicos Saiba mais sobre*. <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2017/11/10see-10-sist-fotovoltaico-1.pdf>
- Adler, E. J., & Martins, J. R. R. A. (2023). Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts. *Progress in Aerospace Sciences*, 141, 100922. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100922>
- Adu-Gyamfi, B. A., & Good, C. (2022). Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering*, 9, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100134>
- Aerospace Technology Institute. (2024). *FlyZero*. Aerospace Technology Institute. <https://www.ati.org.uk/flyzero/>
- AGORA. (2023). *Levelised cost of hydrogen Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful*. [https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10\\_Trans4Real/A-EW\\_301\\_LCOH\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10_Trans4Real/A-EW_301_LCOH_WEB.pdf)
- AHC, & ARUP. (2022). *Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water Australian Hydrogen Council Water for Hydrogen Technical Paper*. <https://h2council.com.au/wp-content/uploads/2023/02/221114-Arup-Technical-paper-Water-for-Hydrogen-report->

FINAL.pdf

Ahmad, S., Ouenniche, J., Kolosz, B. W., Greening, P., Andresen, J. M., Maroto-Valer, M. M., & Xu, B. (2021). A stakeholders' participatory approach to multi-criteria assessment of sustainable aviation fuels production pathways. *International Journal of Production Economics*, 238, 108156. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108156>

Ahsan, N., Hewage, K., Razi, F., Hussain, S. A., & Sadiq, R. (2023). A critical review of sustainable rail technologies based on environmental, economic, social, and technical perspectives to achieve net zero emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113621>

Air Transport Action Group. (2021). *WAYPOINT 2050 (2nd ed.)*. *Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century*. <https://aviationbenefits.org/>.

[https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050\\_v2021\\_27sept\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf)

AIRBUS. (2009). *A300-600 - Airplane Characteristics For Airport Planning AC*. <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2365.pdf>

AIRBUS. (2023). *ZEROe*. Airbus.com. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>

AIRBUS. (2024a). *Innovative aviation liquid hydrogen project launched*. Wwww.airbus.com. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-05-innovative-aviation-liquid-hydrogen-project-launched>

AIRBUS. (2024b). *Who we are*. Wwww.airbus.com. <https://www.airbus.com/en/who-we-are>

Amado, J. (2017). *Manual de Investigação Qualitativa em Educação (3ª edição)*. University of Coimbra. <https://doi.org/10.14195/978-989-26-1390-1>

ANA. (2024). *Os nossos Aeroportos | Negócios*. ANA - Aeroportos de Portugal. <https://www.ana.pt/pt/negocios/aviacao/os-nossos-aeroportos>

ANECRA. (2025). *Anecra - Gabinete Técnico - Obrigações Ambientais relativamente à Qualidade da Água*. Anecra.pt. <https://www.anecra.pt/AL/GabineteTecnicoQualidadeAgua.aspx>

Ansell, P. J. (2023). Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability. *Progress in Aerospace Sciences*, 141, 100919. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100919>

APA. (2021). *Acordo de Paris*. Agência Portuguesa Do Ambiente. <https://apambiente.pt/clima/acordo-de-paris>

APA. (2024a). *Emissões de Gases com Efeito de Estufa | Relatório do Estado do Ambiente*. Apambiente.pt. <https://rea.apambiente.pt/content/emiss%C3%B5es-de-gases-com-efeito-de-estufa>

APA. (2024b). *Inventário Nacional de Emissões 2024*. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/Inventarios/20240408/20240327%20memo\\_emiss%C3%B5es\\_2024.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/20240408/20240327%20memo_emiss%C3%B5es_2024.pdf)

APA. (2025). *NATIONAL INVENTORY DOCUMENT 2025 PORTUGAL*. Agência Portuguesa Do Ambiente. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/Inventarios/20250509/nid2025\\_15march.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/20250509/nid2025_15march.pdf)

Assunção, R., Eckl, F., Ramos, C. P., Correia, C. B., & Neto, R. C. (2024). Oxygen liquefaction economical value in the development of the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.205>

ASTM. (2019). *ASTM International - Standards Worldwide*. Astm.org. <https://www.astm.org/>

Banco de Portugal. (2025). *Taxas de juro oficiais e de referência | Banco de Portugal*. [Www.bportugal.pt. https://www.bportugal.pt/page/taxas-de-juro-oficiais-e-de-referencia](https://www.bportugal.pt/page/taxas-de-juro-oficiais-e-de-referencia)

Banco Portugal. (2025). *Economic Bulletin – March 2025 | Banco de Portugal*. Bportugal.pt. <https://www.bportugal.pt/en/publicacao/economic-bulletin-march-2025>

- Barabanova, K. (2024). *ZeroAvia Flight Testing Hydrogen-Electric Powerplant*. ZeroAvia. <https://zeroavia.com/flight-testing/>
- Bell, A., Mannion, L. A., Kelly, M., Ghaani, M. R., & Dooley, S. (2024). Life cycle CO<sub>2</sub>e intensity of commercial aviation with specific sustainable aviation fuels. *Applied Energy*, 382, 125075–125075. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125075>
- Borges, R. P., Franco, F., Serralha, F. N., & Cabrita, I. (2024). Green Hydrogen Production at the Gigawatt Scale in Portugal: A Technical and Economic Evaluation. *Energies*, 17(7), 1638. <https://doi.org/10.3390/en17071638>
- Bose, S. (2023). U.S. sustainable aviation fuel production target faces cost, margin challenges. *Reuters*. <https://www.reuters.com/sustainability/us-sustainable-aviation-fuel-production-target-faces-cost-margin-challenges-2023-11-01/>
- BP. (2022). *Jet fuel | Aviation fuel*. Air BP. <https://www.bp.com/en/global/air-bp/aviation-fuel/jet-fuel.html>
- Braun, M., & Classen, A. B. (2023). Qualitative risk assessment for future hydrogen-enabled airports. *Transportation Research Procedia*, 75, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.12.011>
- Brewer, G. D. (1991). *Hydrogen Aircraft Technology* (1st Edition). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203751480>
- Brewer, G. D., Wittlin, G., Versaw, E. F., Parmley, R., Cima, R., & Walther, E. G. (1981). *Assessment of crash fire hazard of LH sub 2 fueled aircraft*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19830002825/downloads/19830002825.pdf>
- Brewer, G., Morris, R., Lange, R., & Moore, J. (1975). *Study of the Application of Hydrogen Fuel to Long-Range Subsonic Transport Aircraft* NASA CR- 132558. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19790025036/downloads/19790025036.pdf>
- Brito Cruz, C. H., Souza, G. M., & Barbosa Cortez, L. A. (2014). Biofuels for Transport. In

*Future Energy* (pp. 215–244). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-099424-6.00011-9>

Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), 2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>

Calabrese, M., Portarapillo, M., Di Nardo, A., Venezia, V., Turco, M., Luciani, G., & Di Benedetto, A. (2024). Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive Review on Production, Storage, Transport, Utilization, and CFD-Based Consequence and Risk Assessment. *Energies*, 17(6), 1350. <https://doi.org/10.3390/en17061350>

Casarotto Filho, N., & Kopittke, B. H. (2010). *Análise de investimentos* (11th ed.). Atlas.

Christensen, A. (2020). *Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe*. [https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/final\\_icct2020\\_assessment\\_of-\\_hydrogen\\_production\\_costs-v2.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/final_icct2020_assessment_of-_hydrogen_production_costs-v2.pdf)

Çil, M. A., & Tarhan, C. (2024). Investigation of emissions from passenger flights Denizli Çardak Airport, Türkiye. *Air Quality, Atmosphere & Health*. <https://doi.org/10.1007/s11869024015792>

Clarke, D., Flachenecker, F., Guidetti, E., & Pionnier, P.-A. (2022). *CO2 Emissions from air transport: A near-real-time global database for policy analysis*. OECD iLibrary. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/ecc9f16b-en.pdf?expires=1716234695&id=id&accname=oid029566&checksum=DEC4AA9F078CDBDB6D7B77D0A158FA42>

Clean Aviation. (2022). *COSTS OF LH2 “AT THE PUMP” CAN SOON BE DRAMATICALLY LOWER THAN SYNFUEL*. Live.com. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.euractiv.com%2Fwp-content%2Fuploads%2Fsites%2F2%2F2022%2F08%2FCost-of-H2-versus-fossil-fuel-incl-abatement-costs.pptx&wdOrigin=BROWSELINK>

