



**Instituto Superior de Ciências da Informação e da Administração**

**Uma Investigação Sobre Operações Seguras com Hidrogénio Verde em Portugal:  
Desafios Regulatórios e Regras Preventivas de Segurança**

Ana Maria Anunciação Costa Dias dos Santos Meireles Tavares

Aveiro

2025







**Instituto Superior de Ciências da Informação e da Administração**

**Uma Investigação Sobre Operações Seguras com Hidrogénio Verde em Portugal:  
Desafios Regulatórios e Regras Preventivas de Segurança**

Ana Maria Anunciação Costa Dias dos Santos Meireles Tavares

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Ciências da Informação e da Administração para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Higiene e Segurança Ocupacionais, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor Cardoso, Professor Doutor do Instituto Superior de Ciências da Informação e da Administração

Aveiro  
2025



## **Júri**

Constituíram o Júri de avaliação os seguintes elementos:

Presidente - Professor Doutor Hugo Carvalho

Orientador - Professor Doutor Vítor Cardoso

Arguente - Professor Helder Simões



## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha Filha e Marido, pelo amor, apoio incondicional e incentivo em todos os momentos. Obrigada a eles por toda a paciência e compreensão face à minha ausência. Foram, são e serão para sempre, o meu pilar.

*“Learning is the only thing the mind never exhausts, never fears, and never regrets.”*

Leonardo da Vinci



## Agradecimentos

Dedico um especial agradecimento ao Professor Doutor Vítor Cardoso, orientador desta Dissertação de Mestrado, pela sua disponibilidade, assertividade e por todo o apoio prestado ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A sua orientação, trato e conduta irrepreensíveis, combinados com o seu conhecimento científico e experiência neste domínio, contribuíram decisivamente para o enriquecimento deste trabalho.

Presto ainda um agradecimento a todos os docentes do ISCIA que colaboraram para a realização desta dissertação, dos quais destaco o Professor Doutor Miguel Corticeiro Neves e a Professora Doutora Fátima Matos, ambos docentes do ISCIA.

Um agradecimento final a todas as empresas e instituições com as quais tive contacto e cujo contributo foi essencial para os resultados deste trabalho, nomeadamente:

- A **Bondalti**, onde destaco a colaboração do Eng.º Vasco Granadeiro e o Eng.º Luís Fernandes, que partilharam abertamente o seu vasto conhecimento e experiência;
- A **Floene**, destacando a colaboração do Eng.º José Terras e do Eng.º Afonso Gonçalves, que partilharam a sua visão e conhecimento como operadores de rede;
- O **INEGI**, que através dos seus investigadores Eng.º Ricardo Barbosa, Eng.º Lucas Marcon e Eng.º Francisco Machado, demonstraram uma enorme receptividade na colaboração neste trabalho e também contribuíram decisivamente com o seu vasto conhecimento na área da investigação e desenvolvimento sobre o tema.



## Índice Geral

<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>ACRÓNIMOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES DE MEDIDA .....</b>	<b>XX</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XXII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO LEGAL E NORMATIVO .....	4
1.1.1. LEGISLAÇÃO E DIRETIVAS EUROPEIAS / INTERNACIONAIS .....	4
1.1.2. LEGISLAÇÃO NACIONAL .....	10
1.2. ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL.....	17
1.2.1. A IMPORTÂNCIA DO HIDROGÉNIO VERDE NO CONTEXTO ATUAL .....	17
1.2.2. A HISTÓRIA DO HIDROGÉNIO EM PORTUGAL.....	24
1.2.3. PROPRIEDADES DO HIDROGÉNIO VERDE .....	28
1.2.4. A CADEIA DE VALOR DO HIDROGÉNIO VERDE .....	34
1.2.5. APLICAÇÕES DO HIDROGÉNIO VERDE .....	36
1.2.6. O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÉNIO VERDE – A ELETRÓLISE .....	38
1.2.7. O PROCESSO DE ARMAZENAMENTO DO HIDROGÉNIO VERDE.....	41
1.2.8. RISCOS ASSOCIADOS AO HIDROGÉNIO VERDE .....	44
1.2.9. CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DE ACIDENTES .....	51
1.2.10. GESTÃO DE RISCO DE ACIDENTES .....	57
1.2.11. QUESTÃO DA PESQUISA .....	60
1.3. ESTADO DA ARTE .....	61
1.3.1. AS METAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO .....	61
1.3.2. PROJETOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE EM PORTUGAL .....	67
1.3.3. DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA .....	72
1.3.4. REGRAS DE SEGURANÇA IMPLEMENTADAS.....	75
1.3.5. JUSTIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO .....	96
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>98</b>
2.1 GERAL.....	98
2.2 ESPECÍFICOS.....	98
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>99</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AOS OBJETIVOS DA PESQUISA .....	100
3.1.1 PESQUISA EXPLORATÓRIO-DESCRIPTIVA .....	100
3.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À NATUREZA DA PESQUISA .....	100
3.2.1 PESQUISA QUALITATIVA .....	100
3.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ESCOLHA DO OBJETO DE ESTUDO .....	102
3.3.1 ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS .....	102
3.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À TÉCNICA DE RECOLHA DE DADOS .....	102
3.4.1 ENTREVISTA.....	102
3.4.2 OBSERVAÇÃO EM CAMPO .....	104
3.4.3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....	105
3.5 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS .....	105
3.5.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO .....	105
3.5.2 TRIANGULAÇÃO NA ANÁLISE .....	106
<b>4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>107</b>
4.1 ESTUDO DE CASO – BONDALTI .....	107
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	107
4.1.2 OPERAÇÃO COM HIDROGÉNIO VERDE .....	108
4.1.3 REGRAS DE SEGURANÇA IMPLEMENTADAS.....	109
4.1.4 RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO EM CAMPO .....	110
4.1.5 RESULTADOS DAS ENTREVISTAS .....	114
4.2 ESTUDO DE CASO – FLOENE – PARQUE INDUSTRIAL DO SEIXAL .....	118

4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	118
4.2.2	OPERAÇÃO COM HIDROGÉNIO VERDE .....	120
4.2.3	RESULTADOS DAS ENTREVISTAS .....	125
4.3	INEGI - A PERSPETIVA DA INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO .....	132
4.4	RESULTADOS GLOBAIS .....	138
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>141</b>
<b>6.</b>	<b>PROPOSTAS DE MELHORIA E PROJETOS FUTUROS .....</b>	<b>149</b>
6.1	PROPOSTAS DE MELHORIA .....	149
6.2	OPORTUNIDADES DE MELHORIA NOS PROCESSOS OPERACIONAIS .....	150
6.3	OPORTUNIDADES DE MELHORIA NA COMPONENTE LEGISLATIVA E NORMATIVA.....	154
6.4	OPORTUNIDADES DE MELHORIA NO PROJETO E SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....	155
6.5	OPORTUNIDADES DE MELHORIA NAS POLÍTICAS INTERNAS DAS ORGANIZAÇÕES .....	156
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>159</b>
7.1	BIBLIOGRAFIA .....	159
7.2	WEBGRAFIA .....	162
<b>8.</b>	<b>GLOSSÁRIO DE TERMOS .....</b>	<b>185</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>189</b>

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1: Correspondência de zonas e equipamentos ATEX (Gás) ..... 17

Tabela 2: Principais características do hidrogénio ..... 29



## Índice de Figuras

Figura 1: Mapa mundial estratégico do hidrogénio, (IPHE, 2025).....	7
Figura 2: Capacidade instalada de eletrolisadores em (GW) e capacidade instalada de eletrolisadores estimada até 2030 (NZE – “Net Zero Emissions” - Emissões Zero).....	18
Figura 3: Capacidade de produção anual de eletrolisadores em (GW) e projetos de eletrolisadores anunciados até 2030) .....	18
Figura 4: Investimento em eletrolisadores em biliões de dólares desde 2021 até 2024 .....	19
Figura 5: Processo simplificado do processo de produção do hidrogénio verde.....	23
Figura 6: Balanço da produção de eletricidade de Portugal Continental em 2025 .....	25
Figura 7: Evolução da produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental (entre maio de 2023 a maio de 2025).....	26
Figura 8: Evolução da potência instalada em Portugal Continental desde o ano 2000 .....	26
Figura 9: Distribuição dos fundos destinados ao setor de hidrogénio e energias renováveis no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), com valores expressos em milhões de euros (M€).....	28
Figura 10: Cadeia de valor global do hidrogénio verde conforme a EN-H2 .....	35
Figura 11: Cadeia de valor P2G conforme a EN-H2 .....	35
Figura 12: Cadeia de valor do hidrogénio verde desde a sua produção até ao uso final .....	36
Figura 13: Sistemas industriais de hidrogénio – Aplicações .....	38
Figura 14: Métodos de produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis e através de fontes renováveis .....	39
Figura 15: Vista exterior de um eletrolisador alcalino de hidrogénio verde da marca Stargate Hydrogen.....	40
Figura 16: Diagrama de eletrolisador AWE .....	40
Figura 17: Representação em diagrama de blocos de um eletrolisador alcalino industrial da marca Stargate Hydrogen.....	40
Figura 18: Eletrolisador industrial do tipo “PEM” da marca “NEL” em solução contentorizada .....	37
Figura 19: Diagrama de eletrolisador PEM .....	38
Figura 20: Combinação de eletrolisadores de óxidos sólidos da marca Bloom Energy .....	38
Figura 21: Eletrólise de óxido sólido (SOE).....	38
Figura 22: Processo de produção de hidrogénio verde por eletrólise, armazenamento e reconversão em energia elétrica libertando água .....	40
Figura 23: Gráfico de tendência dos custos da tecnologia face à capacidade instalada .....	41
Figura 24: Representação em corte de um reservatório de armazenamento de hidrogénio comprimido .....	42
Figura 25: Representação em corte de um reservatório de armazenamento de hidrogénio liquefeito .....	43
Figura 26: Esquema simplificado das tecnologias de armazenamento de hidrogénio.....	44
Figura 27: Variação da energia necessária para a ignição do hidrogénio em função da sua concentração no ar .....	48
Figura 28: Aglomeração das moléculas de hidrogénio em pontos de corrosão e de rugosidade .....	49
Figura 29: Surgimento de fissuras no material após contacto prolongado com o hidrogénio .....	49
Figura 30: “Triângulo do Fogo” representando os 3 elementos necessários para se dar uma combustão .....	51
Figura 31: Diagrama representativo dos tipos de acidentes e respetiva frequência de ocorrência.....	52

Figura 32: Gráficos representativos de dados estatísticos referentes a incidentes com hidrogénio .....	55
Figura 33: Tipos de incidentes em instalações de produção de hidrogénio.....	56
Figura 34: Gráfico de distribuição das causas de incidentes na Europa em gasodutos entre 2013 e 2022.....	57
Figura 35: Representação de uma matriz de risco .....	59
Figura 36: Curvas de aprendizagem e respetivo custo para sistemas de eletrólise em função da produção.....	65
Figura 37: Projetos de hidrogénio previstos até 2030 em GW de potência instalada.....	69
Figura 38: Produção de hidrogénio verde entre 2021 e 2024 (esquerda); Capacidade instalada de eletrolisadores entre 2021 e 2024 (direita).....	70
Figura 39: Projetos anunciados de eletrolisadores até 2030 em (GW).....	71
Figura 40: Representação de uma válvula de segurança reguladora de pressão.....	82
Figura 41: Projeto de hidrogénio verde “H2Enable” da Bondalti, referenciado no mapa energético europeu .....	109
Figura 42: Complexo industrial da Bondalti em Estarreja.....	113
Figura 43: Grupos eletrolisadores da Bondalti .....	113
Figura 44: Vista superior - Eletrolisador da Bondalti.....	113
Figura 45: Projeto piloto de produção de hidrogénio verde .....	121
Figura 46: Diagrama representativo do processo de produção do projeto piloto de produção de hidrogénio verde (I).....	122
Figura 47: Diagrama simplificado da estação de mistura e injeção de hidrogénio verde do projeto piloto de produção de hidrogénio verde (II).....	122
Figura 48: Diagrama da rede de distribuição do hidrogénio verde do projeto piloto de produção de hidrogénio verde (III).....	123
Figura 49: Projeto piloto de hidrogénio verde da Floene no Seixal referenciado no mapa energético europeu .....	123

## **Acrónimos, Siglas, Abreviaturas e Unidades de Medida**

- APA – Agência Portuguesa do Ambiente
- APEG – Associação Portuguesa de Empresas de Gás
- APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis
- ATEX – Atmosferas Explosivas
- AWE – Alkalyne Water Electrolysis – Eletrólise da Água Alcalina
- CO<sub>2</sub> – Símbolo químico para o dióxido de carbono
- DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia
- ECHA - European Clean Hydrogen Alliance – Aliança Europeia de Hidrogénio Verde
- EDP – Eletricidade de Portugal
- EN-H2 – Estratégia Nacional para o Hidrogénio
- ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
- GEE – Gases com Efeito de Estufa
- GH2 – Green Hydrogen Organisation
- GNC – Gás Natural Comprimido
- H2 – Símbolo químico para o hidrogénio
- HIAD – Hydrogen Incident and Accidents Database – Base de Dados de Incidentes e Acidentes com o Hidrogénio
- HV – Hidrogénio Verde
- I&D – Investigação e Desenvolvimento
- IEA – International Energy Agency – Agência Internacional de Energia
- IPCEI – Projeto Importante de Interesse Europeu Comum
- IPHE – International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy - Parceria Internacional para Hidrogénio e Células de Combustível na Economia
- IRENA – International Renewable Energy Agency - Agência Internacional de Energias Renováveis
- ISO – International Organisation for Standardization
- IW – Índice de Wobbe
- NREL – “National Renewable Energy Laboratory” – Laboratório Nacional de Energias Renováveis
- PEM – “Proton Exchange Membrane” – Membrana de Troca de Protões
- PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima
- POSEUR – Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos

PRR – Plano de Recuperação e Resiliência  
RNC – Roteiro para a Neutralidade Carbónica  
RNTGN – Rede Nacional de Transporte de Gás Natural  
SMR – Steam Methane Reforming – Reforma por Vapor de Metano  
SOE – Solid Oxide Electrolysis – Eletrólise de Óxidos Sólidos  
UE – União Europeia

### **Lista de símbolos**

atm – Atmosfera  
bar – Bar  
g – Grama  
GW – Gigawatt  
GWh – Gigawatt-hora  
J – Joule  
kg – Quilograma  
kW – Quilowatt  
kWh – Quilowatt-hora  
l – Litro  
m – Metro  
m<sup>3</sup> – Metro Cúbico  
mJ – Milijoule  
mol – Mole  
Mt – Megatonelada  
MW – Megawatt  
MW – Megawatt  
°C – Grau Celsius  
ppm v – Partes por milhão em volume  
s – Segundo  
W – Watt

## Resumo

A presente dissertação aborda o tema da segurança em operações com hidrogénio verde em Portugal, numa perspetiva integrada, que conjuga uma análise dos desafios regulatórios, técnicos e operacionais associados a este vetor energético emergente.

Numa fase introdutória, é salientada a importância estratégica do hidrogénio verde no contexto atual da transição energética, no cumprimento das metas europeias e nacionais, com vista à descarbonização da economia.

Destacam-se as propriedades do hidrogénio, fundamentais para compreender os riscos específicos associados ao seu manuseamento, nomeadamente a sua baixa densidade, elevada difusividade, ampla gama de inflamabilidade e baixa energia mínima de ignição. Descreve-se a sua cadeia de valor, desde a produção através do processo da eletrólise, passando pelo armazenamento e distribuição, até aos diversos setores de consumo.

Ao nível da legislação, é analisado o enquadramento regulatório aplicável, identificando normas e diretivas europeias, e regulamentação portuguesa que estabelecem requisitos de segurança.

A dissertação recorre a uma pesquisa bibliográfica extensa, sendo complementada por entrevistas a intervenientes no setor ao nível operacional, de gestão e na área de investigação e desenvolvimento, complementada com uma investigação em campo em instalações de produção em território nacional.

Através da análise destes dados, identificam-se os principais riscos no manuseamento e operação com hidrogénio verde, bem como as medidas preventivas atualmente adotadas, evidenciando-se que, embora exista um quadro normativo em desenvolvimento, subsistem lacunas regulatórias e desafios práticos na implementação de medidas de segurança.

Identificam-se ainda as principais categorias de risco, onde se incluem explosões, incêndios, fugas, falhas de ventilação e riscos ocupacionais e algumas das práticas atualmente adotadas para a sua mitigação.

Os resultados revelam uma crescente consciencialização para as exigências de segurança, mas também de lacunas na legislação nacional e internacional, na formação especializada e na harmonização de práticas operacionais, que evidenciam a necessidade de promover uma cultura de segurança transversal a todos os intervenientes da cadeia de valor do hidrogénio verde.

A dissertação conclui com uma compilação de recomendações no sentido de reforçar a promoção da cultura de segurança e a adoção de mecanismos que contribuam positivamente

para um desenvolvimento mais seguro, sustentável e competitivo do setor do hidrogénio verde em Portugal.

**Palavras-chave**

Hidrogénio Verde; Produção; Armazenamento; Regras de Segurança; Descarbonização

## **Abstract**

This dissertation addresses the topic of safety in green hydrogen operations in Portugal from an integrated perspective, combining an analysis of the regulatory, technical, and operational challenges associated with this emerging energy sector.

The introductory phase highlights the strategic importance of green hydrogen in the current context of the energy transition, in meeting European and national targets, and in decarbonizing the economy.

The properties of hydrogen are highlighted, essential for understanding the specific risks associated with its handling, namely its low density, high diffusivity, wide flammability range, and low minimum ignition energy. Its value chain is described, from production through the electrolysis process, through storage and distribution, to the various consumer sectors.

In terms of legislation, the applicable regulatory framework is analyzed, identifying European standards and directives, as well as Portuguese regulations that establish safety requirements. The dissertation utilizes extensive bibliographical research, complemented by interviews with industry stakeholders at operational, managerial, research and development levels, and field research at production facilities nationwide.

Through the analysis of this data, the main risks in the handling and operation of green hydrogen are identified, as well as the preventive measures currently adopted. This highlights that, although a regulatory framework is under development, regulatory gaps and practical challenges in implementing safety measures remain.

The main risk categories are also identified, including explosions, fires, leaks, ventilation failures, and occupational hazards, as well as some of the practices currently adopted to mitigate them.

The results reveal a growing awareness of safety demands, but also gaps in national and international legislation, specialized training, and the harmonization of operational practices, highlighting the need to promote a culture of safety across all stakeholders in the green hydrogen value chain. The dissertation concludes with a compilation of recommendations to strengthen the promotion of a safety culture and the adoption of mechanisms that contribute positively to a safer, more sustainable and competitive development of the green hydrogen sector in Portugal.

## **Keywords**

Green Hydrogen; Production; Storage; Safety Rules; Decarbonization



## 1. Introdução

O hidrogénio verde representa um vetor energético de importância crucial para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável e descarbonizada (IEA - International Energy Agency, 2021). Os aspetos de segurança que se afiguram neste contexto têm, no entanto, de ser devidamente assegurados de forma a não comprometer esta tecnologia emergente (EDP 2024). Várias questões surgem: Quais os desafios em termos de segurança que o hidrogénio verde tem implícito? Como os deveremos enfrentar?

Este estudo investiga e analisa de que forma poderão ser otimizados os sistemas de segurança existentes e qual a necessidade de complementar ou rever a legislação específica sobre o tema.

Num contexto mundial em que as alterações climáticas e os seus efeitos prejudiciais para o ambiente se manifestam de uma forma cada vez mais evidente, torna-se necessário alterar o paradigma energético, para atingir a neutralidade carbónica até 2050, tal como previsto no Acordo de Paris, adotado em dezembro de 2015, ratificado em novembro de 2016 e assinado por 195 países (República Portuguesa - Ambiente e Ação Climática, 2020).

Este acordo representa um compromisso global e juridicamente vinculativo para Portugal, estabelecendo objetivos de limitar o aumento da temperatura global, por forma a reduzir significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas, aumentando também a capacidade de lhes fazer face, promovendo a resiliência climática e o desenvolvimento de baixos níveis de carbono. Trata-se por isso, de um objetivo muito ambicioso, que exigirá a descarbonização de grandes extensões do sistema energético mundial (DGEG, 2019).

Para concretizar este objetivo, foi desenvolvido e implementado em Portugal o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, publicado em Assembleia da República (2019), que estabelece, de forma sustentada, as linhas de orientação para atingir a neutralidade carbónica até 2050, definindo a estratégia para a redução das emissões de gases por efeito estufa e identificando as opções mais eficazes para atingir as metas propostas.

Attingir a neutralidade carbónica em Portugal, implica reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em mais de 85% em relação a 2005, tal como referido por Brandão et al., (2020). Por sua vez, importa salientar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, onde o hidrogénio verde, cumpre um importante papel (ONU, 2015).

Um dos vetores energéticos que potencialmente mais contribuirá para atingir os objetivos assumidos pelo governo português, será o recurso à produção em massa de

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

hidrogénio verde, baseado inteiramente em recursos renováveis (República Portuguesa - Ambiente e Ação Climática, 2020).

Trata-se de um tema atual e emergente, e embora os potenciais benefícios do hidrogénio verde sejam diversos para a economia e ambiente, a sua adoção generalizada em grande escala representa grandes desafios em termos tecnológicos.

Estes desafios prendem-se com o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e com custos mais reduzidos e também em termos de segurança operacional, manuseamento, armazenamento e aspetos relacionados com a higiene, segurança e ambiente, de acordo com previsões da EDP (2024).

Apesar da utilização do hidrogénio verde ser considerada promissora e sustentável, implica riscos que não devem ser desconsiderados, devido às suas propriedades que são consideradas perigosas, e deverão ser devidamente acautelados, procurando minimizar quaisquer impactos prejudiciais aos intervenientes no processo, (Cate et al., 2023).

O estudo aborda primeiramente o contexto atual da representatividade e importância do hidrogénio verde em Portugal, detalhando as metas e compromissos estabelecidos pelo governo, fundamentais para o seu crescimento e expansão em território nacional, em linha com os compromissos assumidos perante a União Europeia atendendo à descarbonização e sustentabilidade da sociedade.

Complementarmente, é referido de uma forma simplificada, todo o processo de produção e armazenamento do hidrogénio verde, identificando os riscos associados a toda a operação e tomando como foco principal os aspetos de segurança que estão subjacentes à cadeia de valor, nomeadamente a sua produção e armazenamento.

Devido à necessidade de um crescimento rápido desta tecnologia, a curva de aprendizagem resultante, será caracterizada por um rápido crescimento.

Este facto, associado à falta de conhecimentos e de experiência deste tipo de instalações por parte da maioria das organizações, são fatores que aportam um risco acrescido, na medida em que todos os procedimentos, medidas de prevenção e aspetos de segurança implementados, carecem ainda de uma fase de evolução e otimização, perante a introdução de novas tecnologias e processos, conforme referido em artigo publicado pela EDP, (2024).

Este estudo tem como objetivo principal, investigar e analisar os referidos aspetos de segurança, relacionando a sua adequabilidade face às necessidades atuais e à legislação em vigor. Irá basear-se numa pesquisa documental, assim como numa investigação exploratória em campo em empresas que atualmente estão envolvidas nesta operação, suportadas ainda por

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

entrevistas a intervenientes chave do processo e a uma entidade dedicada à investigação e desenvolvimento desta tecnologia.

Atualmente existe ainda um número muito reduzido de centrais “piloto” deste tipo em Portugal, mas, no entanto, estão em curso vários projetos de grande escala, suportados por grandes empresas investidoras, financiadas pelo governo, em linha com o Plano EN-H2, identificadas por Neto, (2025).

A dissertação está estruturada em seis capítulos, organizados da seguinte forma: O primeiro capítulo apresenta um Enquadramento Legal, referindo a legislação aplicável em vigor neste contexto, assim como um Enquadramento Conceptual, abordando os principais conceitos relacionados com a tecnologia propriamente dita do Hidrogénio, os processos de armazenamento e produção, referindo ainda as suas propriedades, a sua cadeia de valor e aspetos de segurança associados.

Ainda no mesmo capítulo apresenta-se um subcapítulo destinado a apresentar o Estado da Arte, onde se apresenta uma visão atualizada da utilização desta tecnologia em território nacional, das respetivas regras de segurança e práticas, normas, pesquisas e tecnologias relacionadas à produção, armazenamento, transporte e utilização segura de hidrogénio verde.

No segundo capítulo são definidos os objetivos, geral e específicos, onde é possível descrever os temas aos quais se pretende obter respostas. A metodologia da investigação é abordada no terceiro capítulo, fazendo referência aos métodos a recorrer para a investigação com o devido justificativo da sua adequabilidade.

No quarto capítulo são descritos os estudos de caso em empresas reais, caracterizando as investigações de campo, entrevistas e apresentação de resultados. No capítulo seguinte, são apresentadas as conclusões da investigação e apresentadas propostas de melhoria ou alterações no sentido de contribuir positivamente para a otimização de aspetos de segurança na indústria de hidrogénio verde.

No estudo, serão também abordados de uma forma não exaustiva, alguns temas relacionados com tecnologias de produção de hidrogénio verde (eletrólise, fontes renováveis), aplicações do hidrogénio verde em indústrias específicas, temas relacionados com a transição energética e a importância do hidrogénio verde neste contexto, análise de políticas públicas e estratégias nacionais (como o Plano EN-H2 de Portugal) e legislação existente em vigor.

Complementarmente, serão indicados os desafios de implementação do hidrogénio verde, destacando todos os aspetos relativos à segurança de pessoas e de bens, de acordo com o estipulado pela resolução do conselho de ministros nº 63/2020 (DGEG, 2020).

### 1.1. Enquadramento legal e normativo

#### 1.1.1 Legislação e diretivas europeias / internacionais

O hidrogénio verde tem-se evidenciado como um vetor energético com grande potencial para contribuir para a transição energética global, impulsionando países e organizações internacionais a criar legislação específica para a sua produção, armazenamento e utilização, (IEA International Energy Agency, 2024).

De acordo com o descrito na norma ISO 45001:2018, que descreve os sistemas de gestão da saúde e segurança ocupacional (ISO Standards, 2018), a legislação e as normas regulatórias representam um papel fundamental na segurança e na evolução tecnológica da sociedade, servindo de base para que as organizações intervenientes em cada setor, estabeleçam as suas políticas de segurança, ambientais e operacionais.

Por conseguinte, o cumprimento rigoroso da legislação é indispensável para garantir o bem-estar das pessoas, a proteção de bens e o funcionamento adequado e em segurança das operações, cabendo às respetivas organizações, implementar e cumprir a referida regulamentação.

É assim essencial, que todos os intervenientes nos processos, desde os operadores de fábrica até gestores de topo, adotem uma abordagem consciente e objetiva, interpretando as normas com clareza e responsabilidade e garantindo a sua aplicação de forma construtiva e eficaz, conforme previsto nas diretrizes da norma internacional ISO 9001:2015, (2015), que define os requisitos de um Sistema de Gestão da Qualidade.

A referida legislação sobre o hidrogénio verde encontra-se ainda em fase de desenvolvimento, no entanto, diversos países e organizações estão empenhados na criação de normas, regulamentos e políticas para o desenvolvimento desta tecnologia de uma forma sustentável, eficiente e em segurança, (European Union, 2023).

O desenvolvimento de normas técnicas deverá estabelecer um conjunto de diretrizes detalhadas acerca de tópicos relacionados com especificações de equipamentos, regras de segurança e operação, diretivas de conceção e regulamentação dos processos, e outros temas relevantes, para regular as operações com o hidrogénio verde.

A introdução de legislação específica sobre o tema, e o respetivo cumprimento da mesma por parte das empresas que constituem este setor, será fundamental para transmitir confiança a novos investidores e credibilizar esta tecnologia no mercado, (Hydrogen Europe, 2025).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Atendendo ao contexto atual e aos compromissos já estabelecidos com investimentos a decorrer, ou em fase avançada em termos de planeamento, a implementação de nova legislação e de regras regulatórias para esta atividade, deverá ser introduzida de uma forma faseada, permitindo que o setor se adapte ao novo contexto, e que a introdução dessas novas diretivas acompanhem a reação das empresas, tornando-se progressivamente mais rigorosas e exigentes, para otimizar e aprofundar o nível de detalhe das linhas de orientação e regras impostas.

Desta forma, está prevista uma fase de transição para a aplicação dos requisitos adicionais nos projetos de hidrogénio, que entrarem em operação antes de 1 de janeiro de 2028, proporcionando às empresas o tempo necessário para o desenvolvimento da tecnologia e dos respetivos aspetos relacionados com a segurança, assim como a introdução de novos eletrolisadores e equipamento mais evoluído.

No entanto, os Estados-Membros terão a possibilidade de adotar regras mais exigentes, quanto à correlação temporal, a partir de 1 de julho de 2027, (Comissão Europeia, 2023).

No caso da União Europeia, que tem um dos quadros mais desenvolvidos no contexto regulatório do hidrogénio verde, com metas estabelecidas no Pacto Ecológico Europeu e no Plano REPowerEU, foram implementadas diretrizes que estabelecem um conjunto de regras de segurança e procedimentos, orientados para as operações com o hidrogénio verde, com vista a conferir uma maior segurança regulatória aos intervenientes nos processos e aos investidores, (Comissão europeia, 2022).

Algumas das principais diretrizes que servem como base regulatória para as atividades relacionadas com o hidrogénio verde, incluem a Estratégia de Hidrogénio da União Europeia, (República Portuguesa, 2020), que estabelece metas para a produção de hidrogénio verde e investimentos nas respetivas infraestruturas, assim como a “Diretiva das Energias Renováveis”, “RED II” e “RED III”, (União Europeia, 2023), que definem critérios para a certificação de hidrogénio verde.

Também o Regulamento de Gases e Hidrogénio (Pacote Fit for 55), estabelece regras para o mercado europeu de hidrogénio, e o Regulamento Delegado da UE (2023/1184), que define critérios para considerar a produção de hidrogénio a partir de eletricidade totalmente renovável, (Conselho da União Europeia, 2025).

Em complemento, a Organização das Nações Unidas (ONU), que embora não tenha especificada qualquer legislação específica sobre hidrogénio, promove o seu desenvolvimento através de iniciativas, tais como:

O Acordo de Paris (2015), que incentiva o recurso a energias renováveis, rumo à descarbonização, onde se promove a utilização de hidrogénio verde, foi adotado no âmbito da

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre alterações climáticas, contando com 195 países signatários, tendo sido aprovado pela União Europeia em 2016.

O seu principal objetivo é reduzir os riscos das alterações climáticas, promovendo investimentos alinhados com um desenvolvimento sustentável, de baixas emissões de gases de efeito estufa.

Neste sentido, os países membros comprometeram-se a limitar o aumento da temperatura média global abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, tentando não ultrapassar 1,5 °C. A Comunicação da Comissão Europeia de 2016 reforça a necessidade de transição para uma economia livre de hidrocarbonetos, eficiente e circular, garantindo competitividade a longo prazo, (Diário da República, 2016).

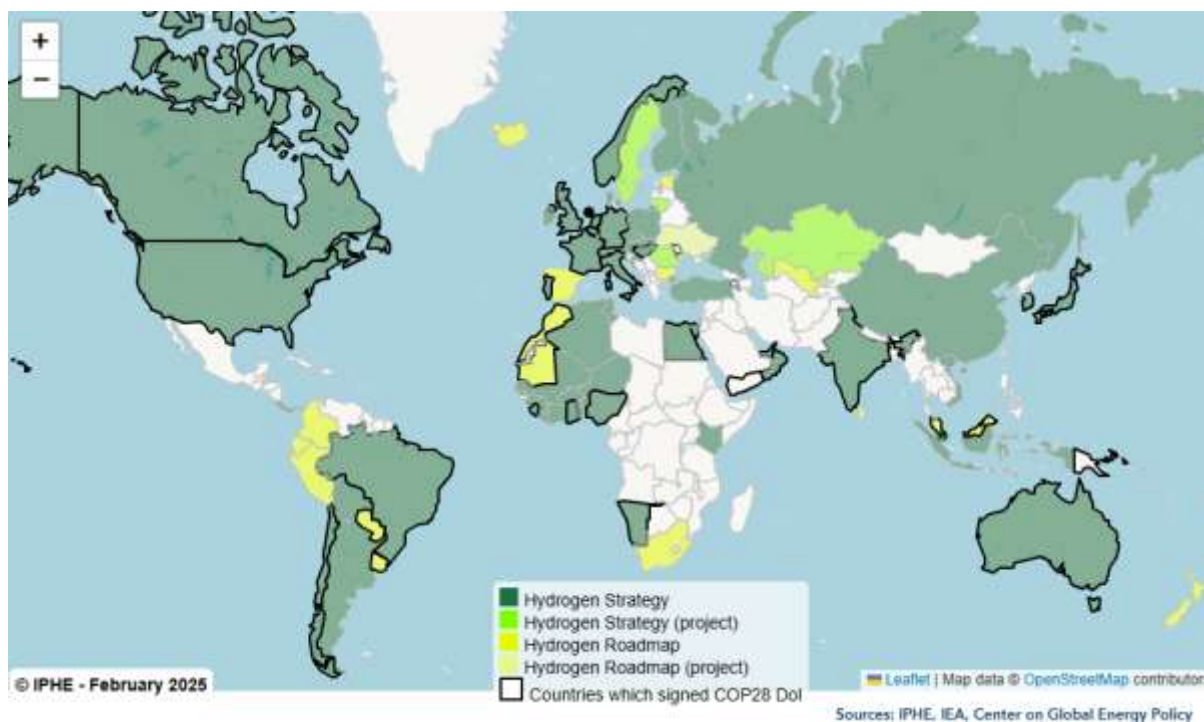
O “IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy)”, ou “Parceria Internacional para Hidrogénio e Células de Combustível na Economia”, que foi criada em 2003 como uma cooperação intergovernamental, tem como propósito acelerar a transição para sistemas energéticos e de mobilidade mais limpos e eficientes, com base em tecnologias de hidrogénio e células de combustível, estabelecendo uma parceria global para harmonizar normas e regulamentações.

Os países membros, comprometem-se a impulsionar o desenvolvimento dessas tecnologias, fortalecendo a segurança e eficiência energética, promovendo objetivos ambientais e contribuindo para o crescimento económico, (IPHE, 2025).

Na figura seguinte, estão representados os países de todo o Mundo que têm projetos nesta área, e que adotaram estratégias de implementação do hidrogénio verde na sua economia, no qual Portugal é parte interveniente, através da adoção da EN-H2 – Estratégia Nacional de Hidrogénio, que define como principais metas para 2030 (República Portuguesa, 2020):

- 5% de hidrogénio verde no consumo final de energia, no transporte rodoviário e na indústria;
- 15% de hidrogénio verde injetados nas redes de gás natural;
- 50 a 100 estações de abastecimento para hidrogénio;
- Entre 2 e 2,5 GW de capacidade de produção instalada de eletrolisadores.

Figura 1: Mapa mundial estratégico do hidrogénio, (IPHE, 2025)



Fonte: IPHE, 2025

No caso dos Estados Unidos, à semelhança do que se passa na União Europeia, não existe uma legislação específica e consolidada para o hidrogénio verde, sendo que inclusivamente existem diferentes diretrizes, conforme o estado em questão.

Estão, no entanto, a ser desenvolvidas normas de segurança e regulamentações específicas, para assegurar a conformidade e eficácia dos procedimentos adotados, relacionadas com a cadeia de valor do hidrogénio verde e promover o desenvolvimento desta tecnologia, (CATF, 2025).

Desde 2024, a IRENA está a liderar os esforços para mapear os métodos contabilísticos, normas e esquemas de certificação existentes, com foco no amoníaco, metanol e aço à base de hidrogénio verde produzidos por redução direta de ferro, (IRENA – International Renewable Energy Agency, 2024).

### Normas e regulamentos internacionais

Apresentam-se de seguida um conjunto de normas técnicas que poderão ser aplicáveis e transpostos às operações com hidrogénio verde e que regulam a segurança e qualidade, no contexto do hidrogénio verde, representadas na tabela do **Anexo 1**:

- ISO 14687: Define padrões de pureza do hidrogénio;
- ISO 19880: Regulamenta infraestrutura de abastecimento de hidrogénio gasoso;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- IEC 62282: Padrões para células de combustível;
- ISO/TC 197: Tecnologias de hidrogénio: Define padrões internacionais para produção, armazenamento, transporte e uso do hidrogénio;
- ISO 19880: Hidrogénio Gasoso;
- IEC 62282: Padrões para células de combustível;
- ISO 22734: Segurança em Eletrolisadores;
- ISO 16110-1: Segurança em Geradores de H<sub>2</sub>;
- Hidrogénio Comprimido: ISO 11114, ISO 11119, ISO 9809;
- H<sub>2</sub> Liquefeito: ISO 20421, ISO 21009, ISO 21010, ISO 21013, ISO 21028, ISO 21029;
- EN 1918: Armazenamento subterrâneo;
- IEC 62282-8-202: Segurança de Sistemas “Power to Power” (Futura Norma);
- ISO /TC 197: Hydrogen Technologies;
- IEC/TC 31: Equipment for explosive atmospheres – ATEX detectors;
- IEC/TC 58: Gas cylinders;
- IEC/TC 31: Protective Devices against excessive pressure;

Outras Normas Internacionais aplicáveis às operações com hidrogénio verde:

- ASME B 31.12: Hydrogen Piping and Pipelines;
- API STD 1104: Standard for welding pipeline and related facilities;
- ASME B31.12: Tubagens de hidrogénio e gasodutos;
- EN 1594/2009: Sistemas de abastecimento de gás - Conduitas para pressão máxima de funcionamento superior a 16 bar;
- ISO 13623: Indústrias do Petróleo e do Gás Natural Sistemas de Transporte por Gasoduto;
- Diretiva ATEX 2014/34/CE: Relativa à aproximação das legislações dos estados-membros sobre aparelhos e sistemas de proteção destinados a ser utilizados em atmosferas potencialmente explosivas;
- Certificação CertifHy (Europa): Define critérios para garantir que o hidrogénio seja de origem renovável;
- Comissão Especial de Estudos CEE 67: Tecnologias de hidrogénio;
- IEA HIA: International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement;
- HySafe: International Association for Hydrogen Safety;
- UN WP.29: United Nations Working Party 29 that developed GTR #13 (Global Technical Regulation) for hydrogen and fuel cell vehicles (FCVs);

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- UN SCETDG: United Nations Sub-Committee on Transportation of Dangerous Goods;

O conjunto de normas existentes e adotadas globalmente sobre este tema, influenciam outras normas a serem criadas ou alteradas, mais específicas para uma determinada região, ou para um determinado setor, resultando, por vezes, numa sobreposição e partilha de requisitos e diretrizes.

Neste sentido, é de extrema importância a partilha e uma cooperação internacional para o desenvolvimento de normas, que não só abranjam todos os critérios de todas as partes envolvidas, mas também não constituam uma barreira, e não introduzam demasiada complexidade, sendo para isso necessário estabelecer compromissos entre o cenário desejável, e o que é adequado na prática, (GH2 - Green Hydrogen Organisation, 2023).

Dada a evolução desta tecnologia e a sua curva de aprendizagem, assim como o surgimento de novos projetos com vista a uma produção em larga escala, existe a necessidade de surgirem constantemente diversas atualizações dessas diretivas, acompanhando esse mesmo crescimento, no qual diferentes países adotam critérios por vezes um pouco distintos, de forma a adaptarem-se o mais adequadamente possível às suas necessidades e metas estipuladas, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024).

De acordo com as diretrizes da ISO 9001:2015, (ISO Standard, 2015), a atualização e revisão das normas será, portanto, um processo iterativo e de melhoria contínua, de grande responsabilidade, que deverá acompanhar a evolução da tecnologia e das “lições aprendidas”, através da operação das instalações que se enquadram neste setor, devendo envolver todos os intervenientes, incluindo autoridades e instituições relevantes, que deverão ter parte ativa, contribuindo para a otimização destas diretrizes, (European Clean Hydrogen Alliance, 2023).

A identificação de oportunidades de melhoria nas normas e legislação em questão deverão levar à avaliação dessas oportunidades em termos de possíveis impactos, benefícios e inconvenientes, e caso se verifiquem viáveis, deverão dar origem à introdução de revisões dos documentos, (European Clean Hydrogen Alliance, 2023).

No **Anexo 2**, está representada a tabela com os principais sistemas de certificação e regulatórios existentes e planeados, assim como as estruturas regulamentares que definem limites de emissões de gases por efeito de estufa para o hidrogénio e seus derivados.

### 1.1.2 Legislação nacional

Usualmente, uma parte significativa das diretivas europeias, são adotadas para o contexto nacional por transposição direta, onde são subscritas a maioria das diretrizes das normas internacionais, existindo, algumas variações em determinados contextos, de forma a conjugar-se mais adequadamente com a realidade nacional.

Devido ao crescente interesse pela tecnologia de produção de hidrogénio verde, e com alguns projetos já em desenvolvimento, torna-se necessário criar legislação e adaptar a legislação nacional existente a este novo contexto.

É particularmente importante no que respeita à segurança operacional e à simplificação dos licenciamentos para novos projetos, não só a nível nacional, mas também a nível europeu, onde ainda se verificam diversas lacunas regulatórias específicas para o hidrogénio verde, que até ao momento, têm sido parcialmente colmatadas com as normas técnicas que têm surgido, entretanto, (União Europeia, 2023).

Em termos legais, e a nível nacional, embora não exista legislação específica para a produção, armazenamento e utilização do hidrogénio verde, existe em vigor um conjunto de legislação no domínio dos gases em geral, fazendo algumas referências ao hidrogénio nas suas diversas formas.

É sobre esta legislação e diretrizes, que atualmente as empresas que operam com o hidrogénio verde se regem e que terão de ter sempre presentes, nomeadamente quanto às suas orientações e requisitos.

No âmbito do hidrogénio verde mais em particular, destacam-se o Regulamento do Sistema de Incentivos de Apoio à Produção de Hidrogénio Renovável e Outros Gases Renováveis, descrito na Portaria n.º 98-A/2022, de 18 de fevereiro, (Diário da República, 2022), que foi aprovado pelo Governo Português no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR).

O seu objetivo é de incentivar a promoção do hidrogénio verde como parte de uma estratégia para uma economia descarbonizada, criando as condições necessárias para a descarbonização da rede de gás natural e contribuir para o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogénio verde.

O Regulamento da Rede Nacional de Transporte de Gás e o Regulamento da Rede Nacional de Distribuição de Gás, também serão diretivas importantes, afetadas pelas devidas alterações, para que se adequem a este novo contexto e estabelecer critérios técnicos e

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

operacionais para a produção, certificação, transporte, armazenamento e injeção de hidrogénio renovável na rede de gás, (Diário da República, 2025).

Atendendo à falta de legislação nacional específica para o hidrogénio verde, existem algumas normas e diretivas que se referem a gases de características equivalentes que podem servir como base para as operações com esta tecnologia, dentro das quais se poderão destacar:

1 – Lei n.º 75-C/2020, de 31 de dezembro - Aprova as grandes opções para 2021-2023 que integram as medidas de política e os investimentos que as permitem concretizar.