CMMatosinhos. (2017). *Rios e Ribeiros*. CM Matosinhos. <https://www.cm-matosinhos.pt/servicos-municipais/ambiente/agua/rios-e-ribeiros>

Comissão Europeia. (2024a). *Ação da UE para fazer face à crise energética*. Comissão Europeia. [https://commission.europa.eu/topics/energy/eu-action-address-energy-crisis\\_pt](https://commission.europa.eu/topics/energy/eu-action-address-energy-crisis_pt)

Comissão Europeia. (2024b). *Solar energy joint research and innovation agenda with Member States in the context of the European Research Area (ERA)*. [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/3acfa717-b321-4f7d-b8c3-765f507d7de2\\_en?filename=ec\\_rtd\\_swd-2024-160-f1.pdf](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/3acfa717-b321-4f7d-b8c3-765f507d7de2_en?filename=ec_rtd_swd-2024-160-f1.pdf)

Conselho Europeu. (2023a). *Fit for 55*. Conselho Da UE E Do Conselho Europeu. <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/green-deal/fit-for-55/>

Conselho Europeu. (2023b). *Objetivo 55: Conselho adota atos legislativos fundamentais para cumprir as metas climáticas para 2030*. Conselho Europeu - Conselho Da União Europeia. <https://www.consilium.europa.eu/pt/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/>

Cui, Q., & Chen, B. (2024). Cost-benefit analysis of using sustainable aviation fuels in South America. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140556. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140556>

DGEG. (2024). *Energia Solar*. Wwww.dgeg.gov.pt. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-solar/>

DGEG. (2025a). *Estatísticas rápidas das renováveis Portugal - Maio 2025*. Wwww.dgeg.gov.pt. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/publicacoes/estatisticas-rapidas-das-renovaveis/>

DGEG. (2025b). *Estatísticas rápidas dos combustíveis fósseis*. In *DGEG*. <https://www.dgeg.gov.pt/media/mbtlc4ar/dgeg-arc-2025-05.pdf>

Diário da Republica. (2022). *Decreto-Lei n.º 85/2022 de 21 de dezembro*.

<https://files.dre.pt/1s/2022/12/24400/0000200009.pdf>

Diário da República. (2005). *Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro*. Wwww.pgdlisboa.pt.

[https://www.pgdlisboa.pt/leis/lei\\_mostra\\_articulado.php?nid=1191&tabela=leis&ficha=1&pagina=1](https://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=1191&tabela=leis&ficha=1&pagina=1)

Diário da República. (2025). *Decreto-Lei n.º 15/2022 de 14 de janeiro - Organização e o funcionamento do sistema elétrico nacional*. Diariodarepublica.pt. <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/2022-177634029>

Diário da República. (2025b). Decreto-Lei n.º 98/2024, de 29 de novembro. Diariodarepublica.pt. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/98-2024-898378509>

E-REDES. (2021). *Manual de Ligações à rede elétrica e rede pública*. <https://provedordocliente.e-redes.pt/Files/PDF/Manual-de-Ligacoes-a-Rede.pdf>

EASA. (2024). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. EASA Eco. <https://www.easa.europa.eu/eco/caer/topics/market-based-measures/corsia>

EASA. (2025). RELATÓRIO AMBIENTAL DA AVIAÇÃO EUROPEIA 2025 Sumário Executivo e Recomendações. In *EASA*. [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/caer-downloads/EASA\\_EAER\\_2025\\_BROCHURE\\_pt\\_v3.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/caer-downloads/EASA_EAER_2025_BROCHURE_pt_v3.pdf)

Eckl, F., Moita, A., & Costa Neto, R. (2025). Cost optimization of electrolytic oxygen distribution: A mathematical framework with a green steel and hospital case study in Portugal. *Renewable Energy Focus*, 55, 100736. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100736>

ECO. (2022). *Custo do jet fuel dispara 43%. TAP “segurou” parte da subida*. ECO; Eco. <https://eco.sapo.pt/2022/03/09/custo-do-jet-fuel-dispara-43-tap-segurou-risco-de-subida-para-metade-do-que-consome/>

EDP. (2025a). *Alteração do IVA aplicável às soluções de Energia Solar*. EDP Comercial.

<https://www.edp.pt/particulares/apoio-cliente/perguntas-frequentes/pt/solucoes-sustentaveis/energia-solar/alteracao-do-iva-aplicavel-as-solucoes-de-energia-solar/faq-33613/>

EDP. (2025b). *Como são calculados os preços da Eletricidade?* Wwww.edp.pt. <https://www.edp.pt/composicao-precos-eletricidade/>

EEA. (2022). *Transport and environment report 2021 — European Environment Agency*. Wwww.eea.europa.eu. <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>

EHB. (2020). HOW A DEDICATED HYDROGEN INFRASTRUCTURE CAN BE CREATED. In *European Hydrogen Backbone*. [https://ehb.eu/files/downloads/2020\\_European-Hydrogen-Backbone\\_Report.pdf](https://ehb.eu/files/downloads/2020_European-Hydrogen-Backbone_Report.pdf)

Ekici, S., & Sevinc, H. (2021). Understanding a commercial airline company: A case study on emissions and air quality costs. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03471-3>

ERSE. (2021). *Análise de Mercado dos Biocombustíveis 2018-2020 em Portugal*. ERSE. <https://www.erse.pt/media/eknhoezr/relat%C3%B3rio-biocombust%C3%ADveis.pdf>

ERSE. (2025). *Tarifas e preços - eletricidade - ERSE*. Erse.pt. <https://www.erse.pt/atividade/regulacao/tarifas-e-precos-eletricidade/#tarifas-e-precos-regulados>

European Commission. (2019). *The European Green Deal*. Europa.eu. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>

European Commission. (2024). *Ground Operations of LIquid hydrogen Aircraft | GOLIAT Project | Fact Sheet | HORIZON*. CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/101138379>

European Hydrogen Observatory. (2024). *Electrolyser Cost*.

<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fobservatory.clean-hydrogen.europa.eu%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2024-02%2FElectrolyser%2520cost.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK>

Eurostat. (2024). *Electricity price statistics*. Ec.europa.eu.  
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics)

Faaß, R. (2001). *CRYOPLANE Flugzeuge mit Wasserstoffantrieb* (p. 6). [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\\_2001\\_12\\_06\\_Cryoplane.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2001_12_06_Cryoplane.pdf)

Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.003>

Farhana, K., Mahamude, A. S. F., & Kadrigama, K. (2024). Comparing hydrogen fuel cost of production from various sources - a competitive analysis. *Energy Conversion and Management*, 302, 118088–118088. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118088>

Farracho, A., & Castro, R. (2024). Broad-Spectrum Technical and Economic Assessment of a Solar PV Park: A Case Study in Portugal. *Processes*, 12(6), 1143–1143. <https://doi.org/10.3390/pr12061143>

Flyzero. (2022). *HYDROGEN INFRASTRUCTURE AND OPERATIONS Airports, Airlines and Airspace*. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf>

Fu, Z., Lu, L., Zhang, C., Xu, Q., Zhang, X., Gao, Z., & Li, J. (2023). Fuel cell and hydrogen in maritime application: A review on aspects of technology, cost and regulations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103181. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103181>

Fundo Ambiental. (2025). *Vale Eficiência - 2ª Fase*. [Www.fundoambiental.pt](http://www.fundoambiental.pt).  
<https://www.fundoambiental.pt/vale-eficiencia-2-fase/e-balcao.aspx>

Governo. (2022). *Imposto sobre o Rendimento das Pessoas Coletivas (IRC) em Portugal* -

*ePortugal.gov.pt*. Ww2.Gov.pt. <https://www2.gov.pt/cidadaos-europeus-viajar-viver-e-fazer-negocios-em-portugal/impostos-para-atividades-economicas-em-portugal/imposto-sobre-o-rendimento-das-pessoas-coletivas-irc-em-portugal>

Governo de Portugal. (2024). *REPowerEU - PRR - Recuperar Portugal*. PRR - Recuperar Portugal. <https://recuperarportugal.gov.pt/transicao-climatica/repowereu/>

GreenAir. (2024). *Hydrogen aviation pioneer Universal Hydrogen fails, citing lack of funding*. GreenAir News. <https://www.greenairnews.com/?p=5860>

Greensavers. (2025). *Investimento de 17,75ME em Valongo para melhorar qualidade da água do Rio Leça*. Green Savers. <https://greensavers.sapo.pt/investimento-de-1775me-em-valongo-para-melhorar-qualidade-da-agua-do-rio-leca/>