2 – Lei n.º 75-B/2020, de 31 de dezembro - Aprova o Orçamento de Estado para 2021, sendo que consagra no seu artigo 217.º, “(...) Artigo 217.º - Relatório relativo aos apoios no âmbito do Plano Nacional do Hidrogénio (...)”. A partir de 2021, o Governo divulga publicamente um relatório anual relativamente aos apoios à produção de hidrogénio verde e a projetos de hidrogénio previstos no âmbito do Plano Nacional do Hidrogénio, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, de 14 de agosto.

3 – Resolução do Conselho de Ministros n.º 98/2020, de 13 de novembro - Aprova a Estratégia Portugal 2030, enquanto referencial principal de planeamento das políticas públicas de promoção do desenvolvimento económico e social do País, considerando os objetivos da “Promoção da mobilidade sustentável”, da “Descarbonização da Indústria” e da “Transição e Eficiência Energética”, estabelecidos no PNEC 2030, como passos fundamentais para atingir a neutralidade carbónica.

4 – Portaria n.º 247/2020, de 19 de outubro - Altera o Regulamento Específico do Domínio da Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos, em anexo à Portaria n.º 57-B/2015, de 27 de fevereiro.

5 – Decreto-Lei n.º 62/2020, de 28 de agosto sobre o Sistema Nacional de Gás –Bases de concessão – Estabelece a organização e o funcionamento do Sistema Nacional de Gás e o respetivo regime jurídico e procede à transposição da Diretiva 2019/692, dando nota do reconhecimento crescente dos gases renováveis, em particular do hidrogénio, como oportunidade e vetor energético moderno, limpo e versátil, promovendo uma transição energética que aposta no desenvolvimento económico nacional, aliando competitividade e sustentabilidade.

6 – Decreto-Lei n.º 60/2020, de 17 de agosto - Estabelece o mecanismo de emissão de garantias de origem para gases de baixo teor de carbono e para gases de origem renovável, atualizando as metas de energia de fontes renováveis.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

8 – Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, de 14 de agosto - Aprova a Estratégia Nacional para o Hidrogénio, que tem por objetivo promover a introdução gradual do hidrogénio numa estratégia, mais abrangente, de transição para uma economia descarbonizada.

9 – Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de julho - Aprova o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030).

10 – Despacho n.º 6403-A/2020, de 17 de junho - Abertura de período para manifestação de interesse para participação no futuro Projeto Importante de Interesse Europeu Comum (IPCEI) de Hidrogénio.

11 – Despacho n.º 2791/2025, de 28 de fevereiro – Aprova o Regulamento da Rede Nacional de Distribuição de Gás.

Todos os referidos regulamentos estão alinhados com a estratégia da UE para o hidrogénio, visando garantir a segurança de pessoas e bens e impulsionar a produção de hidrogénio verde.

A legislação nacional aplicável no contexto do hidrogénio verde inclui ainda:

- Portaria n.º 142/2011 – Aprova o Regulamento da Rede Nacional de Transporte de Gás Natural;
- Portaria n.º 361/98 – Aprova o Regulamento Técnico Relativo ao Projeto, Construção, Exploração e Manutenção das Instalações de Gás Combustível Canalizado em Edifícios;
- Decreto-Lei n.º 232/90 – Estabelece os princípios a que deve obedecer o projeto, construção, a exploração e a manutenção do sistema de abastecimento de gases combustíveis canalizados;
- Portaria n.º 690/2001 – Altera as Portaria n.º 386/94, de 16 de junho (Regulamento Técnico Relativo ao Projeto, Construção, Exploração e Manutenção de Redes de Distribuição e Gases Combustíveis), 361/98, 26 de junho (Regulamento Técnico Relativo ao Projeto, Construção, Exploração e Manutenção das Instalações de Gás Combustível Canalizado em Edifícios) e 362/2000, de 20 de junho (Procedimento Relativos às Inspeções e à Manutenção das Redes e Ramais de Distribuição e Instalações de Gás);
- Decreto-Lei n.º 97/2017 – Estabelece o regime das instalações de gases combustíveis em edifícios;
- Decreto-Lei n.º 131/2019 – Aprova o Regulamento de Instalação e de Funcionamento de Recipientes sob Pressão Simples e de Equipamentos sob pressão;
- EN 10208-1 – Redes de distribuição de gases combustíveis. Tubos de aço sem costura. Características e ensaios;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Despacho n.º 806-B/2022 do Regulamento da Rede Nacional de Distribuição de Gás. Considera troços de tubagem a 100 % de hidrogénio (Artigo 6.º Especificidades), (Artigo 2.º Dimensionamento das redes), (Artigo 3.º Pressões), (Artigo 4.º Limitação de pressão de serviço), (Artigo 5.º Materiais constituintes da rede), (Artigo 6.º Seccionamento das tubagens), (Artigo 7.º Representação cartográfica da rede), (Artigo 8.º Sinalização das tubagens enterradas).

### Diretiva Seveso

A ocorrência de acidentes graves que envolvem produtos perigosos, como é o caso do hidrogénio, constitui um potencial perigo para as organizações e respetivos trabalhadores, assim como para a sociedade e ambiente onde estas se inserem, podendo-se traduzir em perdas humanas e económicas importantes, que por sua vez condicionam o seu desenvolvimento e crescimento sustentável.

Acidentes graves envolvendo hidrogénio podem ocorrer de diversas formas, traduzindo-se como acontecimentos, incêndios, explosões, ou mesmo pela sua libertação, de graves proporções, resultantes da operação e funcionamento de estabelecimentos abrangidos pela Diretiva Seveso.

No contexto das operações com hidrogénio verde, é aplicável a Diretiva Seveso, com uma importância fundamental, devido aos riscos específicos associados a esta tecnologia, classificando este gás como uma substância perigosa, (Mondril, 2016).

O seu objetivo fundamental, consiste na prevenção de acidentes graves que envolvam produtos perigosos e no estabelecimento de regras e requisitos que devem ser implementados pelas unidades industriais neste setor, com vista a minimizar quaisquer consequências para a saúde humana e ambiente, (APA, 2011).

Na impossibilidade de o acidente ser evitado, os planos de emergência internos e externos implementados segundo as recomendações da diretiva, têm igualmente como finalidade, limitar as consequências resultantes dos potenciais acidentes ou fuga de hidrogénio.

A Diretiva Seveso desde a sua primeira versão, procura estabelecer um conjunto de requisitos destinados a manter dentro de parâmetros controláveis, os potenciais perigos associados a acidentes graves que envolvem produtos perigosos, (IGAMAOT, 2016).

Procura ainda evitar ocorrências semelhantes a acidentes que sucederam a nível mundial no passado, com consequências graves quer a nível económico, sociais, e em alguns casos representando a perda de vidas humanas, com um impacto muito grande nas populações,

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

através da implementação de Sistemas de Gestão de Prevenção de Riscos eficazes, (Parlamento Europeu, 2012).

A Diretiva Seveso III (Diretiva 2012/18/UE), em particular, representa um avanço significativo em termos de alinhamento com regulamentações internacionais, introduzindo diversos requisitos e metodologias que se revelaram muito positivos no que respeita à prevenção de acidentes graves e mitigação de suas consequências.

É amplamente considerada como uma referência para a política de acidentes industriais e servindo de modelo para a legislação em muitos países em todo o mundo, (Mondril, 2016).

Verifica-se que através das suas recomendações, é possível otimizar, consolidar e adequar os Planos de Emergência já implementados, e torná-los mais eficazes, garantindo uma resposta mais rápida e eficaz a potenciais acidentes, essenciais para instalações que operam com o hidrogénio verde.

Constata-se ainda que a metodologia sugerida pela diretiva de implementar programas de treino, com realização frequente de simulacros, melhora a performance e a capacidade de reação dos trabalhadores, traduzindo-se em resultados positivos, no que respeita à prontidão das instalações e das autoridades locais para lidar com acidentes, sendo fundamental para lidar adequadamente com as características muito específicas do hidrogénio verde, (IGAMAOT, 2022).

A Diretiva promove ainda uma cultura do acesso e divulgação da comunicação, interna e externa às organizações, na qual se verifica uma maior preocupação de conceder ao público acesso à informação de uma forma transparente e cuidada, detalhando informações sobre os riscos associados às instalações locais e às medidas de segurança implementadas, resultando num acréscimo da sua confiança, que é de extrema importância no contexto do hidrogénio.

A Diretiva Seveso III desempenha ainda um papel muito relevante, no alinhamento das organizações com os mercados altamente industrializados da União Europeia, que rumam em direção ao objetivo da descarbonização e acidentes zero, através de elevação dos níveis atuais de prevenção de acidentes industriais, trazendo uma abordagem sistemática e abrangente para a gestão de riscos associados a produtos perigosos, beneficiando as indústrias, a sociedade e o meio ambiente.

Através de esforços para melhorar a capacidade de prevenção de acidentes, melhoria na resposta a emergências, aumento da transparência e comunicação, e incentivo à inovação, a Diretiva contribui para a construção de um ambiente industrial mais seguro e sustentável.

### Diretiva ATEX

A Diretiva ATEX refere-se ao conjunto de duas diretivas europeias que estabelecem os requisitos mínimos de segurança para equipamentos e locais de trabalho onde podem ocorrer atmosferas potencialmente explosivas.

O seu principal objetivo prende-se com a prevenção de explosões e incêndios em ambientes industriais, tornando-se como uma das principais referências regulamentares para as instalações que operam com hidrogénio verde.

As duas diretivas principais, têm diferentes focos, conforme abaixo indicado:

A Diretiva 2014/34/UE (ATEX 114) aplica-se aos fabricantes de equipamentos e sistemas de proteção, assegurando que os produtos certificados ao abrigo desta diretiva podem ser utilizados em atmosferas explosivas, conferindo segurança na sua utilização, cumprindo todos os requisitos necessários para evitar eventuais ignições em atmosferas explosivas, permitindo a sua comercialização em toda a UE sem requisitos adicionais.

A Diretiva 1999/92/CE (ATEX 137) define os requisitos mínimos para melhorar a segurança e a proteção da saúde dos trabalhadores que possam estar expostos a locais com risco de explosão. Esta diretiva exige que as empresas avaliem os riscos, classifiquem as áreas perigosas em "zonas" e implementem medidas de prevenção e proteção adequadas, (Parlamento Europeu, 1999).

O hidrogénio verde, apesar de ser considerado um vetor energético limpo, é um gás altamente inflamável e explosivo, com uma elevada energia potencial de explosão e um baixo limite de inflamabilidade, o que o classificam como um gás potencialmente perigoso, no Grupo de Explosão IIC, o subgrupo mais rigoroso para gases e vapores. (Weg, 2020), exigindo elevados níveis de proteção e um rigoroso controlo de segurança.

Neste contexto, a Diretiva ATEX é essencial para as operações de hidrogénio verde, pois esta constitui uma das bases para a criação de um ambiente de trabalho seguro em todas as etapas do processo.

O processo de eletrólise para obter hidrogénio pode criar atmosferas explosivas em determinadas áreas, sobretudo perto dos eletrolisadores ou em zonas de armazenamento. A diretiva garante que os equipamentos (como ventiladores, sensores e sistemas de controlo) utilizados nestas áreas são certificados para não se tornarem fontes de ignição.

No que respeita ao seu armazenamento e transporte, o hidrogénio precisa de ser armazenado em reservatórios específicos, mais detalhados nos próximos capítulos e transportado através de gasodutos ou veículos. A diretiva ATEX assegura que todos os

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

componentes, desde válvulas e bombas até aos próprios recipientes, são construídos e operados de forma a minimizar o risco de fugas e explosões.

A Diretiva ATEX é uma referência essencial para a segurança na indústria do hidrogénio verde, indicando medidas preventivas e o uso de equipamentos adequados para minimizar qualquer risco de explosão, permitindo que as operações com o hidrogénio verde se possam realizar de forma segura e sustentável, (Comissão das Comunidades Europeias, 2003).

Os seus requisitos preveem a classificação de gases e vapores perigosos atribuindo um grupo de explosão e uma classe de temperatura a cada tipo de substância.

De acordo com o Guia para Atmosferas Explosivas, (Weg, 2020), poderemos classificar o hidrogénio da seguinte forma:

O hidrogénio é enquadrado no Grupo de Explosão IIC, que é o subgrupo mais perigoso e rigoroso para gases, havendo a necessidade de recorrer a equipamentos com o mais elevado nível de proteção.

Quanto à Classe de Temperatura, a sua classificação corresponde ao nível T1, pois a temperatura de autoignição do hidrogénio é superior a 450 °C. O equipamento destinado a áreas com hidrogénio deve, por isso, ser certificado para a classe de temperatura T1 ou superior, garantindo que a sua temperatura de superfície máxima não exceda este valor para evitar a ignição da mistura gasosa.

A Diretiva 2014/34/UE estabelece ainda categorias de equipamentos correspondentes às zonas onde se inserem, em que a Categoria 1 corresponde à Zona 0, a Categoria 2 à Zona 1, e a Categoria 3 à Zona 2, (Parlamento Europeu, 1999).

**Tabela 1: Correspondência de zonas e equipamentos ATEX (Gás)**

<b>Zona</b>	<b>Presença de Atmosfera Explosiva</b>	<b>Nível de Proteção Requerido</b>	<b>Descrição das Zonas</b>
Zona 0	Permanente ou frequente	Muito elevado	Espaços Confinados ou interior de Reservatórios de armazenamento
Zona 1	Provável / Ocasional	Elevado	Salas de eletrólise e compressores
Zona 2	Improvável / Curta Duração	Normal	Áreas Abertas e Ventiladas

**Fonte: Anexos I e II da diretiva 1999/92/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 1999**

No caso do hidrogénio, cuja classificação se insere no Grupo IIC, a seleção de equipamentos é particularmente rigorosa, havendo requisitos para restringir a utilização de

dispositivos com baixa emissão térmica, com ausência de arcos elétricos, incapazes de causar ignição, mesmo em caso de falha.

Estes equipamentos devem ainda ser dotados de invólucros robustos, capazes de conter uma explosão interna e impedir a sua propagação para a atmosfera circundante.

A gestão eficaz dos riscos ATEX e a implementação de medidas de controlo eficazes em linha com a diretiva, são fundamentais para a proteção de pessoas e bens, assim como para a viabilidade estratégica e a aceitação pública do hidrogénio verde como um vetor energético de referência para a descarbonização da sociedade.

### 1.2. Enquadramento conceptual

#### 1.2.1. A importância do hidrogénio verde no contexto atual

Atualmente, o hidrogénio verde é considerado como uma das principais soluções para o problema da descarbonização, nomeadamente em aplicações industriais, transportes, armazenamento sazonal de energia, (DGEG, 2018), (Diário da República, 2020), e em aplicações onde a utilização direta da energia elétrica não é considerada viável ou economicamente não tão competitiva.

A Direção Geral de Energia e Geologia refere que se deve “(...) traçar desde já uma estratégia que permita alcançar e consolidar a trajetória que Portugal tem vindo a prosseguir nas últimas décadas, assente numa combinação de tecnologias de baixo carbono, assegurando ao mesmo tempo que a economia nacional se mantém competitiva e resiliente (...)”, (DGEG, 2019a), o que salienta a importância que Portugal atribui a este tema, (EDP, 2021a).

De acordo com as metas estipuladas no acordo de Paris, o hidrogénio verde poderá desempenhar um papel importante na contribuição para alcançar os objetivos traçados até 2050, (União Europeia, 2016).

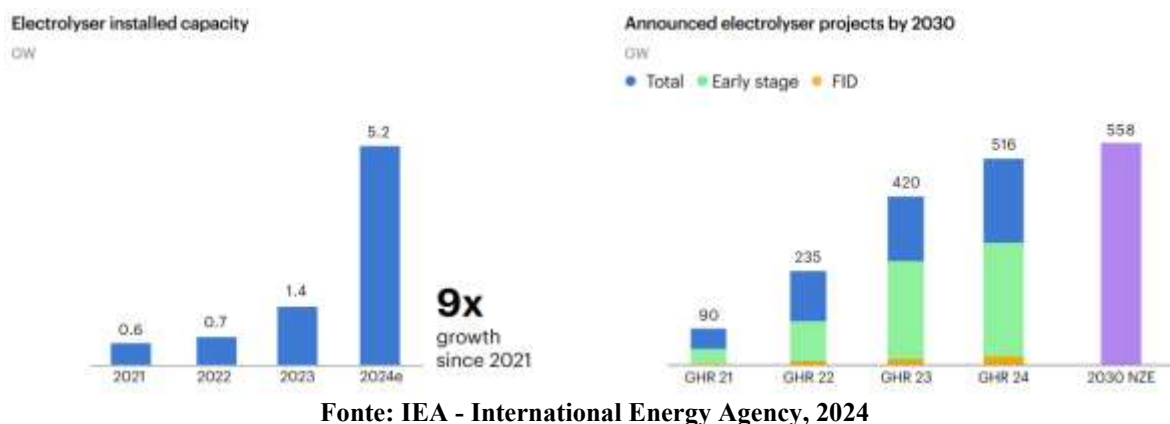
Por sua vez, a Agência Internacional de Energia, refere que se produzem atualmente cerca de 100 milhões de toneladas de hidrogénio por ano, sendo que 75% desta produção tem origem no gás natural e outros combustíveis fósseis. O hidrogénio verde apenas representa 0.1% da produção total de hidrogénio, (International Energy Agency, 2024).

Até 2050, a Agência Internacional para as Energias Renováveis, estima que a produção de hidrogénio verde passe a representar cerca de 12 % da energia total utilizada à escala mundial, (IRENA, 2025).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

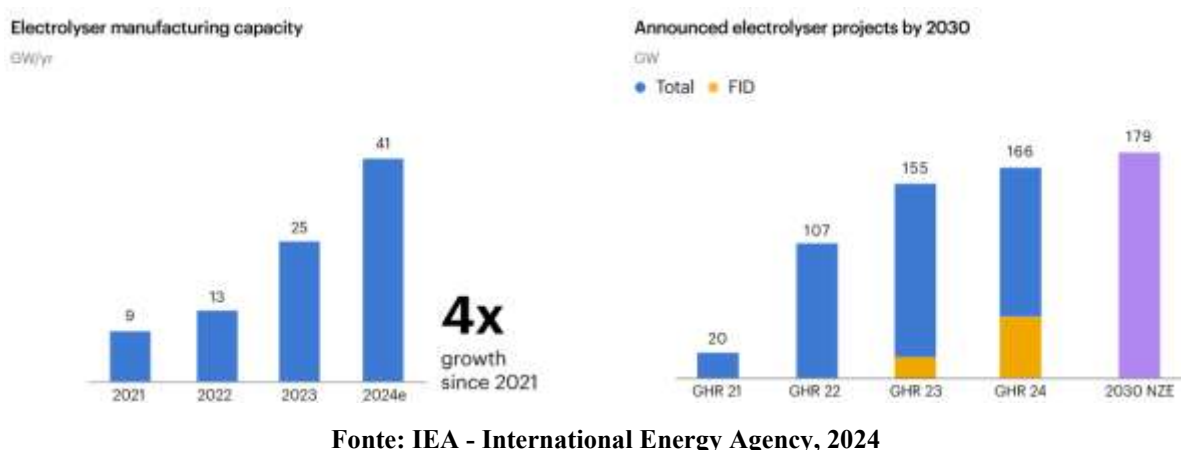
A nível global, a produção de hidrogénio ainda depende maioritariamente de combustíveis fósseis, com a eletrólise da água a representar apenas 4% do total da sua produção, (DGEG, 2019a). Na Europa, 95% do hidrogénio é obtido pela transformação do gás natural, enquanto a eletrólise (com fontes de energia renováveis e não renováveis) e a gaseificação de biomassa, contribuem com apenas 4% e 1%, respetivamente, (DGEG, 2019b)

Figura 2: Capacidade instalada de eletrolisadores em (GW) e capacidade instalada de eletrolisadores estimada até 2030 (NZE – “Net Zero Emissions” - Emissões Zero)



Fonte: IEA - International Energy Agency, 2024

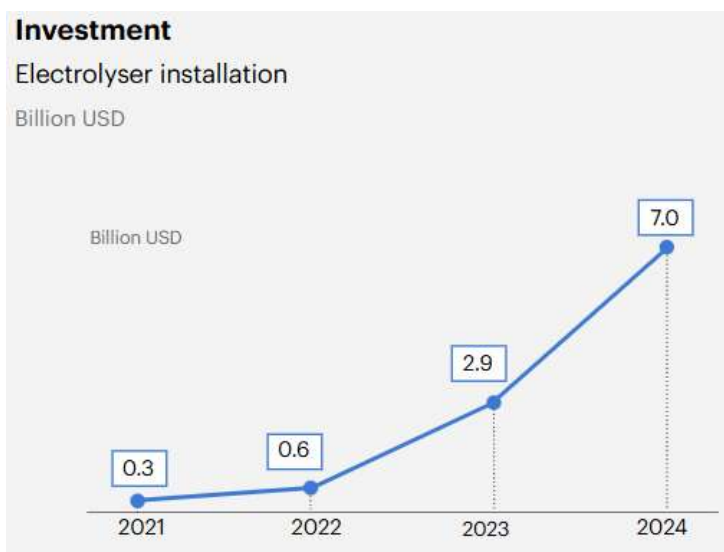
Figura 3: Capacidade de produção anual de eletrolisadores em (GW) e projetos de eletrolisadores anunciados até 2030)



Fonte: IEA - International Energy Agency, 2024

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Figura 4: Investimento em eletrolisadores em bilhões de dólares desde 2021 até 2024



Fonte: IEA - International Energy Agency, 2024

A introdução do hidrogénio verde no mercado energético pode reduzir cerca de 80 mil milhões de toneladas de emissões de dióxido de carbono até 2050, contribuindo decisivamente para atingir as metas globais de descarbonização previstas, (Pathak et al, 2023).