Hematpur, H., Abdollahi, R., Rostami, S., Haghighi, M., & Blunt, M. J. (2022). Review of underground hydrogen storage: Concepts and challenges. *Advances in Geo-Energy Research*, 7(2), 111–131. <https://doi.org/10.46690/ager.2023.02.05>

Hoelzen, J., Flohr, M., Silberhorn, D., Mangold, J., Bensmann, A., & Hanke-Rauschenbach, R. (2022). H2-powered aviation at airports – Design and economics of LH2 refueling systems. *Energy Conversion and Management: X*, 14, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100206>

Hoelzen, J., Koenemann, L., Kistner, L., Schenke, F., Bensmann, A., & Hanke-Rauschenbach, R. (2023). H2-powered aviation – Design and economics of green LH2 supply for airports. *Energy Conversion and Management: X*, 20, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100442>

Hoelzen, J., Silberhorn, D., Zill, T., Bensmann, B., & Hanke-Rauschenbach, R. (2022). Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 3108–3130. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>

Houchins, C., & James, B. (2022). *Hydrogen Storage Cost Analysis*.  
[https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review22/st235\\_houchins\\_2022\\_p-pdf.pdf?Status=Master](https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review22/st235_houchins_2022_p-pdf.pdf?Status=Master)

Hughes, C., & Gear, C. (2022). *Realising Zero-Carbon Emission Commercial Flight OUR VISION FOR ZERO-CARBON EMISSION AIR TRAVEL*. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-ALL-REP-0004-FlyZero-Our-Vision-for-Zero-Carbon-Emission-Air-Travel.pdf>

Hwang, J., Maharjan, K., & Cho, H. (2023). A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(74). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.024>

Hydrogen Council, & McKinsey & Company. (2022). *Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization*. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf>

Hydrogen Observatory. (2024). *Homepage | European Hydrogen Observatory*. European Hydrogen Observatory. <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/>

Hydrogen Valley. (2024). *H2 Valley map | H2Valleys*. H2v.eu. [https://h2v.eu/hydrogen-valleys?populate=&field\\_ch\\_1\\_q\\_10\\_value=PT&field\\_value\\_chain\\_coverage\\_target\\_id=All&field\\_end\\_uses\\_target\\_id=All](https://h2v.eu/hydrogen-valleys?populate=&field_ch_1_q_10_value=PT&field_value_chain_coverage_target_id=All&field_end_uses_target_id=All)

IATA. (2024a). *Aviation contrails and their climate effect - Tackling uncertainties and enabling solutions*. <https://www.iata.org/contentassets/726b8a2559ad48fe9dec6f2534549a6/aviation-contrails-climate-impact-report.pdf>

IATA. (2024b). *Jet Fuel Price Monitor*. <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>

IATA. (2025). *LATA Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting and Reporting Methodology LATA Sustainable Aviation Fuel (SAF) Accounting & Reporting Methodology*.

<https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/iata-sustainable-aviation-fuel-saf-accounting--reporting-methodology.pdf>

ICAO. (2018). Anexo 16 — Protección del medio ambiente. *Elibrary.icao.int*, IV (Primera edición)).

<https://elibrary.icao.int/reader/446700/&returnUrl%3DaHR0cHM6Ly9lbGlicmFyeS5pY2FvLmludC9wcm9kdWN0LzQ0NjcwMCUzRl9nbCUzRDEqMW5md3hsaypfZ2EqTVRJMk1qRTVNekF4TkM0eE56RTNOakk1T0RVNSpfZ2FfOTkyTjNZRExCUSpNVGN4T1RNMU9UWTRPUzQxTGpFdU1UY3hPVE0xT1RjNU5pNHdMakF1TUEuLg%3D%3D?productType=ebook>

ICAO. (2019a). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Icao.int. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>

ICAO. (2019b). *ICAO Carbon Emissions Calculator*. International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx>

ICAO. (2023). *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology*. [https://applications.icao.int/icec/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator\\_v12-2023.pdf](https://applications.icao.int/icec/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v12-2023.pdf)

ICAO. (2024). *Conversion processes*. Wwww.icao.int. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen Seizing today's opportunities*. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf)

IEA. (2022a). *Global Hydrogen Review 2022*. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

IEA. (2022b). *Global Hydrogen Review 2022 – Analysis*. IEA.

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>

IEA. (2023a). *Global deployment of low-emission hydrogen in the Net Zero Scenario, 2021-2050 – Charts – Data & Statistics*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-deployment-of-low-emission-hydrogen-in-the-net-zero-scenario-2021-2050>

IEA. (2023b). *Global Hydrogen Review 2023*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

IEA. (2025). *CO2 emissions in aviation in the Net Zero Scenario, 2000-2030 – Charts – Data & Statistics*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-in-aviation-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>

Indexmundi. (2019). *Combustível de jato - Preço Mensal (Euro por Galão) - Preços das Mercadorias*. Indexmundi.com. [https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=combust%C3%ADvel-de-jato&meses=60&moeda=eur#google\\_vignette](https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=combust%C3%ADvel-de-jato&meses=60&moeda=eur#google_vignette)

Indexmundi. (2024). *Combustível de jato - Preço Mensal (Euro por Galão) - Preços das Mercadorias*. Indexmundi.com. [https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=combust%C3%ADvel-de-jato&meses=60&moeda=eur#google\\_vignette](https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=combust%C3%ADvel-de-jato&meses=60&moeda=eur#google_vignette)

INE. (2025). *MOVIMENTO DE PASSAGEIROS NOS AEROPORTOS NACIONAIS AUMENTOU 4,3% EM 2024*. [https://www.ine.pt/ngt\\_server/attachfileu.jsp?look\\_parentBoui=712763420&att\\_display=n&att\\_download=y](https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=712763420&att_display=n&att_download=y)

IPCC. (2006). *MOBILE COMBUSTION - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc->

nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\_Volume2/V2\_3\_Ch3\_Mobile\_Combustion.pdf

IRENA. (2020). *SCENARIOS FOR THE ENERGY TRANSITION Global experience and best practices*. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA\\_LTES\\_Global\\_experience\\_and\\_best\\_practice\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_LTES_Global_experience_and_best_practice_2020.pdf)

IRENA. (2022). *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part III – Green hydrogen cost and potential*. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA\\_Hydrogen\\_Trade\\_to\\_Meet\\_the\\_1.5C\\_Climate\\_Goal\\_Part\\_III\\_Green\\_Hydrogen\\_Cost\\_and\\_Potential\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Hydrogen_Trade_to_Meet_the_1.5C_Climate_Goal_Part_III_Green_Hydrogen_Cost_and_Potential_2022.pdf)

ITF. (2021). Decarbonising Air Transport: Acting Now for the Future. *International Transport Forum Policy Papers*, 94. OECD Publishing, Paris. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-air-transport-future.pdf>

Karayel, G. K., & Dinçer, I. (2024). A study on green hydrogen production potential of Canada with onshore and offshore wind. *Journal of Cleaner Production*, 140660–140660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140660>

Kelle, U. (2006). Combining qualitative and quantitative methods in research practice: purposes and advantages. *Semantic Scholar - Qualitative Research in Psychology*, 3(4). <https://doi.org/10.1177/1478088706070839>

Khan, M. A., Young, C., MacKinnon, C., & Layzell, D. (2021). The Techno- Economics of Hydrogen Compression. *TRANSITION ACCELERATOR TECHNICAL BRIEFS*, 1. [https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2023/04/TA-Technical-Brief-1.1\\_TEEA-Hydrogen-Compression\\_PUBLISHED.pdf](https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2023/04/TA-Technical-Brief-1.1_TEEA-Hydrogen-Compression_PUBLISHED.pdf)

Kim, H., & Teter, J. (2023). *Aviation*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>

KSENG. (2025). *Sistema de rastreamento solar de eixo único horizontal KST-1P One Portrait Fabricantes*. Xmkseng.com. [https://pt.xmkseng.com/kst-1p-one-portrait-horizontal-single-axis-solar-tracking-system\\_p52.html](https://pt.xmkseng.com/kst-1p-one-portrait-horizontal-single-axis-solar-tracking-system_p52.html)

Lazard. (2024). *LEVELIZED COST OF ENERGY+*.  
[https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-\\_vf.pdf](https://www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf)

LCG. (2023). *TravelBI by Turismo de Portugal - Emissões CO2 no Transporte Aéreo*. TravelBi by Turismo de Portugal . <https://travelbi.turismodeportugal.pt/sustentabilidade/emissoes-co2-no-transporte-aereo/>

MacDonald, C. (2012). Understanding Participatory Action Research: A Qualitative Research Methodology Option. *The Canadian Journal of Action Research*, 13(2), 34–50.  
<https://doi.org/10.33524/cjar.v13i2.37>

Maniatopoulos, P., Andrews, J., & Shabani, B. (2015). Towards a sustainable strategy for road transportation in Australia: The potential contribution of hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.088>

McKinsey & Company, Gulli, C., Heid, B., Noffsinger, J., & Waardenburg, M. (2024). *Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook | McKinsey*. [Www.mckinsey.com. https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook](https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook)

Monteiro, L. M. B. (2021). *Tecnologias de Produção de Hidrogénio Verde - Estudo Energético e Viabilidade Económica*. <http://hdl.handle.net/10400.22/18322>

Moreira, P. A. G. (2023). Adesão ao hidrogénio na mobilidade em Portugal. In *Handle.net*. <http://hdl.handle.net/10400.14/42609>

MTU Aero Engines AG. (2024). *MTU AEROREPORT*. [MTU AEROREPORT. https://aeroreport.de/en/good-to-know/a-brief-guide-how-the-flying-fuel-cell-works](https://aeroreport.de/en/good-to-know/a-brief-guide-how-the-flying-fuel-cell-works)

Nasser, M., & Hassan, H. (2024). Egyptian green hydrogen Atlas based on available wind/solar energies: Power, hydrogen production, cost, and CO2 mitigation maps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 487–501.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.127>

Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M. E., Flox, C., Chavan, S., Shi, X., Kauranen, P., Kallio, T., Maia, G., Tammeveski, K., Lympieropoulos, N., Carcadea, E., Veziroglu, E., Iranzo, A., & Kannan, A. M. (2020). Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20693–20708. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.241>

Nnabuiife, S. G., Hamzat, A. K., Whidborne, J., Kuang, B., & Jenkins, K. W. (2024). Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: A technology review for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.342>

Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2021). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13(1), 298.

NREL. (2013). *Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States*. Nrel.gov. <https://docs.nrel.gov/docs/fy13osti/56290.pdf>

OECD. (2024). Bridging the clean energy investment gap. *OECD Environment Working Papers*. <https://doi.org/10.1787/1ae47659-en>

Oesingmann, K., Grimme, W., & Scheelhaase, J. (2024). Hydrogen in aviation: A simulation of demand, price dynamics, and CO2 emission reduction potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.241>

Osman, A. I., Mahmoud Nasr, Eltaweil, A. S., Hosny, M., Farghali, M., Al-Fatesh, A. S., Rooney, D. W., & Eman. (2024). Advances in hydrogen storage materials: harnessing innovative technology, from machine learning to computational chemistry, for energy storage solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.223>

Panchawadkar, D. (2024). *Degree project in Chemical Engineering for Energy and Environment Second Cycle, 30 Credits REVIEW OF OPPORTUNITIES TO VALORISE THE OXYGEN GENERATED FROM WATER ELECTROLYSIS*. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1901182/FULLTEXT01.pdf>

Papadias, D. D., Peng, J.-K., & Ahluwalia, R. K. (2021). Hydrogen carriers: Production, transmission, decomposition, and storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24169–24189. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.002>

Paraschi, E. P., Poulaki, I., & Papageorgiou, A. (2024). Sustainability challenges in airlines contemporary environmental management. *Journal of Air Transport Management*, 118, 102616. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102616>

Parlamento Europeu. (2021). *BRIEFING Progressos da UE em matéria de ação climática - Ponto de situação* *nos* *Estados-Membros*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/696196/EPRS\\_BRI\(2021\)696196\\_PT.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/696196/EPRS_BRI(2021)696196_PT.pdf)

Parlamento Europeu e do Conselho. (2018). *DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. Europa.eu. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

Parlamento Europeu e do Conselho. (2023a). *DIRETIVA (UE) 2023/2413 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO*. Eur-Lex.europa.eu. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:L\\_202302413](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202302413)

Parlamento Europeu e do Conselho. (2023b). *REGULAMENTO (UE) 2023/2405 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO*. Europa.eu - Jornal Oficial Da União Europeia. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:L\\_202302405](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202302405)

Pascaris, A. S., Schelly, C., Burnham, L., & Pearce, J. M. (2021). Integrating solar energy with

agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. *Energy Research & Social Science*, 75, 102023. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102023>

Pashchenko, D. (2024). Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? *Renewable Energy*, 223, 120033–120033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120033>

Patterson, J. (2024). *United Airlines Is Betting Big on a Pricey Green Aviation Fuel*. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/united-airlines-is-betting-big-on-a-pricey-green-aviation-fuel/>

Peacock, J., Cooper, R., Waller, N., & Richardson, G. (2023). Decarbonising aviation at scale through synthesis of sustainable e-fuel: A techno-economic assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.094>

Pessanha Santos, N. (2022). Hydrogen in the Portuguese Navy: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(66), 28684–28698. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.180>

Petronilho, A. (2022). *Subida do jet fuel ameaça retoma da aviação em 2023*. *Jornaldenegocios.pt*; *Jornal de Negócios*. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/transportes/aviacao/detalhe/subida-do-jet-fuel-ameaca-retoma-da-aviacao-em-2023>

Pordata. (2025). *Passageiros transportados por via aérea - nacional e internacional*. PORDATA. <https://www.pordata.pt/pt/estatisticas/transportes/por-ar/passageiros-transportados-por-aerea-nacional-e-internacional>

PortoAirport. (2025). *Porto Aeroporto Factos e números*. Porto Aeroporto. <https://portoairport.com/pt-pt/estatisticas/>

Portugal. (2019). Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019. In *Diário da República n.º*

125/2019, Série I de 2019-07-01. <https://files.dre.pt/1s/2019/07/12300/0320803299.pdf>

Portugal. (2020a). *Lei n.º 75-B/2020, de 31 de dezembro. Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE): Atualiza as taxas previstas no artigo 27.º do Decreto-Lei n.º 93/2010, de 27 de julho, nos termos do seu artigo 319.º*. Diário Da República N.º 253/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-31. . <https://dre.tretas.org/dre/277822/decreto-lei-93-2010-de-27-de-julho>

Portugal. (2020b). *Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de julho. Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC)*. Diário Da República N.º 132/2020, Série I de 2020-07-10. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/53-2020-137618093>

Portugal. (2021a). *Lei n.º 98/2021, de 31 de dezembro. Lei de Bases do Clima*. In *Diário da República n.º 251/2021, Série I de 2021-12-31*. <https://files.dre.pt/1s/2021/12/25300/0000500032.pdf>

Portugal. (2021b). *Portaria n.º 38/2021 - Cria as taxas de carbono sobre as viagens aéreas e marítimas*. Diário Da República N.º 32/2021, Série I de 2021-02-16. <https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/portaria/2021-158240165>

Portugal. (2023). *Portaria n.º 15/2023, de 4 de janeiro*. Diário Da República N.º 3/2023, Série I de 2023-01-04. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/15-2023-205689383>

Portugal. (2024). *Despacho n.º 5971-A/2024, de 27 de maio*. Diário Da República N.º 102/2024, Série II de 2024-05-27. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/5971-a-2024-867249751>

Portugal. (2025). *Resolução do Conselho de Ministros n.º 147/2024, de 28 de outubro*. [Diariodarepublica.pt. https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/147-2024-893148874](https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/147-2024-893148874)

Rep. Portuguesa. (2025). *Portugal mobiliza até 15 milhões de euros para descarbonizar a aviação*. [Portugal.gov.pt](https://portugal.gov.pt).