O seu potencial depende dos recursos naturais locais, como a água, o sol, o vento e a energia hidroelétrica. O desenvolvimento de infraestruturas na área das energias renováveis e na produção e armazenamento de hidrogénio verde é fundamental para impulsionar esta tecnologia, tanto para consumo local quanto para exportação, (Diário da República, 2020).

Em Portugal, os investimentos nesta área ganham cada vez mais relevância, ajustando-se aos compromissos climáticos com a União Europeia, demonstrado pelos resultados obtidos em 2024, em que a energia consumida proveniente de fontes renováveis ter representado 71% do consumo nacional de eletricidade, (Burton, 2021). Esta percentagem atingida, resulta em que as emissões de CO<sub>2</sub> tenham atingido os níveis mais baixos desde a década de 90.

O hidrogénio verde, é por muitos considerado como a fonte energética limpa mais promissora do século, devido às suas características físicas e químicas, conforme será abordado em detalhe nos capítulos seguintes.

O seu elevado poder calorífico, uma boa condutividade térmica, elevada taxa de reação e a facilidade na obtenção dos recursos necessários para a sua produção, constituem uma opção muito válida para a substituição gradual de combustíveis fósseis em contexto industrial, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

De acordo com o estimado pela DGEG, “(...) *Alcançar a neutralidade carbónica em 2050 implica uma redução significativa das emissões de GEE, que se traduz numa trajetória de redução de -45% a -55% em 2030, -65% a -75% em 2040 e -85% a -90% em 2050, face aos níveis de 2005. (...)*”. A mesma fonte, refere ainda que o cumprimento desta estratégia, implica desafios significativos importantes, cujo tema será abordado num dos próximos capítulos, (DGEG, 2021).

A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), estima que o potencial global para produzir hidrogénio verde é até vinte vezes superior à procura global total de energia primária em 2050, (IRENA, 2025).

De forma a acompanhar o aumento da produção de hidrogénio verde, também será necessário um aumento da capacidade instalada de centrais de produção de energia renovável, responsáveis por fornecer energia com a quantidade e disponibilidade necessária a custos reduzidos e competitivos.

Este acesso a fontes de energia renovável abundantes e de baixo custo, será um fator fundamental para a competitividade na produção de hidrogénio verde e na gestão energética do país.

O comércio à escala internacional poderá também desempenhar um papel significativo no equilíbrio entre a oferta e a procura de hidrogénio verde, podendo existir um intercâmbio de fornecimento de energia entre regiões que têm mais capacidade de produção, com outras que a importação seja economicamente mais viável, (IRENA e WTO, 2023).

A transição desta tecnologia para uma larga escala, impulsionará um crescimento significativo nas transações comerciais, relacionadas com as tecnologias e serviços essenciais à sua cadeia de valor, incluindo a produção de eletrolisadores e diversos equipamentos do sistema.

Diante desse cenário, várias economias globais já definiram estratégias nacionais para o hidrogénio verde, procurando antecipar desafios futuros e estabelecer condições favoráveis para que as empresas se adaptem aos mercados. Para isso, estão a ser desenvolvidas políticas comerciais mais abertas, previsíveis, coerentes e inclusivas, facilitando a integração do hidrogénio verde na economia global, (IRENA e WTO, 2023).

Segundo dados estatísticos da “IRENA”, (2025), estima-se que em 2050, cerca de um quarto da procura global total de hidrogénio, poderá ser satisfeita através do comércio internacional, que pode dar um enorme contributo para que o hidrogénio verde possa vir a ter um papel decisivo no equilíbrio entre a oferta e a procura.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Desta forma será possível fazer uma gestão de recursos mais eficaz, satisfazendo a sua procura interna, e em caso excedentário, poderá exportar para o exterior, promovendo intercâmbio entre parceiros comerciais, (IRENA, 2025).

O hidrogénio verde é visto como uma oportunidade estratégica para Portugal liderar a transição energética, e neste caso, a sua abundância de recursos renováveis e uma vasta costa marítima, associados à extensa rede energética já existente, são fatores que favorecem a sua competitividade e reforçam a sua posição estratégica, (Anouti et al., 2023).

Por outro lado, as regiões com abundância de centrais geradoras de energia renovável, poderão ser bastante atrativas para a implantação de novas infraestruturas industriais, ou a deslocalização de alguns complexos industriais, cuja utilização de energia é bastante intensiva, permitindo obter acesso a energia a custos mais competitivos, impulsionando a economia de certas regiões.

Para que seja economicamente viável em relação aos combustíveis fósseis, são necessários avanços tecnológicos e redução de custos. A expansão da produção e uso do hidrogénio verde depende de políticas claras das autoridades, que devem promover a capacidade de produção, garantir fornecimento contínuo de energia renovável e desenvolver infraestrutura de armazenamento e transporte, (IRENA, 2020), (República Portuguesa, 2020).

Portugal está ainda envolvido em projetos de referência, nomeadamente o Corredor Ibérico de hidrogénio verde, que estabelecerá uma interligação das redes de fornecimento de hidrogénio entre Portugal, Espanha e França, tendo em vista alcançar outros mercados europeus importantes e de elevada procura desta fonte de energia, como é o caso da Alemanha e França, o que poderá representar um benefício económico de grande importância para o país, (IRENA, 2020a).

Conforme exposto, o investimento no hidrogénio verde poderá impulsionar a redução das emissões de carbono e gerar outro tipo de oportunidades económicas, nomeadamente a criação de empregos qualificados e o reforço da independência energética perante outros países, já que Portugal importa grande parte da sua energia sob a forma de combustíveis fósseis.

A produção e utilização do hidrogénio verde pode reduzir esta dependência, reforçando a segurança energética nacional.

Em linha com as diretivas da norma NP EN ISO 14001:2015, que define requisitos para sistemas de gestão ambiental, para garantir um crescimento sustentável, é essencial envolver as comunidades locais e mitigar possíveis impactos ambientais, promovendo uma transição equilibrada e responsável.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O investimento contínuo na implementação de infraestruturas de produção de hidrogénio verde, permite potenciar um vasto conjunto de oportunidades favoráveis para o crescimento da economia (ISO Standards, 2015).

A importância do hidrogénio verde não se reduz apenas à sua produção para utilização na indústria, mas representa também um fator muito importante nos temas relacionados com a eficiência energética, que é cada vez mais um tópico de referência que deve ser abordado com muita seriedade e empenho.

Neste aspeto, a capacidade de armazenamento do hidrogénio verde por longos períodos e poder ser reconvertido novamente em energia elétrica, pode representar uma forma eficaz para armazenar excedentes de energia renovável, contribuindo decisivamente para uma gestão de energia mais eficiente, na medida em que poderá recorrer a essa energia, nos períodos em que existe menor produção ou de maior procura por parte dos consumidores, (DGEG, 2018).

Por outro lado, em todos os períodos que existe um excedente de energia, esta poderá ser utilizada para produzir e armazenar novamente hidrogénio verde, permitindo assim, uma maior flexibilidade e eficiência dos recursos energéticos existentes.

Este potencial permite mitigar a intermitência de produção das centrais de produção de energias renováveis, no que respeita à falta de irradiação em períodos de consumo, no caso das centrais fotovoltaicas, ou a falta de vento, no caso das centrais eólicas, conforme está indicado na Atualização do Plano Nacional de Energia e Clima 2030, redigido na Resolução da Assembleia da República, nº127/2025, (Diário da República, 2025) e (ISQ, 2024).

A utilização do hidrogénio verde em grande escala, irá encontrar diversas aplicações na sociedade atual, que ainda recorrem a combustíveis fósseis, e representam uma parte significativa das emissões de gases por efeitos de estufa libertados para a atmosfera, (OECD, 2023).

Uma aplicação evidente e que representa uma parte importante dessas emissões é a indústria pesada, nomeadamente a que envolve processos industriais de alta temperatura, como a produção de aço, cimento e cerâmica, cujo recurso ao hidrogénio verde, resultará num decréscimo significativo das emissões de carbono, (Reda, 2023).

Quanto aos transportes, que também representam uma das maiores fontes de emissão de gases poluentes, a utilização de hidrogénio verde representa uma alternativa promissora para a utilização em transportes pesados e de longa distância, como camiões, navios e aviões, autocarros e comboios, (European Clean Hydrogen Alliance, 2023), (EDP, 2024a).

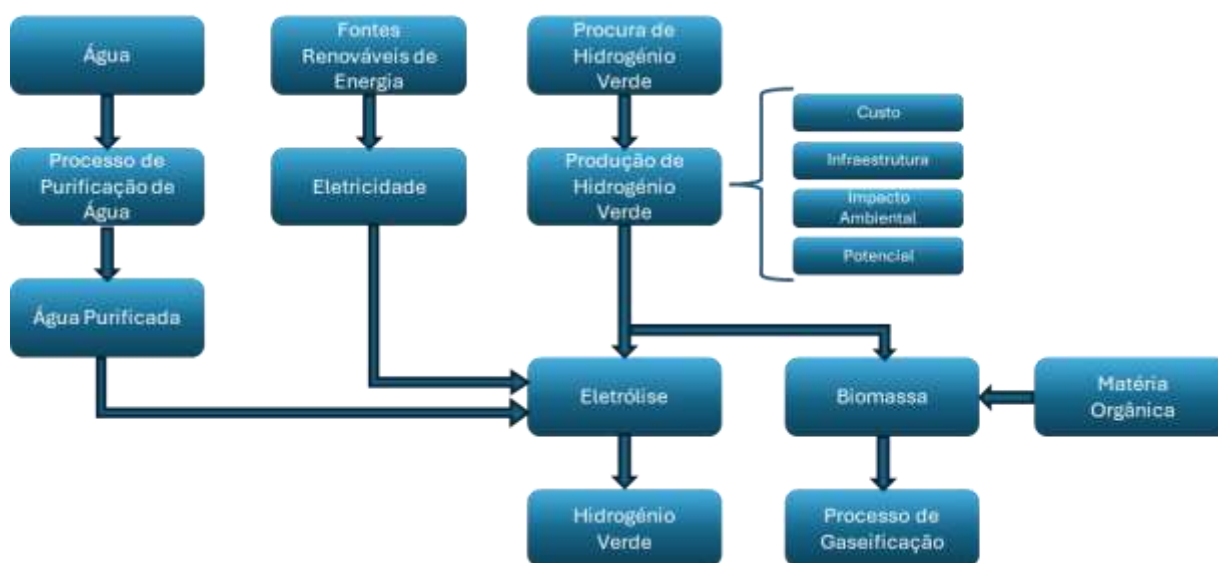
Relativamente à importância ambiental, atendendo a que a produção de hidrogénio verde, assenta exclusivamente na utilização de fontes de energia verdes e renováveis, e que

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

nenhum poluente prejudicial ou gás com efeito de estufa é libertado diretamente durante o processo, o produto resultará numa fonte de energia sustentável e limpa.

No sentido de salvaguardar todas as perspetivas em termos ambientais, deverá ser analisada toda a cadeia de valor do hidrogénio verde, passando pela produção, transporte e armazenamento até à utilização final, garantindo o mínimo de dependências na utilização de combustíveis fósseis.

**Figura 5: Processo simplificado do processo de produção do hidrogénio verde**



Fonte: Adaptado de Oxford Academic, 2024

Inequivocamente, o hidrogénio verde afirma-se como uma oportunidade decisiva, para Portugal se posicionar na liderança da transição energética dentro do mercado global do hidrogénio verde.

O seu investimento sustentado, cumprindo criteriosamente políticas estruturadas assentes nesta tecnologia, além de promover a descarbonização e contribuir para as metas ambientais estabelecidas, poderá resultar num desenvolvimento económico muito substancial, e impulsionar a sua própria segurança energética, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024).

Acompanhando os avanços tecnológicos que se irão verificar, o hidrogénio verde irá progressivamente abranger um maior número de aplicações, impulsionado pela redução de custos e pelo aumento da eficiência dos eletrolisadores, inevitavelmente passando por um período de transição energética, que impactará em diversos fatores da sua atividade e organização, (Marcon, 2021).

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

Para que o comércio global de hidrogénio se torne viável em larga escala, será necessário atingir metas a nível técnico e económico, com previsões apontando para um crescimento expressivo até 2050.

Estima-se que 55% do hidrogénio comercializado globalmente será transportado por gasodutos, muitos dos quais utilizarão infraestruturas de gás natural existentes, (APEG, 2025), contribuindo para a redução de custos e viabilização desta transição energética, (International Renewable Energy Agency, 2022).

Deve-se salientar a importância do desenvolvimento de uma cadeia de abastecimento de hidrogénio verde estável, que será essencial na sua consolidação como fonte de energia limpa e sustentável. Este desenvolvimento poderá impulsionar a criação de empregos e acelerar a implementação de tecnologias renováveis, para garantir que a produção de hidrogénio não afete outras necessidades energéticas essenciais, (Marcon, 2021).

Neste sentido, também a educação e as iniciativas comunitárias, são fundamentais para ampliar o conhecimento público e fomentar o apoio à transição energética. Tecnologias como a eletrólise alimentada por energia solar, eólica, hídrica e biogás desempenham um papel crucial nesse processo, conforme previsto no Plano Nacional de Energia e Clima 2030, redigido na Resolução da Assembleia da República, nº127/2025, (Diário da República, 2025).

Conclui-se que o hidrogénio possui um enorme potencial para contribuir, direta ou indiretamente, para a descarbonização da sociedade. A sua aplicação abrange o setor dos transportes, a produção de energia elétrica e os serviços, além do uso doméstico, onde poderá gradualmente substituir o gás natural e a eletricidade da rede de abastecimento, promovendo uma transição energética mais sustentável.

### **1.2.2. A história do hidrogénio em Portugal**

Em Portugal, o tema do hidrogénio verde tem sido de grande relevância e recorrentemente abordado nos últimos anos, conjuntamente com a estreita ligação com o tema das energias renováveis, com recurso à eletrólise da água.

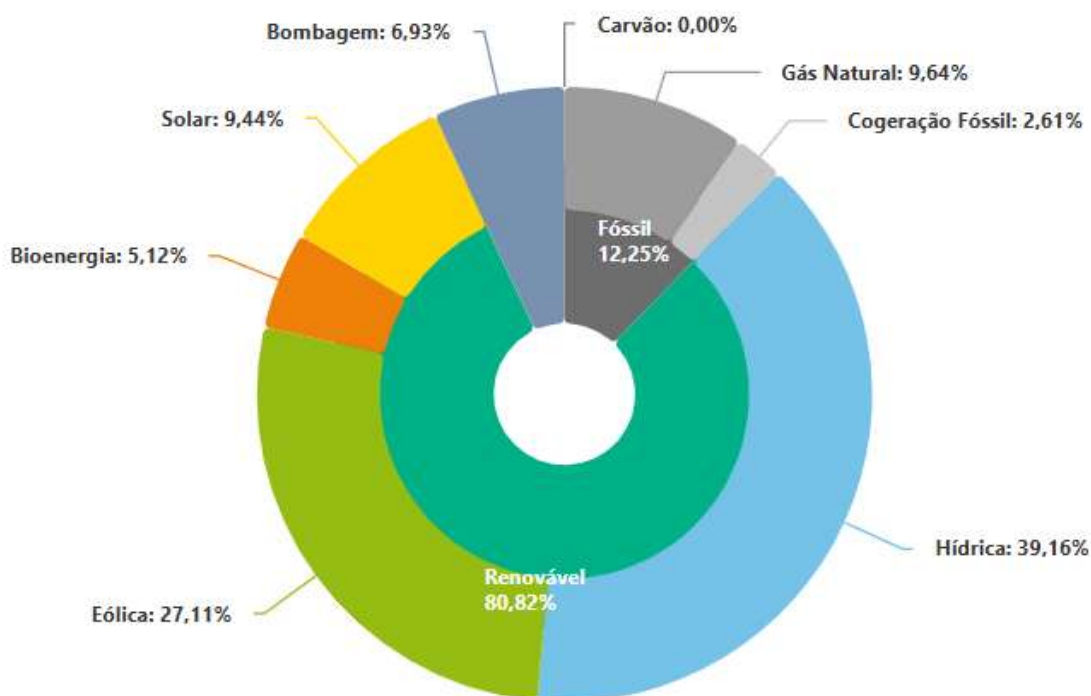
A perspetiva que a produção de hidrogénio verde possa vir a diminuir a dependência energética de Portugal face a países terceiros, reduzindo as importações e aumentando as exportações, é de extrema importância, não só em termos económicos e com vista a sermos virtualmente autossuficientes, mas também em termos ambientais, através dos claros benefícios que pode trazer ao país, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Embora a produção de hidrogénio verde ainda pertence a um mercado muito recente em Portugal, e por isso, ainda no seu estado inicial em termos de evolução desta tecnologia, existe um pequeno número de projetos já a decorrer, não existindo, por isso praticamente concorrência mútua, porque as necessidades superam muito significativamente a capacidade de produção.

De acordo com dados da APREN, (2025), entre 1 de janeiro e 31 de maio de 2025 foram gerados 22 666 GWh de eletricidade em Portugal Continental, dos quais 81,0% tiveram origem renovável, tendo diversas origens como se pode verificar no gráfico abaixo:

**Figura 6: Balanço da produção de eletricidade de Portugal Continental em 2025**

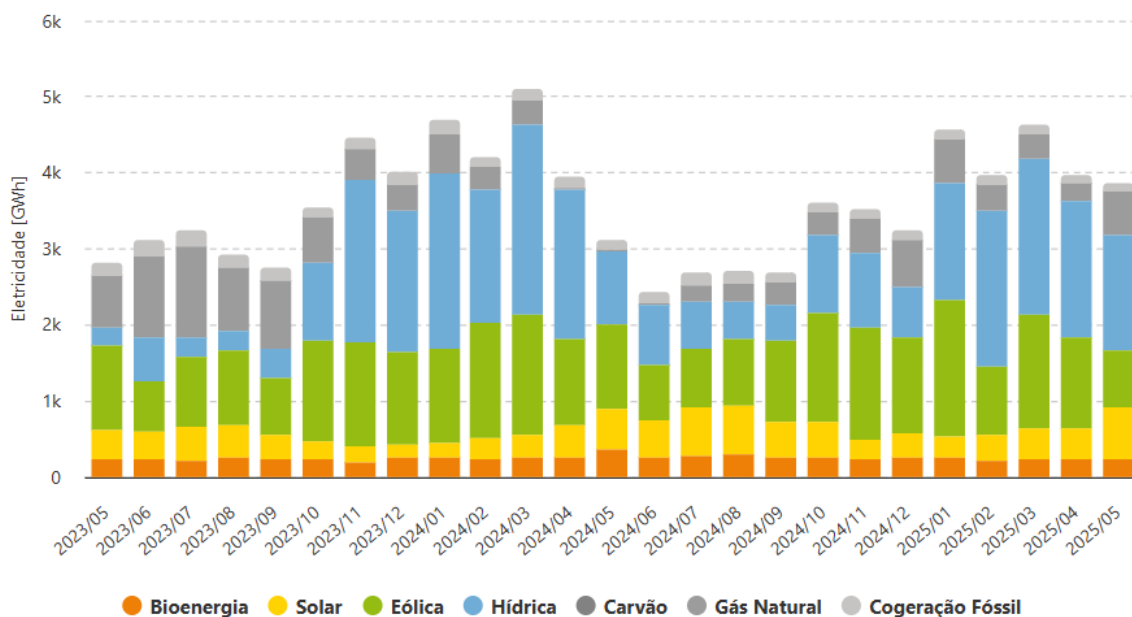


Fonte: APREN, 2025

De acordo com dados da REN, desde maio de 2025, a incorporação renovável na geração de eletricidade foi de 75,8%. Por sua vez, os centros electroprodutores térmicos fósseis representaram 16,4%.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

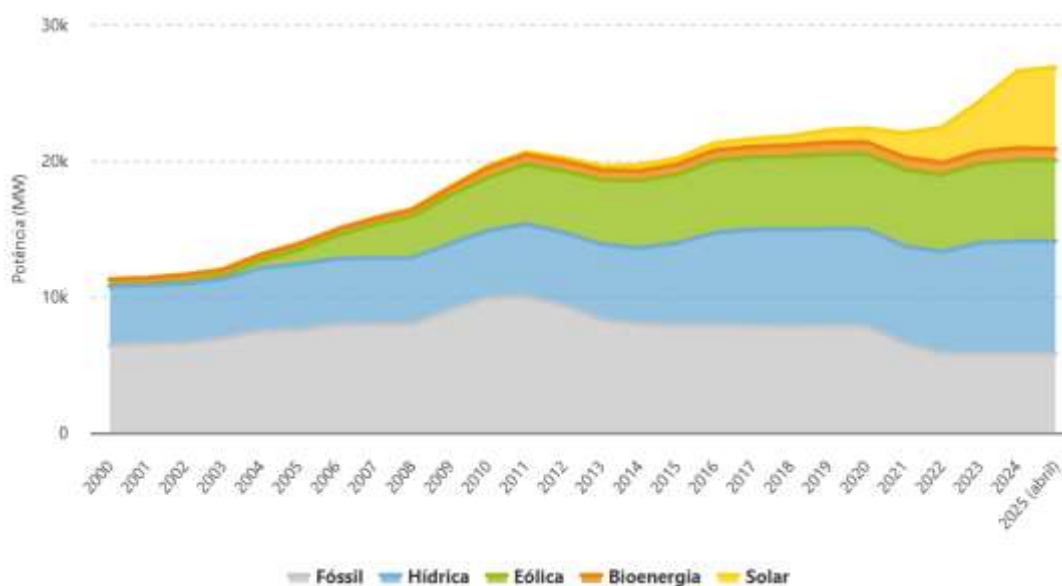
**Figura 7: Evolução da produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental (entre maio de 2023 a maio de 2025)**



Fonte: APREN, 2025

De acordo com os dados da DGEG, verifica-se que partir de 2005, a potência renovável instalada tem um aumento gradual, sendo que as centrais electroprodutoras representam hoje mais 52 % da potência instalada que a verificada nesse ano. Por outro lado, desde 2011 a potência fóssil instalada tem vindo a apresentar uma redução que foi acentuada em 2021 com a desativação das centrais a carvão de Sines e do Pego.