<https://www.portugal.gov.pt/pt/gc24/comunicacao/comunicado?i=portugal-mobiliza-ate-15-milhoes-de-euros-para-descarbonizar-a-aviacao>

Riedel, R., Pedro, G., & WORLD ECONOMIC FORUM. (2023). *Target True Zero: Delivering the Infrastructure for Battery and Hydrogen-Powered Flight A P R I L 2 0 2 3*.  
[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Target\\_True\\_Zero\\_2023.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Target_True_Zero_2023.pdf)

Ritchie, H., & Rosado, P. (2022). *Which countries have put a price on carbon?* Our World in Data.  
<https://ourworldindata.org/carbon-pricing>

Ruihan, L., Hu, F., Xia, T., Li, Y., Zhao, X., & Zhu, J. (2024). Progress in the application of first principles to hydrogen storage materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56, 1079–1091. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.259>

Şen, M., & Özcan, M. (2023). Technoeconomic Analysis of 1 MWp Grid Connected Solar Power Plant in Konya (Türkiye). *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 30(6).  
<https://doi.org/10.17559/tv-20220922092738>

Sharmina, M., Edelenbosch, O. Y., Wilson, C., Freeman, R., Gernaat, D. E. H. J., Gilbert, P., Larkin, A., Littleton, E. W., Traut, M., van Vuuren, D. P., Vaughan, N. E., Wood, F. R., & Le Quéré, C. (2020). Decarbonising the critical sectors of aviation, shipping, road freight and industry to limit warming to 1.5–2°C. *Climate Policy*, 21(4), 1–20.  
<https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1831430>

Silva, A. M. (2021). *Green Hydrogen and Oxygen Economy developments in Portugal*.  
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/memec/dissertacao/1691203502344781>

Silva, C. M., Ferreira, A. F., & Bento, J. P. C. (2014). Impact of Hydrogen in the Road Transport Sector for Portugal 2010-2050. *Energy Procedia*, 58, 207–214.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.430>

Simões, S. G., Catarino, J., Picado, A., Lopes, T. F., di Bernardino, S., Amorim, F., Gírio, F., Rangel, C. M., & Ponce de Leão, T. (2021). Water availability and water usage solutions for

electrolysis in hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128124.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128124>

Simões, S., Amorim, F., Catarino, J., Rangel, C., Lopes, T., Gírio, F., Picado, A., & Ponce De Leão, T. (2021). *ÁGUA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE (RENOVÁVEL) VIA ELETRÓLISE EM PORTUGAL Junho 2021 QUAIS AS FONTES DE ÁGUA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE EM PORTUGAL?*  
[https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2021/10/PB\\_UER\\_Fontes\\_de\\_Agua\\_para\\_H2\\_2021\\_PT\\_v7.pdf](https://www.lneg.pt/wp-content/uploads/2021/10/PB_UER_Fontes_de_Agua_para_H2_2021_PT_v7.pdf)

Smartenergy, & Campos, P. (2023). *Green H2 adding value to local ecosystems*.  
<https://www.apren.pt/contents/documents/pedro-guedes-de-campos-smartenergy.pdf>

SMASMAIA. (2025). *Tarifário Normal*. Smasmaia.pt.  
<https://www.smasmaia.pt/atendimento/tarifarios/modelos-tarifarios-dos-smas-da-maia-2025/tarifario-normal>

Soja, R. J., Gusau, M. B., Ismaila, U., & Garba, N. N. (2023). Comparative analysis of associated cost of nuclear hydrogen production using IAEA hydrogen cost estimation program. *International Journal of Hydrogen Energy*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.133>

Soone, J., & Zlotowski, K. (2022). *BRIEFING EU Legislation in Progress Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport*.  
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS\\_BRI\(2022\)698900\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI(2022)698900_EN.pdf)

Stalnaker, T., Usman, K., Alport, G., Buchanan, A., & Taylor, A. (2023). *Airline Economic Analysis 2022-2023*. <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliverwyman/v2/publications/2023/may/Airline-Economic-Analysis-2022-2023.pdf>

Steergroup. (2024). *Analysing the costs of hydrogen aircraft*. Energycentral.com.

<https://energycentral.com/system/files/ecc/nodes/610218/study-analysing-the-costs-of-hydrogen-aircraft.pdf>

Su, J., Wu, H., Tsui, K. W. H., Fu, X., & Lei, Z. (2023). Aviation resilience during the COVID-19 pandemic: A case study of the European aviation market. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 177, 103835. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103835>

Su-ungkavatin, P., Tiruta-Barna, L., & Hamelin, L. (2023). Biofuels, electrofuels, electric or hydrogen?: A review of current and emerging sustainable aviation systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 96, 101073. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101073>

Sustainable Aviation. (2023). *NET ZERO CARBON ROAD-MAP SUMMARY REPORT Enabling delivery of a UK-led zero carbon aviation revolution SUSTAINABLE AVIATION*. [https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2023/04/SA9572\\_2023CO2RoadMap\\_Brochure\\_v4.pdf](https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2023/04/SA9572_2023CO2RoadMap_Brochure_v4.pdf)

TAP. (2023). *Compromisso ambiental — institucional*. Institucional | TAP Air Portugal. <https://www.tapairportugal.com/pt/sustentabilidade/compromisso-ambiental>

TAP. (2024a). *Frota da TAP - Explore os aviões TAP*. [Www.flytap.com](http://www.flytap.com). <https://www.flytap.com/pt-pt/a-bordo/conhecer-a-frota?ctseg=tap-express>

TAP. (2024b). *Sustentabilidade — Institucional*. Institucional | TAP Air Portugal. <https://www.tapairportugal.com/pt/sustentabilidade>

Thonemann, N., Pierrat, E., Dudka, K. M., Saavedra-Rubio, K., Tromer Dragsdahl, A. L. S., & Laurent, A. (2024). Towards sustainable regional aviation: Environmental potential of hybrid-electric aircraft and alternative fuels. *Sustainable Production and Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.013>

Timperley, J. (2022). Como se formam os “rastros de nuvem” que aviões deixam no céu?. *BBC News Brasil*. <https://www.bbc.com/portuguese/vert-fut-62753292>

Tiwari, S., Pekris, M. J., & Doherty, J. J. (2024). A review of liquid hydrogen aircraft and

propulsion technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 57, 1174–1196.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.263>

Town, N., Burrows, E., & FlyZero. (2022). *UK CAPABILITY IN ZERO-CARBON AIRCRAFT TECHNOLOGIES*. [https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/01/FZO-IST-REP-0047-UK-Capability-and-Opportunities\\_v1.0.pdf](https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/01/FZO-IST-REP-0047-UK-Capability-and-Opportunities_v1.0.pdf)

Tractebel, & Hincio. (2017). *STUDY ON EARLY BUSINESS CASES FOR H2 IN ENERGY STORAGE AND MORE BROADLY POWER TO H2 APPLICATIONS*.  
[https://hsweb.hs.uni-hamburg.de/projects/star-formation/hydrogen/P2H\\_Full\\_Study\\_FCHJU.pdf](https://hsweb.hs.uni-hamburg.de/projects/star-formation/hydrogen/P2H_Full_Study_FCHJU.pdf)

Turismo de Portugal. (2024). *Visão geral - dados preliminares 2023*. [Www.turismodeportugal.pt](http://www.turismodeportugal.pt).  
[https://www.turismodeportugal.pt/pt/Turismo\\_Portugal/visao\\_geral/Paginas/default.aspx](https://www.turismodeportugal.pt/pt/Turismo_Portugal/visao_geral/Paginas/default.aspx)

U.S. Department of Energy. (2023). *Alternative Fuels Data Center: Sustainable Aviation Fuel*.  
[Afdc.energy.gov](https://afdc.energy.gov). <https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel>

UK Sustainable Aviation. (2023). *Roadmap for the development of the UK SAF industry An ICF Report for UK Sustainable Aviation*. <https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2023/04/Sustainable-Aviation-SAF-Roadmap-Final.pdf>

UNFCCC. (2015). *The Paris Agreement*. United Nations Climate Change; United Nations.  
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

Universal Hydrogen. (n.d.). *Universal Hydrogen | Fueling Carbon-Free Flight*. Universal Hydrogen. <https://hydrogen.aero/>

Universal Hydrogen. (2024). *Universal Hydrogen Successfully Powers Megawatt-Class Fuel Cell Powertrain Using Company's Proprietary Liquid Hydrogen Module | Universal Hydrogen*. Universal Hydrogen. <https://hydrogen.aero/press-releases/universal-hydrogen-successfully-powers->

megawatt-class-fuel-cell-powertrain-using-companys-proprietary-liquid-hydrogen-module/  
 US Department of Energy. (2024). *Hydrogen Storage*. Energy.gov.  
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

Van Dyk, S., & Saddler, J. (2021). *Progress in Commercialisation of Biojet fuels/SAF: Technologies, potential and challenges*. <https://www.icabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/07/Van-Dyk-Saddler-IEA-Bioenergy-T39-Webinar-13-July-2021-SvanDyk-publish.pdf>

Vaz, V. D. (2018). *Descarbonização do setor ferroviário : proposta para linhas não eletrificadas* [[s.n.]].  
<https://catalogo.biblioteca.utad.pt/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=78137>

Watson, M. J., Machado, P., da Silva, A. V., Rivera, Y., Ribeiro, C., Nascimento, C., & Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141472.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472>

Williams, H. J., Wang, Y., Yuan, B., Gómez, M. I., Vanden Heuvel, J., & Zhang, K. M. (2025). Bringing solar to agriculture: An interdisciplinary design and analysis of a Concord grape agrivoltaic system. *Applied Energy*, 393, 126021.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126021>

World Economic Forum. (2021). *4 Technologies Driving The Green Hydrogen Revolution*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/4-technologies-accelerating-green-hydrogen-revolution/>

World Economic Forum. (2023a). *7 reasons why Spain and Portugal are about to become a green hydrogen powerhouse*. World Economic Forum.  
<https://www.weforum.org/agenda/2023/01/spain-portugal-green-hydrogen-powerhouse-davos23/>

World Economic Forum. (2023b). *Target True Zero: Delivering the Infrastructure for Battery and Hydrogen-Powered Flight*. World Economic Forum.

<https://www.weforum.org/publications/target-true-zero-delivering-the-infrastructure-for-battery-and-hydrogen-powered-flight/>

Yin, L., Yang, H., & Ju, Y. (2024). Review on the key technologies and future development of insulation structure for liquid hydrogen storage tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 57, 1302–1315. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.093>

Yusaf, T., Faisal Mahamude, A. S., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Farhana, K., Al Dhahad, H., & Abu Talib, A. R. (2023). Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086>

ZeroAvia. (2023a). *The Future of Zero-Emission, Hydrogen-Electric Flight*. [https://zeroavia.com/wp-content/uploads/2023/07/ZeroAvia\\_Brochure\\_DIGITAL-2023-06-2.pdf](https://zeroavia.com/wp-content/uploads/2023/07/ZeroAvia_Brochure_DIGITAL-2023-06-2.pdf)

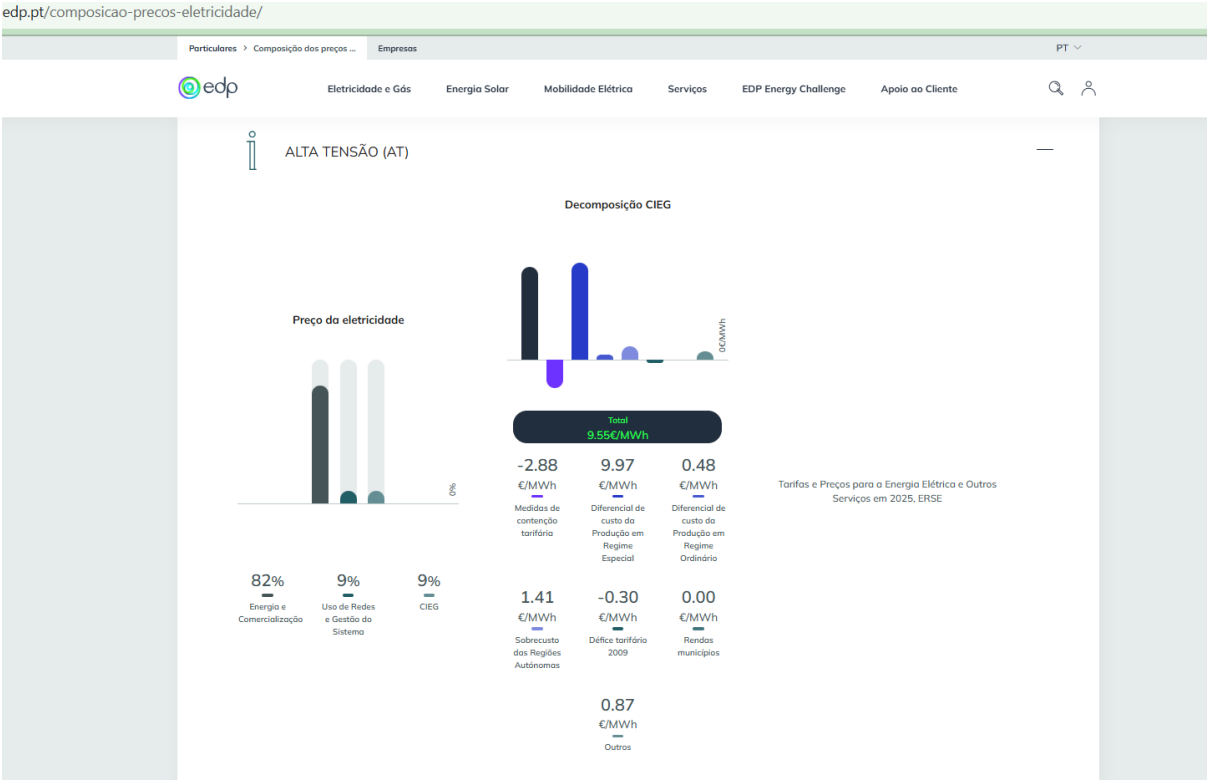
ZeroAvia. (2023b). *The Hydrogen-Electric Cessna Grand Caravan*. <https://zeroavia.com/wp-content/uploads/2023/07/ZeroAvia-ZA600-Caravan-Whitepaper-2023.pdf>

ZeroAvia. (2024a). *About*. ZeroAvia. <https://zeroavia.com/about-us/>

ZeroAvia. (2024b). *ZA600*. ZeroAvia. <https://zeroavia.com/za600/>

ANEXO I

Figura 18. Informação do preço da eletricidade para a ligação de “Alta Tensão”.



Fonte: EDP (2025b)

## ANEXO II (CENTRAL SEM SUBPRODUTO OXIGÉNIO)

| T     | Ano       | CAPEX            | OPEX           | CUSTO ELETRICIDADE | Hidrogénio Produzido | Custo total (€)  | Fator de Desconto | Custos Descontados (€) | Produção Descontada |
|-------|-----------|------------------|----------------|--------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| 0     | 2025/2026 | 137 422 012,24 € | 0              | 0                  | 0                    | 137 422 012,24 € | 1                 | 137 422 012,24 €       | 0                   |
| 1     | 2027      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,925925926       | 6 114 275,70 €         | 3379629,63          |
| 2     | 2028      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,85733882        | 5 661 366,39 €         | 3129286,694         |
| 3     | 2029      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,793832241       | 5 242 005,91 €         | 2897487,68          |
| 4     | 2030      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,735029853       | 4 853 709,18 €         | 2682858,963         |
| 5     | 2031      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,680583197       | 4 494 175,17 €         | 2484128,669         |
| 6     | 2032      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,630169627       | 4 161 273,30 €         | 2300119,138         |
| 7     | 2033      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,583490395       | 3 853 030,84 €         | 2129739,943         |
| 8     | 2034      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,540268885       | 3 567 621,14 €         | 1971981,428         |
| 9     | 2035      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,500248967       | 3 303 352,91 €         | 1825908,73          |
| 10    | 2036      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,463193488       | 3 058 660,10 €         | 1690656,232         |
| 11    | 2037      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,428882859       | 2 832 092,69 €         | 1565422,437         |
| 12    | 2038      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,397113759       | 2 622 308,04 €         | 1449465,219         |
| 13    | 2039      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,367697925       | 2 428 063,00 €         | 1342097,425         |
| 14    | 2040      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,340461041       | 2 248 206,49 €         | 1242682,801         |
| 15    | 2041      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,315241705       | 2 081 672,67 €         | 1150632,223         |
| 16    | 2042      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,291890468       | 1 927 474,70 €         | 1065400,207         |
| 17    | 2043      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,270268951       | 1 784 698,79 €         | 986481,6728         |
| 18    | 2044      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,250249029       | 1 652 498,88 €         | 913408,9563         |
| 19    | 2045      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,231712064       | 1 530 091,56 €         | 845749,0336         |
| 20    | 2046      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,214548207       | 1 416 751,44 €         | 783100,957          |
| 21    | 2047      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,198655748       | 1 311 806,89 €         | 725093,4787         |
| 22    | 2048      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,183940507       | 1 214 636,01 €         | 671382,8507         |
| 23    | 2049      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,170315284       | 1 124 662,97 €         | 621650,7877         |
| 24    | 2050      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,157699337       | 1 041 354,60 €         | 575602,5812         |
| 25    | 2051      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,146017905       | 964 217,23 €           | 532965,3529         |
| 26    | 2052      | 1 738 045,24 €   | 3 349 023,51 € | 1 516 349,00 €     | 3650000              | 6 603 417,75 €   | 0,135201764       | 892 793,73 €           | 493486,4379         |
| TOTAL |           |                  |                |                    |                      |                  |                   | 208 804 812,57 €       | 39 456 419,53 €     |