**Figura 8: Evolução da potência instalada em Portugal Continental desde o ano 2000**



Fonte: APREN, 2025

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Em termos históricos, o hidrogénio em Portugal teve uma importância relativamente limitada no que respeita a aplicações industriais, tendo sido utilizado sobretudo na indústria química e na refinação de petróleo, sem grande relevância no sistema energético, tendo-se mantido relativamente estagnado até ao início dos anos 2000.

Nos últimos anos, contudo, o país passou a dar prioridade às fontes de energia renováveis, fazendo um forte investimento na energia eólica e fotovoltaica e reforçando a necessidade de soluções que otimizem essa transição, assistindo-se a um interesse crescente desta tecnologia.

Em 2020, o governo português implementou a “Estratégia Nacional para o Hidrogénio”, delineando um plano para integrar essa fonte de energia na economia nacional, cujo objetivo principal é impulsionar a produção de hidrogénio verde, utilizando fontes renováveis, e ampliar a sua aplicação em setores estratégicos, como transportes e indústria, além de explorar oportunidades de exportação, (República Portuguesa, 2020)

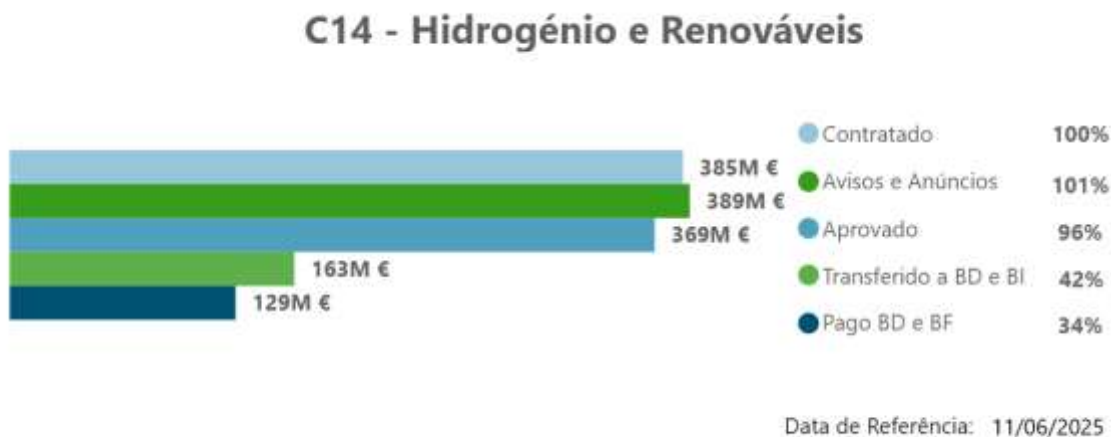
No âmbito desta estratégia, surgiram projetos piloto, entre os quais a criação de um cluster de hidrogénio em Sines, aproveitando a infraestrutura portuária e o potencial da região para a produção de energia renovável, consolidando Portugal como um referência na transição energética.

Entre 2021 e 2024, surgiram vários projetos inovadores, criados para impulsionar a produção de hidrogénio verde e sua integração na rede de gás natural, (APEG, 2025). Empresas como EDP, Galp e REN têm investido em tecnologias avançadas para otimizar a produção e transporte deste combustível sustentável.

Paralelamente, Portugal tem vindo a desenvolver planos estratégicos, visando a expansão das infraestruturas destinadas ao hidrogénio, incluindo a instalação de eletrolisadores e a criação de postos de abastecimento, participando ativamente em programas europeus para a criação de um corredor de hidrogénio, ligando a Península Ibérica ao norte da Europa, fortalecendo a transição energética na região, (PRR - República Portuguesa, 2025).

Num futuro próximo, e até 2030 e 2050, estima-se que Portugal se destaque como um dos principais exportadores de hidrogénio verde para a Europa, aproveitando o seu vasto potencial em energias renováveis, assumindo um papel fundamental no “*mix*” energético nacional, contribuindo para a neutralidade carbónica e reforçando a posição de Portugal na transição energética global, Plano Nacional de Energia e Clima 2030, redigido na Resolução da Assembleia da República, nº127/2025, (Diário da República, 2025) e (ISQ, 2024).

Figura 9: Distribuição dos fundos destinados ao setor de hidrogénio e energias renováveis no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), com valores expressos em milhões de euros (M€)



Fonte: PRR - República Portuguesa, 2025

### 1.2.3. Propriedades do hidrogénio verde

O hidrogénio é o primeiro elemento químico da tabela periódica e “(...) *o mais abundante no universo, embora raramente se encontra na sua forma livre (...)*”, (EDP, 2020). Está presente na molécula de água, (representada pelo símbolo químico “H<sub>2</sub>O”), que existe em grande quantidade no planeta, mas também noutros elementos, como por exemplo no gás natural, (Air Liquide, 2025).

O hidrogénio no seu estado natural, encontra-se no estado gasoso e está representado na tabela periódica pelo símbolo químico “H”, sendo formado por moléculas diatómicas, em que o seu átomo é constituído por um eletrão e um protão, resultando em que o seu número atómico é 1 e a sua massa atómica é 1,0079 g/mol.

É ainda caracterizado por ser inodoro, incolor e combustível, sendo cerca de 14,4 vezes menos pesado do que o ar, destacando-se pela sua elevada densidade energética por unidade de massa, acima de qualquer outro gás (Estevão, 2008), e (Hydrogen Tools, 2025).

A descoberta do hidrogénio é atribuída a Henry Cavendish, que o identificou como um elemento distinto em 1766. Mais tarde, em 1788 o químico francês Antoine Lavoisier, deu-lhe o nome de "hidrogénio", derivado do grego “*hydro*” (água) e “*genes*” (gerador), devido à sua capacidade de formar água quando reage com oxigénio, (National Library of Medicine 2025).

De acordo com o Guia de Produção de Hidrogénio Limpo, editado pelo Departamento de Energia dos EUA, a definição de hidrogénio limpo refere-se ao “(...) *hidrogénio produzido com uma intensidade de carbono igual ou inferior a 2 quilogramas de equivalente de dióxido*

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

de carbono produzido no local de produção por quilograma de hidrogénio (...)", (Clean Hydrogen Production Standard, 2023).

O principal risco está na combustão ou detonação, o que exige cuidados em locais ventilados e o uso de sensores, já que o gás é incolor, inodoro e indetetável pelos sentidos humanos.

A queima do hidrogénio produz também uma chama incolor, pelo que qualquer visibilidade que esta possa apresentar, é causada pela presença de impurezas no ar, e, por conseguinte, é necessário recorrer-se a detetores de chama de hidrogénio, para prevenir acidentes. No caso de se tratar de ambientes confinados, é obrigatório o uso de equipamentos de medição e deteção devidamente calibrados, (Columbia University, 2020)

**Tabela 2: Principais características do hidrogénio**

Propriedades do hidrogénio.	
Fórmula química	H <sub>2</sub>
Massa molecular	2,01594
Densidade de gás a 0 °C e 1 atm 0,08987 kg/m <sup>3</sup>	0,08987 kg/m <sup>3</sup>
Densidade de sólido a -259 °C	858 kg/m <sup>3</sup>
Densidade do líquido a -253 °C	708 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	-259 °C
Temperatura de ebulição a 1 atm -253 °C	-253 °C
Temperatura crítica -240 °C	-240 °C
Pressão crítica 12,8 atm	12,8 atm
Densidade crítica 31,2 kg/m <sup>3</sup>	31,2 kg/m <sup>3</sup>
Calor de fusão a -259 °C 58 kJ/kg	58 kJ/kg
Calor de vaporização a -253 °C	447 kJ/kg
Temperatura de auto ignição	585 °C
Condutividade térmica a 25 °C 0,019 kJ/kg	0,019 kJ/kg
Viscosidade a 25 °C 0,000892 cP	0,000892 cP
Calor específico (Cp) de gás a 25 °C	14,3 kJ / (kg °C)
Calor específico (Cp) de líquido a -256 °C	8,1 kJ / (kg °C)
Calor específico (Cp) do sólido a -259,8 °C	2,63 kJ / (kg °C)

Fonte: Hydrogen Tools, 2025

O hidrogénio é caracterizado por uma elevada densidade energética de cerca de 120 MJ/kg, (correspondendo a cerca de três vezes mais que a gasolina), cuja combustão liberta

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

apenas vapor de água ( $H_2O$ ), sem quaisquer emissões de  $CO_2$ , com uma elevada eficiência, com um rendimento superior aos combustíveis fósseis, (EDP, 2021a).

Pelo exposto, sendo o hidrogénio não tóxico e não poluente, pode-se considerar que em termos ambientais e de segurança, tem um vasto potencial de utilização.

Contudo, o seu alto risco de inflamabilidade, necessita de uma baixa energia de ignição, possuindo uma ampla faixa de inflamabilidade, tornando-o altamente reativo em ambientes ricos em oxigénio (4-94% em volume no ar), permitindo que a combustão ocorra dentro desses limites.

A faixa de detonação pode atingir até 90%, resultando num dos gases mais explosivos, quando misturado com oxigénio em determinadas concentrações. Uma energia aplicada de apenas 0,02 mJ, será suficiente para iniciar uma combustão, sobretudo se a sua concentração for elevada, sendo fundamental operar fora dessas faixas críticas de concentração, para evitar potenciais situações de risco.

Por este motivo, o armazenamento e manuseio do hidrogénio devem estar sujeitos a protocolos muito rigorosos de segurança para evitar ignições acidentais. À temperatura normal, o hidrogénio é uma substância pouco reativa e a altas temperaturas, é altamente reativo, (Hydrogen Tools, 2025).

Tipicamente, com 1 kg de água consegue-se produzir 111g de hidrogénio, que por sua vez, através da sua combustão, liberta a mesma energia que 0,4 litros de gasolina, (IRENA, 2022). Comparativamente com esta última, o nível da energia que se pode extrair de 1 kg de hidrogénio, é equivalente a 2,48 kg de gasolina e a energia elétrica gerada é de 12 kWh, (IRENA, 2019), correspondendo assim a uma elevada densidade de energia por massa.

As suas propriedades evidenciam também que este gás não é corrosivo e não é tóxico, mas pode causar asfixia ao aumentar significativamente a sua concentração face ao oxigénio, embora isso seja improvável devido à sua alta difusividade e fluatibilidade, dispersando-se rapidamente quando libertado e por isso não representa por si só um risco para as pessoas.

Atendendo a que o hidrogénio é inodoro, não é imediatamente evidente a sua presença, caso haja uma concentração tóxica presente, e devido à sua baixa densidade, tendencialmente dissipa-se rapidamente na atmosfera, acumulando-se nos tetos ou coberturas, minimizando o risco de ignição ao nível do solo. No entanto, em espaços fechados pode acumular-se em concentrações perigosas.

Em comparação com a gasolina, o hidrogénio tem menor probabilidade de provocar incêndios, pois sobe rapidamente na atmosfera, enquanto a gasolina, mais densa que o ar, tende a espalhar-se pelo solo. Ainda assim, como qualquer substância inflamável, pode entrar em

combustão na presença de oxigénio e de uma fonte de ignição, sendo altamente reativo mesmo com pouca energia.

Relativamente à sua capacidade de armazenamento, que é uma das suas características de maior destaque, na medida em que através do hidrogénio, é possível armazenar energia por períodos mais longos do que as baterias, permitindo uma flexibilidade muito grande em termos de eficiência de gestão de energia elétrica, podendo rapidamente voltar a reconvertê-lo em energia elétrica, dispondo de imediato de uma grande quantidade de energia, (Neves et al., 2023).

### **As cores do hidrogénio**

Embora o hidrogénio seja um gás incolor, mesmo durante a fase da combustão, existem diferentes classificações de hidrogénio, dissociados por diferentes cores, consoante a sua proveniência ou processo de produção, (EDP, 2021b).

As cores mais vulgares são o azul, cinzento, branco, turquesa, castanho/preto, rosa/amarelo e verde, em que tipicamente as mais escuras são usadas para os processos que libertam mais emissões poluentes e as mais claras para os processos com menores emissões libertadas, onde o hidrogénio verde se destaca com zero emissões poluentes, (National Grid, 2023).

### **Hidrogénio cinzento**

O hidrogénio cinzento, é obtido a partir de combustíveis fósseis, como o gás natural ou metano, ou gaseificação do carvão, surgindo através de um processo conhecido como "reforma a vapor". Durante este processo, os hidrocarbonetos são separados em moléculas de hidrogénio e carbono.

Contudo, esta abordagem liberta quantidades significativas de dióxido de carbono na atmosfera, tornando-se uma alternativa nociva para o ambiente.

Apesar de ser visto como bastante poluente, o hidrogénio cinzento lidera a produção global de hidrogénio, correspondendo a aproximadamente 95% da produção global, e implica a emissão de aproximadamente sete toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de hidrogénio produzido.

Devido ao seu uso intensivo no setor industrial, ele contribui de forma decisiva para as emissões de gases do efeito estufa.

### **Hidrogénio azul**

O hidrogénio azul é produzido principalmente a partir do gás natural pela reforma a gás a vapor, combinada com a captura e armazenamento de carbono. Embora partilhe o mesmo processo de produção que o hidrogénio cinzento, captura e armazena o CO<sub>2</sub> produzido durante o processo, sendo por isso considerado menos poluente que o hidrogénio cinzento, no entanto, devido às emissões de CO<sub>2</sub> resultantes, não é considerado ambientalmente eficiente.

### **Hidrogénio branco**

O hidrogénio branco, também conhecido como hidrogénio natural, ocorre naturalmente na crosta terrestre, através de interações entre moléculas de água e minerais ricos em ferro a altas temperaturas e pressões, não necessitando de processos industriais para sua produção. Encontra-se no estado gasoso em depósitos subterrâneos, representando uma potencial fonte de energia limpa e renovável, embora seja muito difícil a sua extração, sendo que atualmente, não existem estratégias para explorar este hidrogénio.

### **Hidrogénio turquesa**

É produzido através da pirólise do gás natural, que se traduz por um processo que dissocia o metano em hidrogénio gasoso e carbono sólido, sem emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) diretamente para a atmosfera. Esta dissociação permite reaproveitar o carbono sólido para utilização em outras indústrias, como por exemplo na indústria da borracha. Atualmente, o hidrogénio turquesa ainda se encontra numa fase inicial de desenvolvimento.

### **Hidrogénio castanho/preto**

O hidrogénio preto ou castanho refere-se ao hidrogénio produzido pela gaseificação do carvão ou do gás natural. É resultante de um processo de produção altamente poluente, libertando grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. As cores preta e castanha indicam por vezes o tipo de carvão: betuminoso (preto) e lignite (castanho).

### **Hidrogénio rosa**

O seu processo de produção envolve a eletrólise da água recorrendo a energia nuclear como fonte de eletricidade para os eletrolisadores, não resultando em quaisquer emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, e por isso, um baixo impacto ambiental.

Têm também uma outra vantagem que está relacionada com a estabilidade em termos de capacidade de fornecimento de energia que as centrais nucleares conferem, não estando

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

dependente de fatores climáticos que criem instabilidade na sua produção. Em contrapartida, depende de energia nuclear, que é cara e acarreta outro tipo de riscos não só de segurança, mas também ambientais.

### **Hidrogénio amarelo**

O hidrogénio amarelo refere-se ao hidrogénio verde produzido a partir da energia solar, não gerando emissões de CO<sub>2</sub>. As estimativas sugerem que o hidrogénio amarelo pode tornar-se a forma mais barata de hidrogénio renovável a médio prazo.

### **Hidrogénio verde**

O hidrogénio verde é produzido a partir de fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, através do processo da eletrólise da água, em que um eletrolisador divide as moléculas de água em oxigénio e hidrogénio. Não existem emissões poluentes durante o processo de produção, sendo considerado uma opção promissora para a descarbonização da economia, sobretudo em setores industriais, caracterizados por um consumo elevado de energia.

Atualmente, os custos do hidrogénio verde são significativamente mais elevados do que os do hidrogénio cinzento, representa apenas cerca de 0,1% da produção mundial de hidrogénio.

### **Hidrogénio roxo**

O hidrogénio roxo é produzido pela eletrólise da água, utilizando energia nuclear e calor.

### **Hidrogénio vermelho**

O hidrogénio vermelho é produzido pela separação catalítica da água a alta temperatura, utilizando o calor e o vapor gerados pelas centrais nucleares. Este processo requer muito menos eletricidade do que a eletrólise tradicional.

### **Hidrogénio laranja**

O hidrogénio laranja refere-se a processos emergentes que produzem hidrogénio, utilizando resíduos plásticos como matéria-prima. Pode oferecer uma solução tanto para o problema da energia limpa, como para as questões relacionadas com a eliminação de resíduos plásticos.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O hidrogénio laranja mantém-se numa fase inicial de desenvolvimento, estando em avaliação diversas tecnologias e processos de produção, incluindo a pirólise e a catálise por micro-ondas, (National Grid, 2023) e (De Blasio, 2024).

### 1.2.4.A cadeia de valor do hidrogénio verde

A cadeia de valor do hidrogénio verde compreende todas as etapas intermédias desde a produção do hidrogénio verde até ao seu consumo final, passando pelo armazenamento, transporte e distribuição, (APEG, 2025).

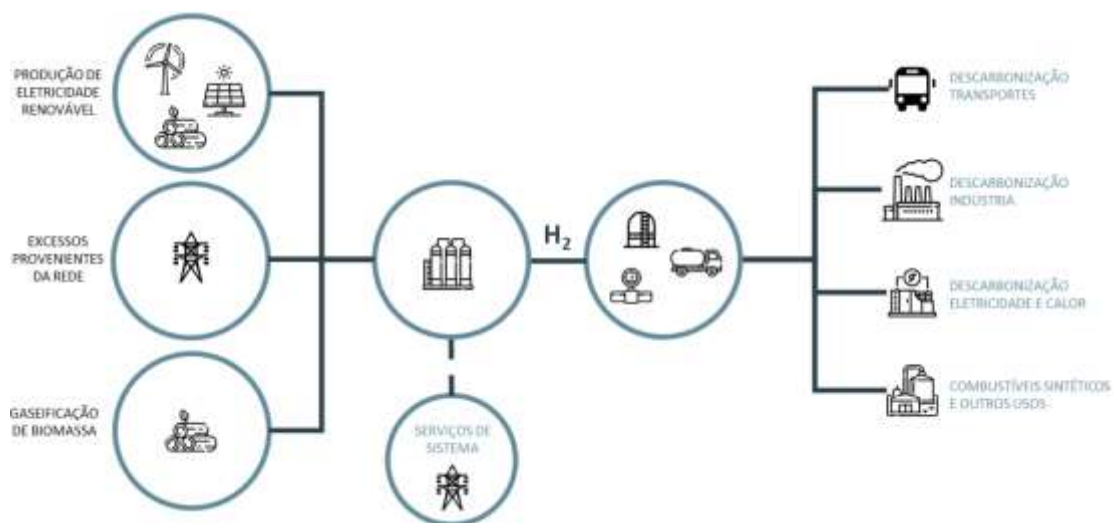
De uma forma sucinta, a cadeia de valor do hidrogénio verde é composta por 3 fases, que são referidas na EN-H2, designadamente, a produção, (através da eletrólise da água com recurso a eletricidade proveniente de fontes de energia renovável), o armazenamento, a distribuição, realizada através de transportes rodoviários ou marítimos, sob a forma líquida ou gasosa, ou através da construção de gasodutos de abastecimento dedicados, (República Portuguesa, 2020).

No que se refere à forma de armazenamento, isso pode ser feito comprimindo o hidrogénio a elevadas pressões, mantendo-se no estado gasoso ou arrefecendo-o a temperaturas muito baixas, permitindo que seja armazenado no estado líquido, (EDP, 2021a).

A última fase envolve a sua utilização propriamente dita, seja consumindo o hidrogénio verde nas fábricas ou nas casas, misturado com outros gases, seja através da introdução na infraestrutura de gás natural já existente, (DGEG, 2019).

A eficácia em cada uma dessas fases e a transição de uma para outra, é essencial para que o hidrogénio verde se estabeleça como uma fonte de energia renovável e duradoura na nossa economia, conforme referido no “Plano Nacional de Energia e Clima 2030”, redigido na Resolução da Assembleia da República, nº127/2025, (Diário da República, 2025).

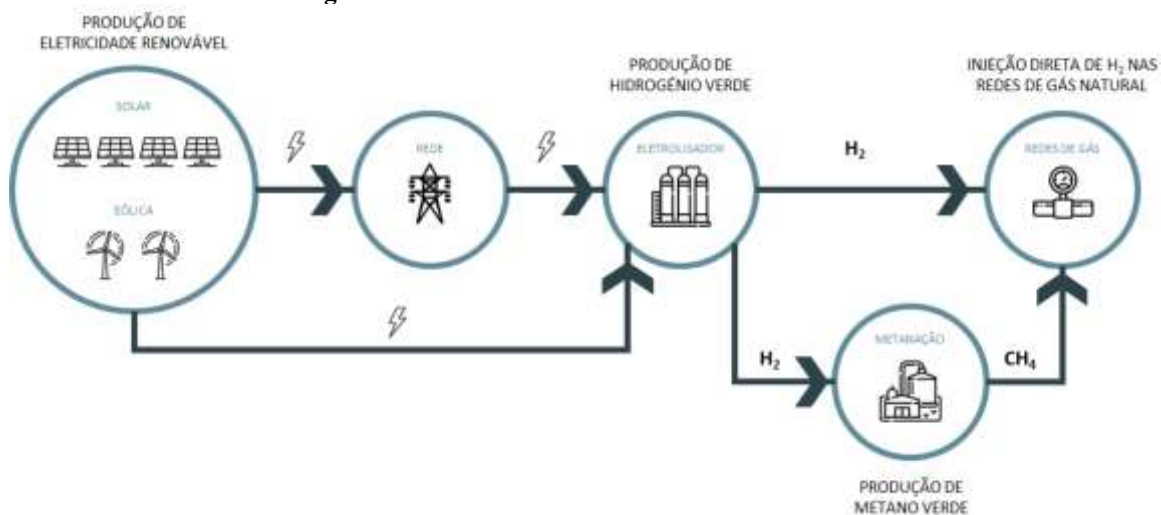
Figura 10: Cadeia de valor global do hidrogénio verde conforme a EN-H2



Fonte: República Portuguesa, 2020

Como fase final da sua cadeia de valor, salienta-se a utilização final do hidrogénio verde como um possível substituto do gás natural, podendo ser injetado diretamente na sua rede de distribuição existente, através de uma mistura de uma percentagem de hidrogénio verde devidamente definida e controlada, com o gás natural (processo vulgarmente denominado por “*blending*”. alimentando diretamente as indústrias e os consumidores domésticos, (Diário da República, 2025).

Figura 11: Cadeia de valor P2G conforme a EN-H2



Fonte: República Portuguesa, 2020

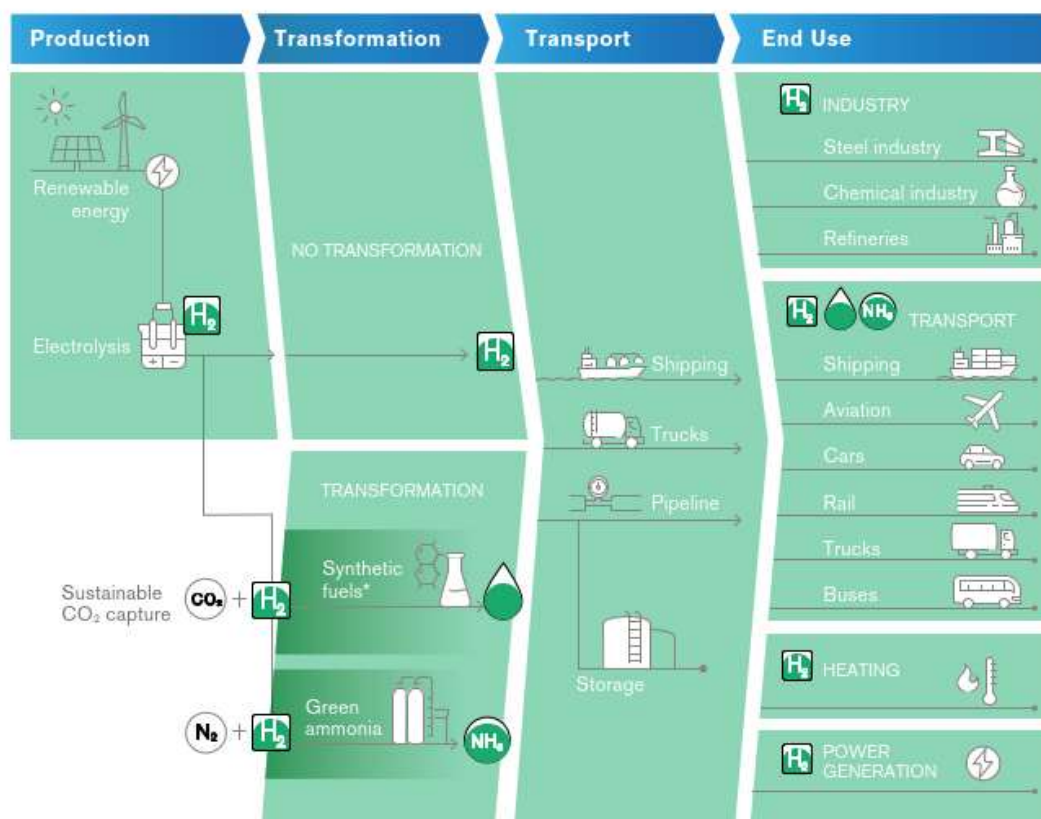
O hidrogénio é um elemento combustível (não é uma fonte de energia) que pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas e pode ser utilizado em praticamente qualquer aplicação.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A figura abaixo representada demonstra que através da combinação de eletricidade renovável com água purificada, é possível produzir hidrogénio verde através da eletrólise.

Conforme representado, as utilizações finais podem ser diversas, desde a indústria, em transportes, no aquecimento e fornecimento de energia à rede, conferindo-lhe flexibilidade, complementando alternativas como as baterias, de modo a maximizar a eficiência e gestão das redes elétricas, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024).

**Figura 12: Cadeia de valor do hidrogénio verde desde a sua produção até ao uso final**



Fonte: IEA - International Renewable Energy Agency, 2023

### 1.2.5. Aplicações do hidrogénio verde

O hidrogénio verde terá seguramente um papel fundamental na procura de um futuro com ausência de carbono. O recurso a este vetor energético, irá permitir a descarbonização de processos industriais de utilização intensiva de energia, cujas emissões são difíceis de reduzir através de simples eletrificação, (De Blasio et al., 2023).

As suas possíveis aplicações são várias. Desde a mobilidade, abrangendo diversos meios de transporte, até à indústria, através da produção de combustíveis sintéticos e diversos

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

químicos, e até como ferramenta para armazenamento de energia, ou até mesmo para consumo residencial, (DGEG, 2019).

Na área industrial, o hidrogénio verde pode ter diversas aplicações, nomeadamente na refrigeração, geração de energia, produção de fertilizantes, semicondutores e processos de soldagem, e muito particularmente na indústria do vidro, onde é combinado com azoto para criar atmosferas antioxidantes, minimizando falhas no produto, (Maka et al., 2024).

Uma das aplicações mais discutidas para a utilização de hidrogénio verde em Portugal, é a reconversão da infraestrutura de gás natural existente, para utilização conjunta com hidrogénio verde, através da sua introdução numa pequena percentagem no gás natural já utilizado, (APEG, 2025).

O hidrogénio verde, neste caso, poderá substituir gradualmente o gás natural como fonte de calor e energia na indústria, especialmente em setores de altas temperaturas como aço e cimento e na produção de amónia e refinação de petróleo, num “*mix*” de outros gases já existentes, (União Europeia, 2023).

A transição para hidrogénio verde, implica também substituir o hidrogénio proveniente de energias não renováveis e o gás natural, como fontes de energia e calor na indústria.

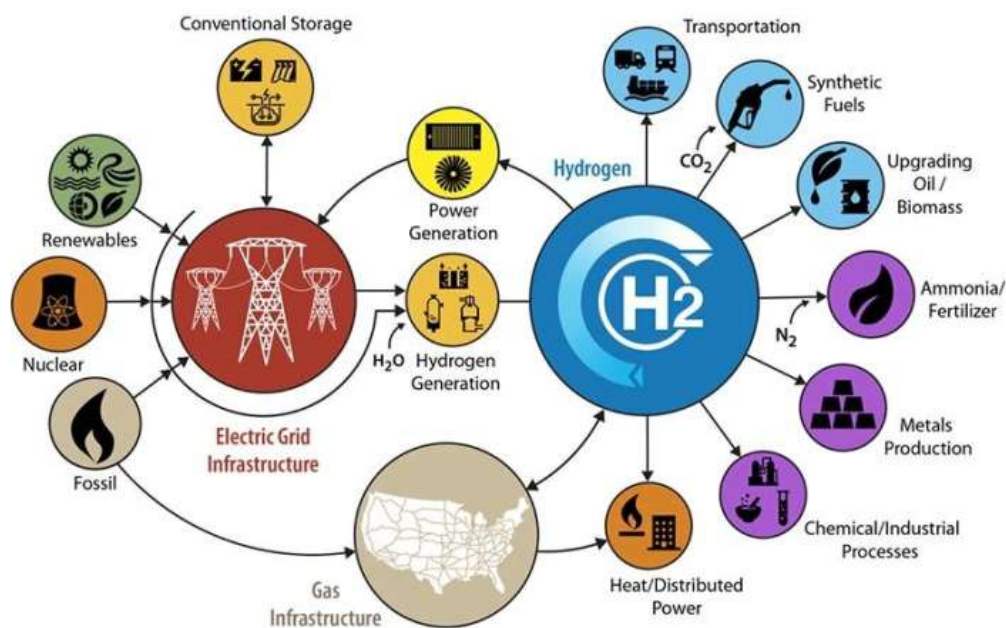
A produção de amónia será também uma das mais importantes aplicações do hidrogénio verde, utilizada em grandes quantidades na refinação de combustíveis, nomeadamente o petróleo, e no fabrico de combustíveis sintéticos para motores de combustão interna, que poderá contribuir para a descarbonização do setor dos transportes, que representa um dos maiores desafios no domínio da transição energética.

A capacidade de o hidrogénio poder ser armazenado por períodos relativamente longos, (DGEG, 2018), pode representar uma solução importante no contexto da eficiência energética. Efetivamente, a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, enfrentam o desafio inevitável da intermitência, produzindo eletricidade apenas com irradiação solar disponível no primeiro caso, e existência de vento, no segundo.

Para atenuar este efeito e maximizar a eficiência, nos períodos em que as fontes de energia renováveis têm produção excedentária, deve ser produzido hidrogénio verde, para o armazenar, aproveitando essa energia, que de outra forma seria desaproveitada.

O hidrogénio armazenado pode ser então reconvertido em energia elétrica em períodos de escassez, ou em períodos de maior rentabilidade económica, complementando baterias e sistemas de bombagem, evidenciando a sua capacidade e flexibilidade para contribuir para uma gestão energética mais eficiente, (Diário da República, 2025).

Figura 13: Sistemas industriais de hidrogénio – Aplicações



Fonte: U.S. Energy Information Administration, 2020

### 1.2.6. O processo de produção do hidrogénio verde – A eletrólise

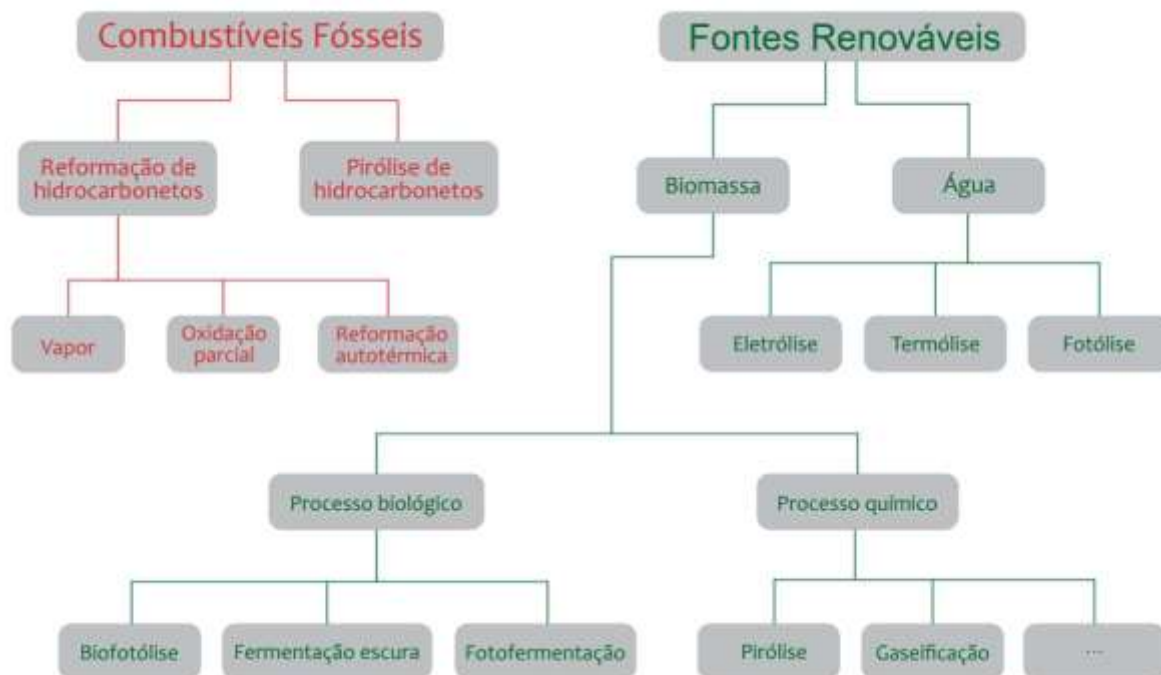
O hidrogénio praticamente não existe naturalmente em estado livre, sendo por isso necessário produzi-lo de forma artificial a partir de outros compostos, tais como o gás natural, metano ou água. As matérias-primas utilizadas, dividem-se entre combustíveis fósseis e fontes renováveis, e os métodos de produção requerem uma fonte de energia, que pode ser renovável ou não.

A seleção do processo e matérias-primas para a sua obtenção deve considerar um conjunto de fatores, nomeadamente os impactos ambientais resultantes, a eficiência do processo, os respetivos custos e a disponibilidade de recursos e tecnologias, (Pepe et al., 2023).

Atualmente, os métodos mais comuns para a produção em larga escala de hidrogénio, incluem a reforma de metano a vapor, ou “Steam Methane Reforming” (SMR), gaseificação de carvão e pirólise, enquanto em pequena escala, destacam-se a eletrólise e a reforma de gás natural ou etanol, (U.S. Energy Information Administration, 2020).

No âmbito deste trabalho, será destacado e analisado com maior detalhe o processo da eletrólise, no contexto de produção de hidrogénio verde, recorrendo a eletrolisadores que permitem a separação dos elementos constituintes da água (oxigénio e hidrogénio), através da aplicação de energia elétrica renovável.

Figura 14: Métodos de produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis e através de fontes renováveis



Fonte: DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, 2018

### Eletrólise da água

O processo da eletrólise da água para a produção de hidrogénio, é uma tecnologia caracterizada por uma elevada eficiência energética, responsável por 4% a 5% da produção global de hidrogénio, onde a eletricidade separa a água em hidrogénio e oxigénio.

O processo da eletrólise foi descoberto em 1800, em que ligaram os pólos positivo e negativo a um recipiente com água, tendo-se verificada uma separação de gases, com o hidrogénio a surgir num elétrodo e o oxigénio no outro, definido a eletrólise, como o processo de obtenção do hidrogénio, (APEG, 2025).

Os equipamentos que fazem a eletrólise são denominados por eletrolisadores, tratando-se de dispositivos que, por meio de corrente elétrica, separam as moléculas de água ( $H_2O$ ) em hidrogénio ( $H_2$ ) e oxigénio ( $O_2$ ), (IRENA, 2024).

Os eletrolisadores podem ser divididos em três tipos principais, onde se incluem os Alcalinos ou (AWE) “Alkaline Water Electrolysis”, os PEM “Proton Exchange Membrane” ou “Membrana de Troca de Protões”, que utilizam um eletrólito polimérico sólido, e os SOEC, “Solid Oxide Electrolysis Cell”, ou “Célula de Eletrólise de Óxido Sólido”, compostos por materiais cerâmicos.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Nestes últimos, o oxigénio atravessa a membrana para o ânodo, enquanto o hidrogénio permanece no lado oposto, ou seja, no cátodo, após a aplicação de uma corrente elétrica, (APEG, 2025).

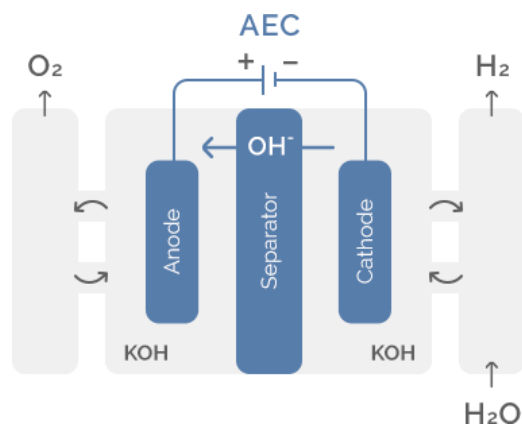
Comparativamente, um eletrolisador alcalino, utiliza uma solução alcalina, sendo uma tecnologia presente há mais de um século, comprovada e de baixo custo e com uma eficiência moderada na ordem dos 60 a 70%. Requer equipamentos volumosos, e resulta em hidrogénio de pureza moderada e baixa flexibilidade operacional.

**Figura 15: Vista exterior de um eletrolisador alcalino de hidrogénio verde da marca Stargate Hydrogen**



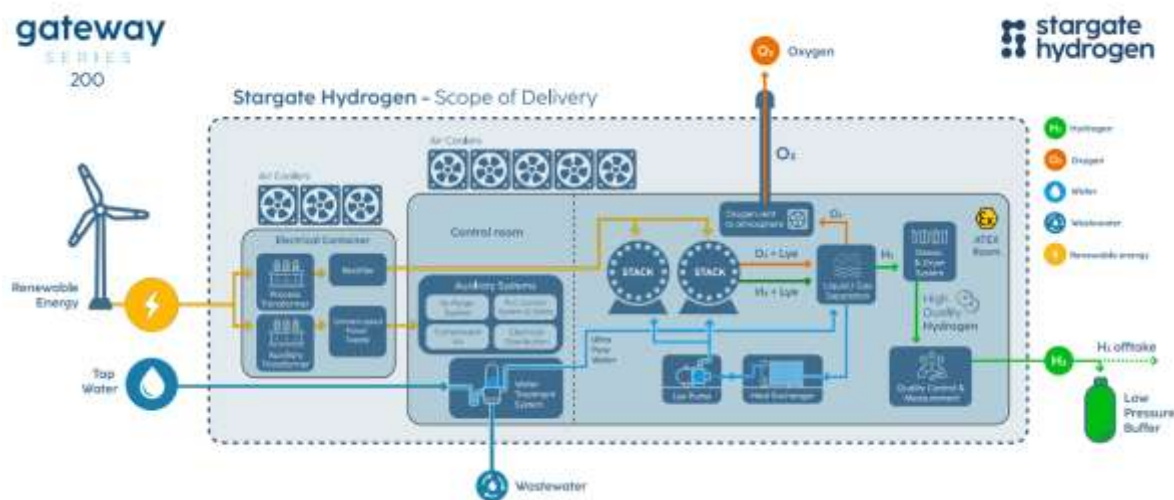
Fonte: Stargate hydrogen, 2024

**Figura 16: Diagrama de eletrolisador AWE**



Fonte: APEG, 2025

**Figura 17: Representação em diagrama de blocos de um eletrolisador alcalino industrial da marca Stargate Hydrogen**

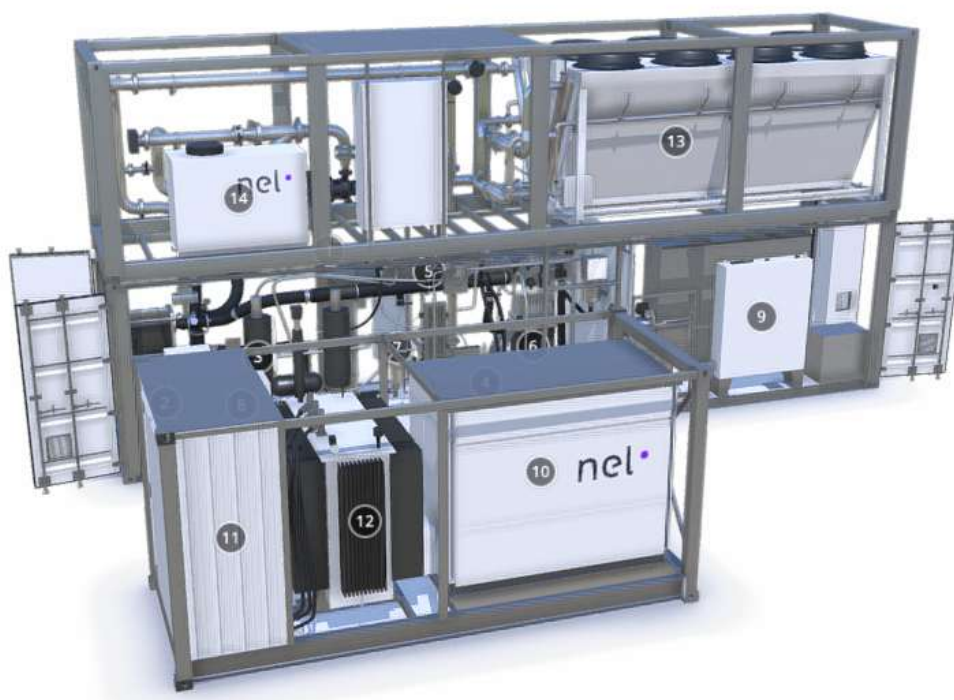


Fonte: Stargate hydrogen, 2024

No caso dos eletrolisadores de “Membrana de Troca de Protões”, ou “PEM”, utilizam uma membrana de polímero como eletrólito, para separar a água em hidrogénio e oxigénio, produzindo hidrogénio de elevada pureza no cátodo, operando a pressões elevadas, o que reduz os custos com compressão, atingindo eficiências mais elevadas, na ordem dos 70 a 80%.