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| LCOH S OXIGÉNIO | 5,292036507 |
|-----------------|-------------|



| Calculo do VAL                     |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Fluxo líquido descontado cenário 1 | Fluxo líquido descontado cenário 2 | Fluxo líquido descontado cenário 3 |
| -137 422 012,24 €                  | -137 422 012,24 €                  | -137 422 012,24 €                  |
| 7 857 152,13 €                     | 11 236 781,76 €                    | 4 477 522,50 €                     |
| 7 663 437,60 €                     | 10 792 724,29 €                    | 4 534 150,90 €                     |
| 7 428 677,42 €                     | 10 326 165,10 €                    | 4 531 189,74 €                     |
| 7 163 814,71 €                     | 9 846 673,67 €                     | 4 480 955,74 €                     |
| 6 877 854,57 €                     | 9 361 983,24 €                     | 4 393 725,90 €                     |
| 6 578 168,51 €                     | 8 878 287,65 €                     | 4 278 049,37 €                     |
| 6 270 753,29 €                     | 8 400 493,23 €                     | 4 141 013,34 €                     |
| 5 960 451,02 €                     | 7 932 432,45 €                     | 3 988 469,59 €                     |
| 5 651 136,04 €                     | 7 477 044,77 €                     | 3 825 227,31 €                     |
| 5 345 873,48 €                     | 7 036 529,72 €                     | 3 655 217,25 €                     |
| 5 047 053,74 €                     | 6 612 476,17 €                     | 3 481 631,30 €                     |
| 4 756 506,27 €                     | 6 205 971,49 €                     | 3 307 041,05 €                     |
| 4 475 595,97 €                     | 5 817 693,40 €                     | 3 133 498,55 €                     |
| 4 205 304,48 €                     | 5 447 987,28 €                     | 2 962 621,68 €                     |
| 3 946 298,85 €                     | 5 096 931,07 €                     | 2 795 666,63 €                     |
| 3 698 989,34 €                     | 4 764 389,54 €                     | 2 633 589,13 €                     |
| 3 463 578,02 €                     | 4 450 059,69 €                     | 2 477 096,35 €                     |
| 3 240 099,58 €                     | 4 153 508,54 €                     | 2 326 690,63 €                     |
| 3 028 455,46 €                     | 3 874 204,50 €                     | 2 182 706,43 €                     |
| 2 828 442,35 €                     | 3 611 543,30 €                     | 2 045 341,39 €                     |
| 2 639 775,94 €                     | 3 364 869,42 €                     | 1 914 682,46 €                     |
| 2 462 110,64 €                     | 3 133 493,49 €                     | 1 790 727,79 €                     |
| 2 295 055,86 €                     | 2 916 706,64 €                     | 1 673 405,07 €                     |
| 2 138 189,39 €                     | 2 713 791,97 €                     | 1 562 586,81 €                     |
| 1 991 068,43 €                     | 2 524 033,79 €                     | 1 458 103,08 €                     |
| 1 853 238,46 €                     | 2 346 724,90 €                     | 1 359 752,03 €                     |
| -18 554 930,69 €                   | 20 901 488,83 €                    | -58 011 350,22 €                   |
| VAL                                |                                    |                                    |

| CÁLCULO PR                     |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Acumulado Fluxo de desconto C1 | Acumulado Fluxo de desconto C2 | Acumulado Fluxo de desconto C3 |
| -137 422 012,24 €              | -137 422 012,24 €              | -137 422 012,24 €              |
| -129 564 860,11 €              | -126 185 230,48 €              | -132 944 489,74 €              |
| -121 901 422,51 €              | -115 392 506,19 €              | -128 410 338,84 €              |
| -114 472 745,10 €              | -105 066 341,09 €              | -123 879 149,10 €              |
| -107 308 930,39 €              | -95 219 667,42 €               | -119 398 193,35 €              |
| -100 431 075,81 €              | -85 857 684,18 €               | -115 004 467,45 €              |
| -93 852 907,31 €               | -76 979 396,53 €               | -110 726 418,08 €              |
| -87 582 154,02 €               | -68 578 903,30 €               | -106 585 404,74 €              |
| -81 621 703,00 €               | -60 646 470,86 €               | -102 596 935,15 €              |
| -75 970 566,96 €               | -53 169 426,09 €               | -98 771 707,84 €               |
| -70 624 693,48 €               | -46 132 896,37 €               | -95 116 490,59 €               |
| -65 577 639,74 €               | -39 520 420,20 €               | -91 634 859,29 €               |
| -60 821 133,47 €               | -33 314 448,71 €               | -88 327 818,23 €               |
| -56 345 537,50 €               | -27 496 755,31 €               | -85 194 319,68 €               |
| -52 140 233,02 €               | -22 048 768,03 €               | -82 231 698,00 €               |
| -48 193 934,16 €               | -16 951 836,95 €               | -79 436 031,38 €               |
| -44 494 944,83 €               | -12 187 447,41 €               | -76 802 442,25 €               |
| -41 031 366,81 €               | -7 737 387,72 €                | -74 325 345,90 €               |
| -37 791 267,22 €               | -3 583 879,18 €                | -71 998 655,27 €               |
| -34 762 811,76 €               | 290 325,32 €                   | -69 815 948,84 €               |
| -31 934 369,42 €               | 3 901 868,62 €                 | -67 770 607,45 €               |
| -29 294 593,48 €               | 7 266 738,04 €                 | -65 855 925,00 €               |
| -26 832 482,84 €               | 10 400 231,53 €                | -64 065 197,21 €               |
| -24 537 426,98 €               | 13 316 938,17 €                | -62 391 792,14 €               |
| -22 399 237,59 €               | 16 030 730,14 €                | -60 829 205,33 €               |
| -20 408 169,16 €               | 18 554 763,93 €                | -59 371 102,25 €               |
| -18 554 930,69 €               | 20 901 488,83 €                | -58 011 350,22 €               |
|                                |                                |                                |
| PR Não viável                  | PR 2045                        | PR Não viável                  |

### ANEXO III (CENTRAL COM SUBSPRODUTO HIDROGÉNIO)

| t             | Ano       | CAPEX            | OPEX           | CUSTO<br>ELETRICIDADE | Hidrogénio<br>Produzido (kg) | Custo total (€)  | Fator de<br>Desconto | Custos Descontados<br>(€) | Produção<br>Descontada |
|---------------|-----------|------------------|----------------|-----------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| 0             | 2025/2026 | 149 339 012,24 € | 0,00 €         | 0,00 €                | 0                            | 149 339 012,24 € | 1                    | 149 339 012,24 €          | 0                      |
| 1             | 2027      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,925925926          | 6 865 757,18 €            | 3379629,63             |
| 2             | 2028      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,85733882           | 6 357 182,57 €            | 3129286,694            |
| 3             | 2029      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,793832241          | 5 886 280,16 €            | 2897487,68             |
| 4             | 2030      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,735029853          | 5 450 259,41 €            | 2682858,963            |
| 5             | 2031      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,680583197          | 5 046 536,49 €            | 2484128,669            |
| 6             | 2032      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,630169627          | 4 672 718,97 €            | 2300119,138            |
| 7             | 2033      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,583490395          | 4 326 591,64 €            | 2129739,943            |
| 8             | 2034      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,540268885          | 4 006 103,37 €            | 1971981,428            |
| 9             | 2035      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,500248967          | 3 709 354,97 €            | 1825908,73             |
| 10            | 2036      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,463193488          | 3 434 587,94 €            | 1690656,232            |
| 11            | 2037      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,428882859          | 3 180 174,02 €            | 1565422,437            |
| 12            | 2038      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,397113759          | 2 944 605,57 €            | 1449465,219            |
| 13            | 2039      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,367697925          | 2 726 486,64 €            | 1342097,425            |
| 14            | 2040      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,340461041          | 2 524 524,67 €            | 1242682,801            |
| 15            | 2041      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,315241705          | 2 337 522,84 €            | 1150632,223            |
| 16            | 2042      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,291890468          | 2 164 373,00 €            | 1065400,207            |
| 17            | 2043      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,270268951          | 2 004 049,07 €            | 986481,6728            |
| 18            | 2044      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,250249029          | 1 855 600,99 €            | 913408,9563            |
| 19            | 2045      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,231712064          | 1 718 149,07 €            | 845749,0336            |
| 20            | 2046      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,214548207          | 1 590 878,77 €            | 783100,957             |
| 21            | 2047      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,198655748          | 1 473 035,90 €            | 725093,4787            |
| 22            | 2048      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,183940507          | 1 363 922,13 €            | 671382,8507            |
| 23            | 2049      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,170315284          | 1 262 890,86 €            | 621650,7877            |
| 24            | 2050      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,157699337          | 1 169 343,39 €            | 575602,5812            |
| 25            | 2051      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,146017905          | 1 082 725,36 €            | 532965,3529            |
| 26            | 2052      | 1 738 045,24 €   | 3 503 623,51 € | 2 173 349,00 €        | 3650000                      | 7 415 017,75 €   | 0,135201764          | 1 002 523,48 €            | 493486,4379            |
| <b>Totais</b> |           |                  |                |                       | <b>94900000</b>              |                  |                      | <b>229 495 190,68 €</b>   | <b>39 456 419,53 €</b> |