Tem uma estrutura compacta, o que permite alguma flexibilidade quanto à sua instalação em determinadas aplicações, tendo como contrapartida um custo ainda elevado.

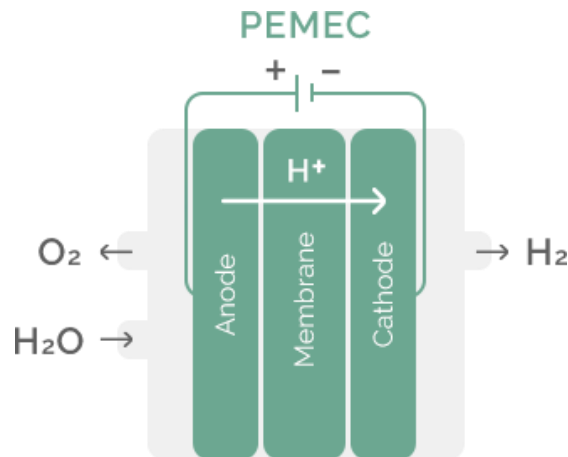
**Figura 18: Eletrolisador industrial do tipo “PEM” da marca “NEL” em solução contentorizada**



Fonte: Nelhydrogen, 2025

Os eletrolisadores de membrana operam de forma inversa às células de combustível, produzindo hidrogénio a partir da água em vez de consumi-lo. Nestes sistemas, a água é a matéria-prima, e a corrente elétrica separa os elementos, enviando-os para suas saídas correspondentes, garantindo um processo limpo e eficiente. Na figura seguinte está representado esquematicamente um eletrolisador do tipo “PEM”, (APEG, 2025).

Figura 19: Diagrama de eletrolisador PEM



Fonte: APEG, 2025

Por sua vez, os eletrolisadores de Óxidos Sólidos (SOEC), ainda em fase de desenvolvimento, operam a temperaturas elevadas (500–850°C), com um potencial de eficiência superior aos PEM e alcalinos.

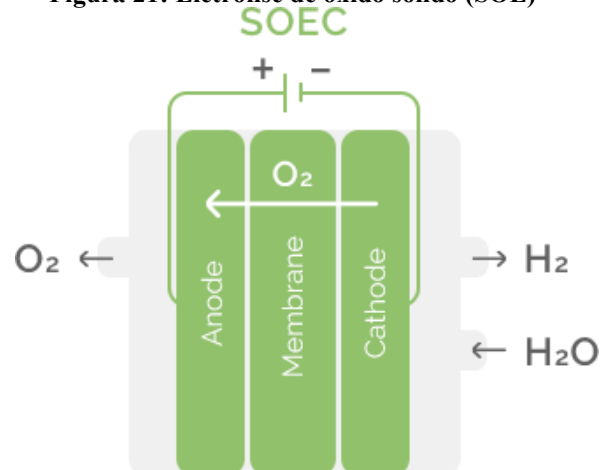
Têm a particularidade de aproveitar o calor gerado num ambiente industrial para diminuir o seu consumo elétrico. São caracterizados por um alto desempenho, mas ainda possuem baixa maturidade, carecendo de desenvolvimento, devido a uma limitada economia de escala.

Figura 20: Combinação de eletrolisadores de óxidos sólidos da marca Bloom Energy



Fonte: Bloomenergy, 2025

Figura 21: Eletrólise de óxido sólido (SOE)



Fonte: APEG, 2025

Com o crescente interesse do mercado internacional por esta tecnologia, a produção de eletrolisadores está a assistir a um rápido desenvolvimento, estimando-se que o volume atual de produção aumente mais de seis vezes entre 2022 e 2025.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

De uma produção anual de aproximadamente 7 GW em 2022, a expectativa é alcançar quase 47 GW até 2025, motivado por investimentos de capital e projetos anunciados por todo o Mundo. Essa evolução, demonstra o aumento da procura por hidrogénio verde e pelo desenvolvimento de técnicas eficazes para a sua produção, (Morganho, 2020).

### **Etapas da produção do hidrogénio verde**

O processo de produção do hidrogénio verde envolve várias etapas, essenciais para garantir a sua eficiência e sustentabilidade, desde o tratamento da matéria-prima até ao armazenamento e transporte, ou utilização final.

A primeira etapa deste processo refere-se à purificação da água, onde todas as impurezas e minerais são removidos, para evitar interferências no funcionamento dos eletrolisadores, e assim melhorando a sua eficiência e respetiva vida útil.

Na fase seguinte, é realizado o processo da eletrólise, recorrendo a energia renovável, assegurando que a produção do hidrogénio, seja limpa e livre de emissões de carbono.

Após a sua produção, dá-se a compressão do hidrogénio, fundamental para o armazenamento e transporte em grande escala, podendo ser injetado em gasodutos, armazenado ou transportado.

Nesta fase, salienta-se que existem diferentes métodos de acondicionamento, tais como tanques de alta pressão, nos quais o hidrogénio é mantido em estado gasoso comprimido, ou em alternativa, a liquefação criogénica, (atualmente, as formas gasosa e líquida são as únicas utilizadas em larga escala), onde o hidrogénio é arrefecido até temperaturas extremamente baixas, na ordem dos  $-253^{\circ}\text{C}$ , para armazenamento e transporte em estado líquido, (EDP, 2021a).

A liquefação do hidrogénio, embora melhore significativamente a sua densidade, tornando-o mais vantajoso, exige um elevado consumo adicional de energia para atingir seu ponto de ebulição extremamente baixo, e o seu armazenamento no estado liquefeito requer tanques criogénicos de estrutura complexa para reduzir a evaporação, (Barthelemy, 2017).

Existe ainda o armazenamento no estado sólido, recorrendo-se a hidretos metálicos, que absorvem e libertam hidrogénio de forma controlada, (EDP, 2021a).

Finalmente, a utilização final, seja para consumo direto como combustível, ou misturado na rede de distribuição de gás natural, constituída por redes de transporte de alta pressão, caracterizadas por tubagens de grande diâmetro e estações de compressão ao longo do trajeto, e redes de distribuição de baixa pressão, compostas por tubagens menores e estações de redução de pressão.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Em Portugal, a ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos), exige que o transporte de hidrogénio por gasodutos em conjunto com o gás natural, cumpra limites do Índice de Wobbe, o que implica uma introdução gradual do hidrogénio em pequenas percentagens, (Diário da República, 2020).

**Figura 22: Processo de produção de hidrogénio verde por eletrólise, armazenamento e reconversão em energia elétrica libertando água**



Fonte: APEG, 2025

Para obter maior eficiência neste processo e nos próprios eletrolisadores, e tornar esta tecnologia mais competitiva, é essencial promover um investimento sólido na investigação e desenvolvimento global das tecnologias de produção, armazenamento e transporte, com vista a extrair o maior rendimento possível do processo de produção, (Veiga, 2022).

A produção em grande escala de hidrogénio verde ainda não passa de um objetivo a ser alcançado, embora vários esforços estejam a ser desenvolvidos nesse sentido. De acordo com a Bloomberg New Energy Finance, espera-se que os custos associados a essa produção sejam reduzidos para menos de um terço dos níveis atuais até 2050, (IEA, 2024).

A Agência Internacional de Energia aponta que a procura global de energia pode crescer até 30% até 2040, o que, sem uma mudança significativa na matriz energética, pode representar um aumento nas emissões de gases de efeito estufa.

Até 2050, a expectativa é de uma expansão significativa do uso de energias renováveis, com o hidrogénio verde a assumir um papel de maior importância e economicamente viável, à medida que a produção renovável se torna mais acessível, (International Energy Agency, 2018), (República Portuguesa, 2020).

### Curva de aprendizagem

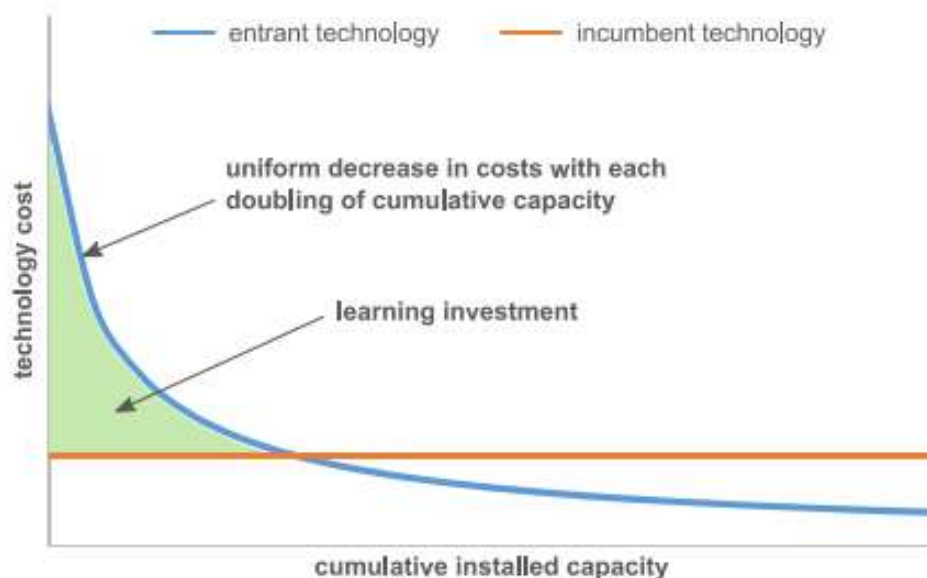
A curva de aprendizagem na produção do hidrogénio verde, reflete a significativa redução dos custos à medida que a experiência acumulada e a capacidade instalada aumentam. Em termos práticos, a duplicação da capacidade de produção, resulta numa diminuição percentual dos custos à medida que se aprofunda o conhecimento desta tecnologia.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A relação entre economia de escala e as inovações contínuas, pode originar reduções significativas no custo do hidrogénio verde. Este custo reflete não só os custos diretos, mas também uma melhoria no rendimento dos equipamentos e otimizações dos processos, custos da energia renovável, que combinados, influenciam no seu custo final.

A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2023), refere que a combinação do aumento da capacidade instalada e respetivos avanços tecnológicos podem levar a uma redução substancial dos custos de produção, tornando o hidrogénio verde uma solução cada vez mais competitiva e viável para a descarbonização do setor energético global, (Bohm, 2019).

Figura 23: Gráfico de tendência dos custos da tecnologia face à capacidade instalada



Fonte: IEA, 2024

### 1.2.7. O processo de armazenamento do hidrogénio verde

O crescimento da capacidade instalada de centrais de produção de energia renovável, contribui decisivamente para a descarbonização da economia, no entanto, a sua característica intermitente e até algo imprevisível no fornecimento de energia para as redes de distribuição, configura também um desafio.

Este desafio implica a procura de novas soluções para equilibrar a oferta e a procura de energia. Neste contexto, a capacidade do hidrogénio verde ser armazenado, permite uma flexibilidade muito grande na gestão de energia, contribuindo decisivamente para uma melhoria significativa na eficiência energética global.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

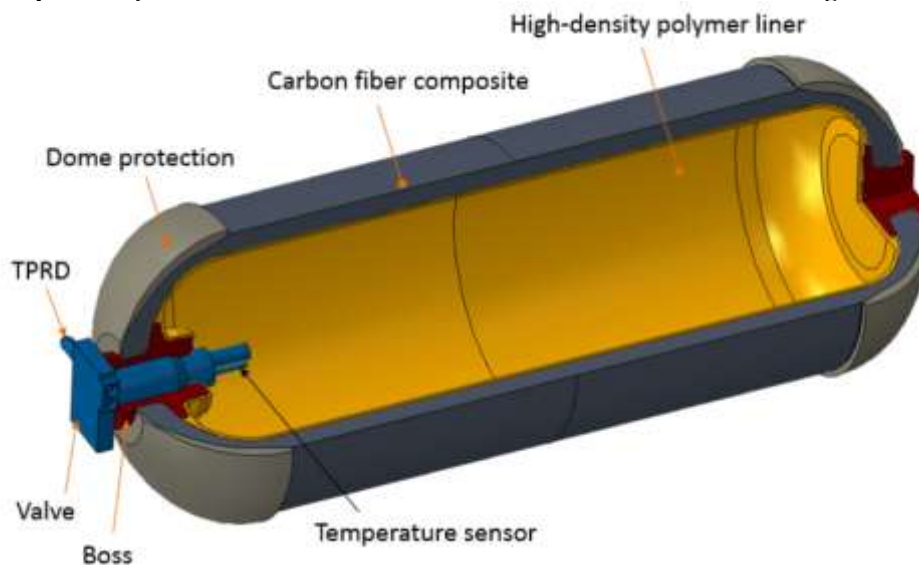
O dimensionamento de um reservatório implica uma análise a diversos fatores, nomeadamente quais serão as condições de utilização que os reservatórios estarão sujeitos, pressões interiores e exteriores previstas, os ciclos de pressão estimados durante a sua vida útil, o tempo de vida do reservatório, qual a tecnologia de fabrico e materiais a adotar, quais as temperaturas previstas de funcionamento, entre outros, (Atlas Copco, 2023) e (Andersson et al., 2022).

O hidrogénio verde pode ser armazenado durante grandes períodos, permitindo uma gestão de fluxos de energia muito mais robusta e flexível, incrementando a eficiência energética das redes elétricas, permitindo uma melhor gestão dos recursos energéticos existentes e facilitando a integração de fontes renováveis na rede elétrica, (Diário da República, 2025).

O hidrogénio pode ser armazenado de várias maneiras, de acordo com a aplicação prevista, ao espaço disponível e aos requisitos de segurança. Os principais métodos incluem o armazenamento em estado gasoso, que é o mais comum, utilizando cilindros de alta pressão, que mantêm o hidrogénio comprimido com uma pressão nominal a rondar entre os 350 e 700 bar, no interior de reservatórios reforçados em aço ou fibra de carbono, projetados para resistir a essas condições extremas.

Trata-se de uma tecnologia comprovada e amplamente utilizada pela indústria, de fácil manuseamento, transporte e abastecimento, no entanto, devido à necessidade de estar armazenado em reservatórios com elevadas pressões nominais, existe a necessidade da utilização de tanques resistentes e caros, combinados com compressores eficientes, estando sujeitos a potenciais fugas, (Barthelemy et al., 2017).

**Figura 24: Representação em corte de um reservatório de armazenamento de hidrogénio comprimido**



Fonte: U.S. Department of Energy, 2020

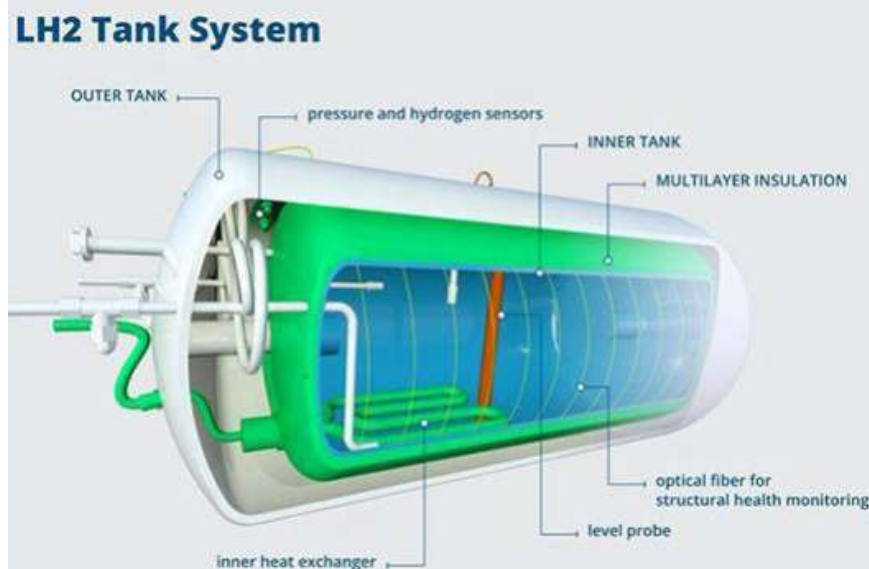
## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Este método apresenta como principais vantagens, a maturidade tecnológica existente em termos de equipamento utilizado e a simplicidade da operação, obrigando, a recorrer a materiais robustos e consequentemente dispendiosos, estando sujeitos a riscos de fugas, que potencialmente podem provocar acidentes, (Neves, 2023).

Ao contrário da compressão em estado gasoso, o processo da liquefação, confere ao hidrogénio uma maior densidade energética através do seu arrefecimento até temperaturas extremamente baixas, recorrendo a reservatórios criogénicos, mais complexos e isolados termicamente para minimizar perdas por evaporação, (APEG, 2025).

O armazenamento em estado líquido, embora tenha associado um elevado custo para liquefação e à constante perda de hidrogénio por evaporação, permite armazenar o hidrogénio numa condição de maior densidade energética do que no estado gasoso, permitindo o transporte de grandes quantidades, (Andersson et al., 2022).

**Figura 25: Representação em corte de um reservatório de armazenamento de hidrogénio liquefeito**



**Fonte: Aerospace Manufacturing and Design, 2021**

Existe outro método de armazenamento por adsorção, que se trata de utilizar materiais sólidos, compostos por hidretos metálicos, tais como o magnésio ou lantânio, nos quais o hidrogénio é absorvido e é armazenado de forma segura. Este método não carece de pressões nem temperaturas elevadas, o que permite uma operação segura com baixo risco de explosão, mas que é limitado na taxa de libertação do hidrogénio.

Por fim, refere-se ainda o armazenamento químico, cujo método consiste em juntar as moléculas de hidrogénio a outras moléculas químicas, conseguindo reter grandes quantidades

de hidrogénio, e libertá-lo novamente. Este método é caracterizado pela alta densidade energética e de tipicamente ser de fácil transporte e armazenamento. Por outro lado, pode consumir grandes quantidades de energia e ter emissões secundárias, (APEG, 2025).

Cada um dos métodos apresentados tem vantagens e inconvenientes, devendo ser selecionado o que para determinada aplicação, apresentar características mais favoráveis em termos de segurança, e na eficiência energética, (Diário da República, 2020).

Figura 26: Esquema simplificado das tecnologias de armazenamento de hidrogénio



Fonte: Andersson et al., 2022

### 1.2.8. Riscos associados ao hidrogénio verde

A segurança nas operações com o hidrogénio verde, envolve diversos fatores de risco ao longo de toda a cadeia, desde a produção até ao uso final. Estes riscos poderão dar origem a acidentes, com consequências muito graves, é necessário efetuar uma análise de risco aos mesmos e identificar muito claramente quais são os riscos envolvidos em toda a operação, (OECD, 2023).

A segurança não pode ser vista como um complemento opcional, mas sim como um pré-requisito fundamental para a viabilidade e aceitação pública de qualquer projeto de hidrogénio.

É fundamental compreender as características físico-químicas das misturas gasosas contendo hidrogénio, os riscos de fugas na infraestrutura que envolve as condutas de hidrogénio, e os sensores necessários para detetar gases perigosos.

Igualmente devem ser avaliados os efeitos fisiológicos do contato com o hidrogénio gasoso e líquido, bem como as medidas de proteção ambiental, (Columbia University, 2020).

Os riscos relacionados com a operação com o hidrogénio verde devem, portanto, ser bem identificados e controlados, aplicando medidas preventivas e adotando conceitos básicos

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

de segurança, que podem contribuir decisivamente para a mitigação dos mesmos. Todos os gases em geral, dependendo da sua concentração, podem causar asfixia.

A asfixia resulta da diluição do ar atmosférico por outro gás, tornando este insuficiente para manter o ar ainda respirável. No caso do hidrogénio, sendo inodoro e incolor, dificulta a perceptibilidade das pessoas expostas à sua presença, sendo que quando se manifestam os primeiros sintomas, poderá ser numa fase irreversível.

Os gases em geral podem ser classificados em três categorias distintas:

- Não inflamáveis e não tóxicos, que em baixas concentrações não representam risco particular para as vidas humanas;
- Gases tóxicos, em que o contacto com humanos pode causar intoxicação ou envenenamento que podem inclusivamente levar à morte;
- Inflamáveis, que potencialmente podem formar misturas inflamáveis com o ar e com fontes de ignição, formando atmosferas explosivas, onde se enquadra o hidrogénio verde, (Neves et al., 2023).

Relativamente à possibilidade de ocorrência de um incêndio ou explosão, é fundamental considerar os níveis de concentração do hidrogénio, que podem reagir com o ar e as respetivas medidas para evitar atmosferas explosivas, tanto em ambientes abertos quanto fechados, incluindo a análise da compatibilidade do hidrogénio com diferentes materiais e a identificação de potenciais fontes de ignição.

Por conseguinte, este tipo de análise, deverá ser focada na identificação de riscos do processo como um todo, com vista à prevenção de acidentes, destacando que, apesar das indústrias já contarem com estratégias e mecanismos que visam mitigar estas ocorrências, cada realidade industrial e respetiva aplicação podem ser distintas, implicando as devidas adaptações e ajustes nas medidas preventivas adotadas.

Pelo exposto, e de uma forma sintética, a identificação de perigos e a prevenção de acidentes são fundamentais na operação com o hidrogénio, sendo imperativo analisar os riscos para a saúde humana, focando a sua característica inflamável, os seus processos de combustão e detonação e as particularidades do hidrogénio, que possam de alguma forma representar um risco acrescido.

Desenvolvido pelo “Pacific Northwest National Laboratory” e mantido pelo Departamento de Energia dos EUA, o site “Hydrogen Tools”, reúne uma base de dados muito completa acerca de incidentes com hidrogénio, disponibilizando diversa informação,

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

nomeadamente, relatórios, vídeos e informações acerca de procedimentos e boas práticas da indústria, permitindo filtrar e selecionar as categorias dos incidentes, as suas origens e causas.