| Oxigénio 100% valor Industrial a 0,1 |                                   |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| RECEITA Oxigénio                     | Receita de Oxigénio já descontado |
| 0                                    | 0,00 €                            |
| 2920000                              | 2 703 703,70 €                    |
| 2920000                              | 2 503 429,36 €                    |
| 2920000                              | 2 317 990,14 €                    |
| 2920000                              | 2 146 287,17 €                    |
| 2920000                              | 1 987 302,94 €                    |
| 2920000                              | 1 840 095,31 €                    |
| 2920000                              | 1 703 791,95 €                    |
| 2920000                              | 1 577 585,14 €                    |
| 2920000                              | 1 460 726,98 €                    |
| 2920000                              | 1 352 524,99 €                    |
| 2920000                              | 1 252 337,95 €                    |
| 2920000                              | 1 159 572,18 €                    |
| 2920000                              | 1 073 677,94 €                    |
| 2920000                              | 994 146,24 €                      |
| 2920000                              | 920 505,78 €                      |
| 2920000                              | 852 320,17 €                      |
| 2920000                              | 789 185,34 €                      |
| 2920000                              | 730 727,17 €                      |
| 2920000                              | 676 599,23 €                      |
| 2920000                              | 626 480,77 €                      |
| 2920000                              | 580 074,78 €                      |
| 2920000                              | 537 106,28 €                      |
| 2920000                              | 497 320,63 €                      |
| 2920000                              | 460 482,06 €                      |
| 2920000                              | 426 372,28 €                      |
| 2920000                              | 394 789,15 €                      |
| <b>75920000</b>                      | <b>31 565 135,62 €</b>            |

| Oxigénio 100% valor Médico a 2,38€ |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| RECEITA Oxigénio                   | Receita de Oxigénio já descontado |
| 0                                  | 0,00 €                            |
| 69496000                           | 64 348 148,15 €                   |
| 69496000                           | 59 581 618,66 €                   |
| 69496000                           | 55 168 165,42 €                   |
| 69496000                           | 51 081 634,65 €                   |
| 69496000                           | 47 297 809,86 €                   |
| 69496000                           | 43 794 268,39 €                   |
| 69496000                           | 40 550 248,51 €                   |
| 69496000                           | 37 546 526,40 €                   |
| 69496000                           | 34 765 302,22 €                   |
| 69496000                           | 32 190 094,65 €                   |
| 69496000                           | 29 805 643,19 €                   |
| 69496000                           | 27 597 817,77 €                   |
| 69496000                           | 25 553 534,97 €                   |
| 69496000                           | 23 660 680,53 €                   |
| 69496000                           | 21 908 037,53 €                   |
| 69496000                           | 20 285 219,93 €                   |
| 69496000                           | 18 782 611,05 €                   |
| 69496000                           | 17 391 306,53 €                   |
| 69496000                           | 16 103 061,60 €                   |
| 69496000                           | 14 910 242,22 €                   |
| 69496000                           | 13 805 779,83 €                   |
| 69496000                           | 12 783 129,48 €                   |
| 69496000                           | 11 836 231,00 €                   |
| 69496000                           | 10 959 473,15 €                   |
| 69496000                           | 10 147 660,32 €                   |
| 69496000                           | 9 395 981,78 €                    |
| <b>1806896000</b>                  | <b>751 250 227,78 €</b>           |

| Oxigénio 50% valor Industrial a 0,1+ 50%Med 2,38€ |                                   |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|
| RECEITA Oxigénio                                  | Receita de Oxigénio já descontado |
| 0                                                 | 0,00 €                            |
| 36208000                                          | 33 525 925,93 €                   |
| 36208000                                          | 31 042 524,01 €                   |
| 36208000                                          | 28 743 077,78 €                   |
| 36208000                                          | 26 613 960,91 €                   |
| 36208000                                          | 24 642 556,40 €                   |
| 36208000                                          | 22 817 181,85 €                   |
| 36208000                                          | 21 127 020,23 €                   |
| 36208000                                          | 19 562 055,77 €                   |
| 36208000                                          | 18 113 014,60 €                   |
| 36208000                                          | 16 771 309,82 €                   |
| 36208000                                          | 15 528 990,57 €                   |
| 36208000                                          | 14 378 694,97 €                   |
| 36208000                                          | 13 313 606,46 €                   |
| 36208000                                          | 12 327 413,39 €                   |
| 36208000                                          | 11 414 271,65 €                   |
| 36208000                                          | 10 568 770,05 €                   |
| 36208000                                          | 9 785 898,19 €                    |
| 36208000                                          | 9 061 016,85 €                    |
| 36208000                                          | 8 389 830,41 €                    |
| 36208000                                          | 7 768 361,49 €                    |
| 36208000                                          | 7 192 927,31 €                    |
| 36208000                                          | 6 660 117,88 €                    |
| 36208000                                          | 6 166 775,81 €                    |
| 36208000                                          | 5 709 977,61 €                    |
| 36208000                                          | 5 287 016,30 €                    |
| 36208000                                          | 4 895 385,46 €                    |
| <b>941408000</b>                                  | <b>391 407 681,70 €</b>           |

| LCOH Variação mediante o valor vendido de O2 |        |
|----------------------------------------------|--------|
| Oxigénio 100% Industrial                     | 5,02   |
| Oxigénio 100% Médico                         | -13,22 |
| Oxigénio 50% Ind+ 50%Med                     | -4,10  |

VALOR DO  
HIDROGÉNIO  
100%  
INDUSTRIAL

5,02 €

| Receita de H2   | Receita Total<br>anual (H2+O2) | Fluxo de Caixa Anual | Fluxo de Caixa<br>descontado | Acumulado dos Fluxos<br>descontados |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 0,00 €          | 0,00 €                         | -149 339 012,24 €    | -149 339 012,24 €            | -149 339 012,24 €                   |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 12 803 687,26 €              | -136 535 324,98 €                   |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 11 855 265,99 €              | -124 680 058,99 €                   |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 10 977 098,14 €              | -113 702 960,85 €                   |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 10 163 979,75 €              | -103 538 981,10 €                   |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 9 411 092,37 €               | -94 127 888,73 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 8 713 974,41 €               | -85 413 914,32 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 8 068 494,83 €               | -77 345 419,49 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 7 470 828,54 €               | -69 874 590,95 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 6 917 433,84 €               | -62 957 157,12 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 6 405 031,33 €               | -56 552 125,79 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 5 930 584,56 €               | -50 621 541,22 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 5 491 282,00 €               | -45 130 259,22 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 5 084 520,37 €               | -40 045 738,84 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 4 707 889,24 €               | -35 337 849,61 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 4 359 156,70 €               | -30 978 692,91 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 4 036 256,20 €               | -26 942 436,71 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 3 737 274,26 €               | -23 205 162,44 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 3 460 439,13 €               | -19 744 723,31 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 3 204 110,31 €               | -16 540 613,00 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 2 966 768,80 €               | -13 573 844,20 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 2 747 008,15 €               | -10 826 836,05 €                    |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 2 543 526,07 €               | -8 283 309,98 €                     |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 2 355 116,73 €               | -5 928 193,26 €                     |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 2 180 663,64 €               | -3 747 529,62 €                     |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 2 019 133,00 €               | -1 728 396,62 €                     |
| 18 323 000,00 € | 21 243 000,00 €                | 13 827 982,25 €      | 1 869 567,59 €               | 141 170,97 €                        |
|                 |                                | 210 188 526,16 €     |                              |                                     |
|                 |                                |                      |                              | PR - 2050                           |
|                 |                                | VAL                  | 141 170,97 €                 |                                     |
| TIR             |                                | 8%                   |                              |                                     |