O seu objetivo é a partilha de conhecimento e a prevenção e segurança do uso do hidrogénio.

Quanto às principais causas de ocorrências de acidentes no contexto industrial, no caso da operação com hidrogénio, maioritariamente resultam de fatores que estão relacionados com erros humanos, falhas de dispositivos, falhas de controlo na operação ou falta de formação.

Por este motivo, todos estes fatores deverão ser sempre monitorizados em permanência, minimizando a probabilidade da sua ocorrência, (Neves et al., 2023).

Relativamente ao armazenamento de hidrogénio verde no seu estado líquido, existem desafios evidentes quanto à segurança desta forma de armazenamento, em particular devido às condições muito rigorosas de armazenamento, havendo necessidade de ser mantido a temperaturas a rondar os  $-253^{\circ}\text{C}$ .

Tal facto implica condições de operações extremas para os materiais, resultando em desgaste acentuado dos mesmos, e também a presença de um risco de contacto com os operadores, podendo resultar em ferimentos graves, (Rivard et al., 2019).

Neste processo em particular deve-se ter em conta ainda o fenómeno de evaporação contínua, que é uma característica deste método, que permite fugas de hidrogénio que potencialmente se podem acumular em espaços fechados, aumentando desta forma o risco de explosão, no caso de não estar prevista ventilação adequada.

Portanto, medidas rigorosas de segurança são indispensáveis para minimizar esses perigos e garantir um armazenamento eficiente e seguro, (Diário da República, 2020).

Embora seja considerado um gás seguro, não só no seu processo de produção, mas também na sua utilização, o hidrogénio apresenta também alguns riscos inerentes às suas características próprias que devem ser acautelados, sendo necessária a implementação das devidas medidas preventivas para os mitigar.

Conforme já referido anteriormente, uma das características mais evidentes do hidrogénio é ser inodoro e incolor, que por si só representa um risco na sua utilização, devido à dificuldade na deteção de eventuais fugas ou deficiências na estanquidade dos equipamentos constituintes do sistema.

Ao contrário de outros gases, onde através da mistura de químicos adicionais se consegue introduzir cor ou odor, no caso do hidrogénio verde este processo não é viável, pois pode comprometer o funcionamento de equipamentos sensíveis, (Neves et al., 2023).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O perigo da ocorrência de fugas em sistemas de produção, transporte e armazenamento de hidrogénio é agravado devido a que este é representado pela menor massa molecular de qualquer gás existente, pelo que a sua capacidade de difusão através de microfissuras, ou materiais que possam ser permeáveis a este tipo de gás, é muito elevada, constituindo um risco sério, e que implica a adoção de materiais específicos e com custos superiores, (Cabrini et al., 2018).

Por estes motivos, é necessário utilizar materiais resistentes ao fogo (que suportam altas temperaturas por um determinado período, mantendo as suas propriedades) e ignífugos (que impedem a propagação do fogo retardando a combustão), recorrer a sensores de deteção específicos e de equipamentos complexos e avançados para monitorização de todo o sistema.

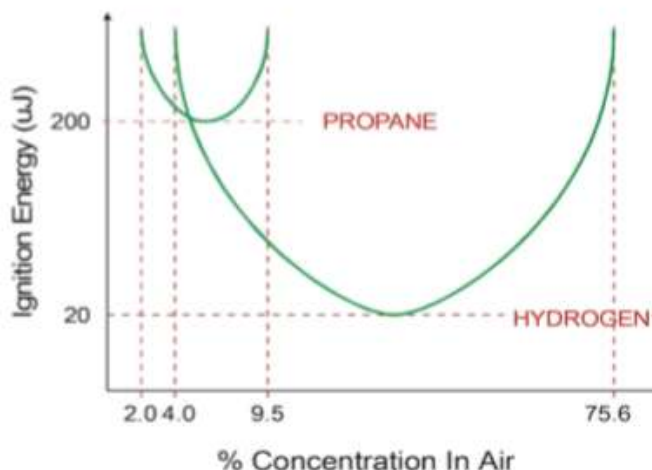
A utilização em conjunto destes materiais e equipamento permite identificar atempadamente quaisquer deficiências e poder prevenir e mitigar eventuais fugas e possíveis acidentes, nomeadamente explosões e incêndios originados por fugas indetetáveis, (Rivkin et al., 2015).

As características de inflamabilidade (facilidade com que inicia uma combustão) e explosividade (capacidade de reação de forma rápida e violenta libertando elevadas quantidades de energia, calor, gases e pressão) associadas ao hidrogénio verde, constituem os riscos mais evidentes e importantes na sua utilização.

Devido às suas propriedades já mencionadas, relativas ao amplo intervalo de inflamabilidade no ar, tipicamente desde os 4% aos 75% em volume, e à sua extremamente baixa energia mínima de ignição, resulta que o hidrogénio se torne altamente inflamável, mesmo com pequenas fugas.

No caso de ser misturado com oxigénio, a probabilidade de explosão ainda se torna mais evidente, formando uma atmosfera explosiva, e por isso, representando um elevado risco na sua operação, sem tomadas as devidas precauções, (Rivkin et al., 2015).

Figura 27: Variação da energia necessária para a ignição do hidrogénio em função da sua concentração no ar



Fonte: Neto, 2025

No que respeita a riscos ambientais, o hidrogénio verde por si só não representa nenhum risco em particular, pois em ambientes bem ventilados, ou expostos diretamente à atmosfera livre, dissipa-se muito rapidamente, o que diminui quaisquer riscos na envolvente do local da fuga, mas em quantidades consideráveis, pode contribuir para o aumento de radicais livres que impactam diretamente na camada de ozono.

Se uma determinada fuga ocorrer, na qual o hidrogénio está combinado com outros compostos químicos, podem suceder consequências ambientais secundárias, dependendo do composto em causa, (Tromp et al., 2003).

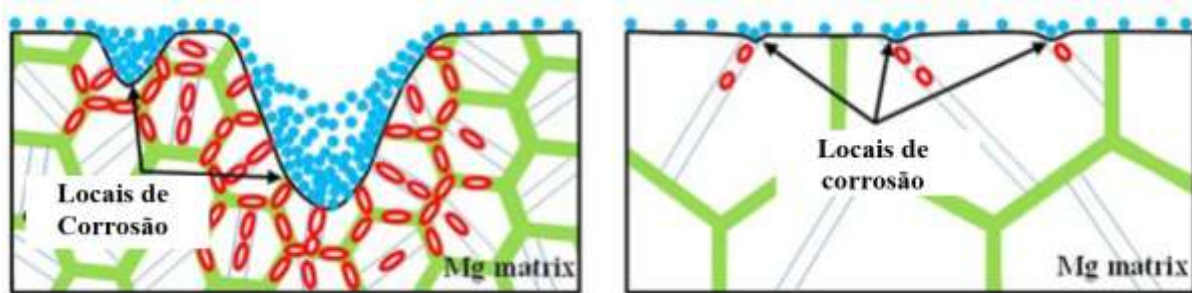
### Absorção e fragilização de materiais com o hidrogénio

O hidrogénio é absorvido por muitos tipos de metais, nomeadamente o aço. A sua capacidade de penetrar em metais e ligas, acumulando-se em áreas rugosas ou que apresentem oxidação, provoca fragilização e reduz a sua resistência mecânica ao longo do tempo. Este fenómeno, denominado por “*embrittlement*”, pode comprometer a integridade estrutural dos reservatórios de armazenamento, assim como canalizações, aumentando o risco de fugas, (OECD, 2023).

De forma a minimizar esses efeitos, é essencial utilizar materiais resistentes à fragilização por efeitos da presença do hidrogénio e adotar práticas rigorosas na sua manutenção e monitorização.

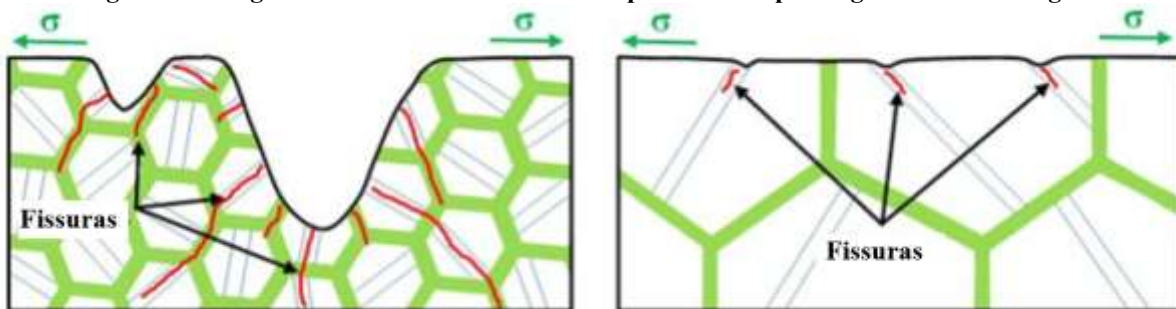
Esta característica pode resultar na alteração das propriedades físicas dos materiais e torná-los quebradiços, representando uma das principais causas de falhas e fugas nas instalações, (Gangloff et al., 2012).

Figura 28: Aglomeração das moléculas de hidrogénio em pontos de corrosão e de rugosidade



Fonte: Neto, 2025

Figura 29: Surgimento de fissuras no material após contacto prolongado com o hidrogénio



Fonte: Neto, 2025

A seleção dos materiais adequados deve seguir especificações comprovadas, garantindo controlo da granularidade e limpeza, evitando falhas estruturais. O controlo de soldaduras deve também seguir procedimentos estabelecidos e revistos, devendo ser realizadas por profissionais certificados, assegurando a sua qualidade e a resistência das ligações, após a soldadura, devendo serem efetuados testes em pressão, que comprovem a resistência e a integridade da instalação, (Zhang, 2019).

Sobre este tema em particular, existem projetos a decorrer, cujo objetivo é de estudar em mais detalhe os efeitos nocivos do hidrogénio em diversos tipos de materiais utilizados em sistemas de hidrogénio verde. Estes estudos tentam encontrar soluções para atenuar os efeitos de desgaste nos materiais induzidos pelo hidrogénio, analisando a interação entre o hidrogénio e os respetivos materiais colocados em teste. Os resultados obtidos, procuram desenvolver

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

estratégias e definir as composições internas dos metais, reforçando a sua resistência ao desgaste e consequente fragilização provocada pelo hidrogénio, (H2tools, 2025).

De acordo com o exposto, a compatibilidade dos materiais com o hidrogénio é um fator crucial que impacta diretamente com a segurança do sistema, e que garante a integridade estrutural dos gasodutos, especialmente nas soldaduras, que são mais sensíveis do que os metais de base. As fissuras resultantes do contacto com o hidrogénio, propagam-se de forma rápida e impercetível, devendo-se atuar preventivamente, (Züttel et al., 2008).

O ambiente e a pureza do gás também influenciam a resistência dos materiais à fragilização por hidrogénio. A presença de sulfureto pode aumentar a absorção de hidrogénio no aço, enquanto fatores como gás húmido, acumulação de depósitos dentro das condutas e hidrogénio seco sob alta pressão podem causar danos estruturais. Além disso, gasodutos offshore podem conter gás ácido, exigindo materiais resistentes à corrosão e protocolos rigorosos de segurança.

Os pontos mais críticos serão as soldaduras existentes ao longo de toda a infraestrutura de gasodutos, que representam pontos de vulnerabilidade. Para mitigar esses riscos, é essencial a utilização de materiais adequados, técnicas avançadas de soldadura e monitorização contínua do desempenho estrutural dos gasodutos.

Os danos provocados pelo hidrogénio podem surgir pouco tempo após a exposição, mas também podem manifestar-se espontaneamente após anos de operação, tornando a monitorização contínua e a inspeção preventiva essenciais para evitar falhas estruturais graves.

A utilização de materiais resistentes, tratamentos específicos e protocolos de segurança rigorosos são fundamentais para mitigar os riscos associados à fragilização por hidrogénio em infraestruturas de gasodutos.

A infraestrutura de gás desempenha um papel crucial como transportador de energia, e a compatibilidade dos materiais com o hidrogénio é um fator determinante para sua viabilidade.

Para que uma chama, combustão ou detonação aconteça, são essenciais três elementos, representados pelo triângulo do fogo: o combustível, o comburente e a fonte de ignição. No ar que respiramos, o oxigénio age como comburente, o hidrogénio é o combustível, enquanto o nitrogénio é um gás inerte, influenciando todas as combustões ao nosso redor.

Os arcos elétricos, a eletricidade estática, as fagulhas, o fogo direto, o calor excessivo e até impactos fortes, podem servir como ignição. Se a reação será uma combustão simples ou uma detonação explosiva depende de:

- Tipo de combustível e comburente presentes;

- Proporção de cada um dos elementos;
- Tipo de ambiente (espaço aberto ou fechado);
- Quantidade de energia liberada pela ignição.

Figura 30: “Triângulo do Fogo” representando os 3 elementos necessários para se dar uma combustão



Fonte: Proteção Civil Açores, 2016

Uma ignição espontânea apenas ocorre em situações em que a de combustível está na proporção certa para inflamar e está presente um comburente. Nestes casos, se for ultrapassada a temperatura limite de auto inflamação, pode resultar num incêndio ou explosão.

Como a energia mínima para inflamar o hidrogénio é muito baixa ( $\sim 0,017$  mJ), arcos elétricos residuais podem ser suficientes para gerar uma combustão. No que se refere a explosões, estas manifestam-se quando um gás sob forte pressão se iguala rapidamente à pressão do ambiente, criando uma onda de impacto, tendo origem em ruturas por pressão ou explosões químicas.

### 1.2.9. Causas e consequências de acidentes

Conforme referido anteriormente, é fundamental que todo o setor industrial adote e promova políticas e mentalidades de segurança assentes em atitudes preventivas, garantindo que toda a sua estrutura organizacional e todos os intervenientes no processo estejam devidamente alinhados com estas metodologias e totalmente cientes dos riscos e perigos a que estão sujeitos na respetiva atividade, e que com base nisso possam reagir adequadamente a qualquer acidente que possa ocorrer.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O envolvimento e o sentido de responsabilidade de cada interveniente, são imprescindíveis para que o sistema de prevenção de acidentes implementado funcione corretamente como um todo, conforme está previsto na norma ISO 45001: 2018, (ISO Standards, 2018).

Por norma, a maioria dos acidentes podem ser impedidos, uma vez que normalmente há indícios ou alertas prévios que indicam a probabilidade de tal vir a suceder. É, por isso, muito importante que todos os intervenientes, reajam de imediato, alertando e intervindo de acordo com os procedimentos de emergência implementados.

De uma forma simplificada, é possível classificar os acidentes por uma representação gráfica semelhante a uma pirâmide, vulgarmente conhecida por pirâmide de acidentes ou pirâmide de Heinrich, conforme representado na figura abaixo, variando a sua representação de acordo com o tipo de atividade, tipo de indústria, quantidade de trabalhadores, entre outros fatores, aumentando a gravidade à medida que se sobe a pirâmide.

Figura 31: Diagrama representativo dos tipos de acidentes e respetiva frequência de ocorrência



Fonte: Neves et al., 2023

Nela, poderemos constatar que a sua base representa os incidentes de maior frequência, mas de menor gravidade ou consequências, que na sua generalidade envolvem não conformidades detetadas, mas que não representam um perigo elevado, e sem risco para equipamento nem pessoas.

Como acidentes leves, considera-se que embora não haja consequências em termos humanos, ocorrem danos materiais, embora pouco significativos. Já os acidentes médios implicam vítimas não fatais e um prejuízo significativo. No topo da pirâmide, estão representados os acidentes graves, que embora sejam de menor frequência, implicam vítimas fatais e grande prejuízo, (Neves et al., 2023).

### Causas dos acidentes com o hidrogénio

Os acidentes com hidrogénio podem ocorrer devido a uma variedade de fatores relacionados com as suas propriedades, falhas nos equipamentos ou erros operacionais. Resumidamente, as causas mais frequentes que se destacam são:

- Fugas no sistema, devido a microfissuras ou devido à utilização de materiais que não sejam adequados para a utilização com hidrogénio e que sejam permeáveis à sua passagem. Estas fugas podem verificar-se nas condutas, dispositivos constituintes do sistema, juntas, vedantes e soldaduras, que possam não estar em perfeitas condições;
- Erros humanos de operação do sistema por parte de operadores com formação inadequada ou insuficiente;
- Não seguimento dos procedimentos corretos de operação em segurança;
- Medidas de segurança implementadas inadequadas ou insuficientes;
- Condições de armazenamento do hidrogénio não compatíveis com os valores limite de segurança;
- Ocorrência de defeitos ou mau funcionamento de válvulas de segurança ou controlo de pressão, tubagens ou reservatórios;
- Defeitos nos manómetros ou sensores de medição;
- Inoperacionalidade ou ineficiência dos sistemas de segurança;
- Tipos de vedantes ou juntas incompatíveis com a utilização de hidrogénio;
- Falta de manutenção da infraestrutura e equipamento;
- Fragilização dos materiais por contacto com o hidrogénio, nomeadamente nas condutas, vedantes e reservatórios, reduzindo sua resistência mecânica e resultando em fissuras que levam a fugas (Gangloff & Somerday, 2012);
- Utilização de materiais não compatíveis com o hidrogénio;
- Exposição prolongada do sistema ao hidrogénio em altas pressões;
- Falhas no controlo da temperatura do sistema, potencializando o surgimento de microfissuras devido à fragilização térmica dos materiais (Rivard et al., 2019);
- Isolamento térmico inadequado;
- Exposição a fontes de ignição externas;
- Utilização de equipamentos que não cumprem as normas ATEX;
- Ausência ou funcionamento deficiente de sistemas de monitorização e deteção de fugas;
- Pressão excessiva no sistema condutas e reservatórios de armazenamento;
- Manutenção inadequada ou falha na verificação de integridade dos tanques.

### Consequências dos acidentes com hidrogénio

Como principais consequências dos acidentes relacionados com o hidrogénio verde, e considerando os que têm maior impacto para pessoas e bens, salientam-se as explosões e incêndios, que sob determinadas condições e fatores, podem ser de maior ou menor intensidade, (Clean Hydrogen, 2022).

Através das explosões, são libertadas grandes quantidades de energia, podendo resultar em inúmeros ferimentos graves aos intervenientes e até a perda de vidas humanas, além de todo o tipo de danos mais ou menos significativos à infraestrutura existente.

Para além destas consequências, ainda devem ser considerados os danos ambientais resultantes de um acidente deste tipo, porque, embora o hidrogénio por si só não seja tóxico, a sua libertação em grandes quantidades e de uma forma descontrolada pode alterar a qualidade do ar, sobretudo em ambientes com ventilação inadequada.

Por outro lado, podem surgir também consequências para a fauna e flora, assim como contaminação de solos nas zonas mais próximas.

Como consequências operacionais, a ocorrência de acidentes neste tipo de infraestruturas, traduz-se em longos períodos de paragem e de não produção (interrompendo o fornecimento a eventuais clientes), e elevados custos de reparação ou substituição.

No caso de ocorrerem acidentes com reservatórios contendo hidrogénio líquido, qualquer fuga pode também resultar em queimaduras graves devido às temperaturas extremamente baixas no seu interior.

### Base de dados de incidentes e acidentes com hidrogénio

Foi criada uma base de dados denominada por “HIAD” ou “Hydrogen Incident and Accidents Database”, cujo objetivo é providenciar informações, suportadas por diversos dados estatísticos de acidentes ocorridos, relatórios de inspeções, criando um histórico, a partir do qual se podem retirar lições e identificar quais as causas e consequências destes incidentes, contribuindo para melhorar os aspetos de segurança no futuro.

Através desta base de dados é possível recolher algumas informações que podem servir de estatística para compreender de uma forma mais clara quais as causas predominantes dos acidentes reportados, o tipo de ocorrências mais frequentes, etc. Nos gráficos abaixo representa-se algumas das estatísticas mais relevantes para este estudo, (Comissão Europeia, 2023).

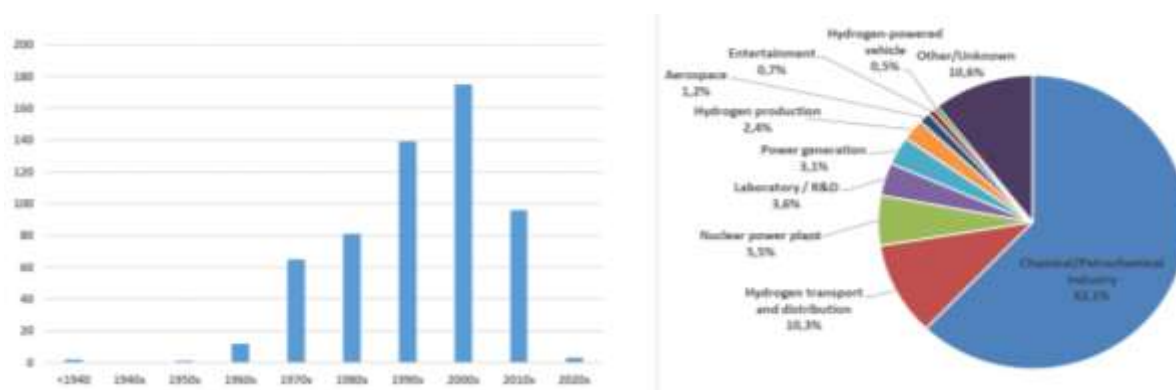
## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Estes representam uma amostra de um total de 706 incidentes reportados e que constam na base de dados até 2021. Destes incidentes, 576 destas ocorrências foram consideradas muito relevantes, servindo de base para análises estatísticas e usadas para retirar lições aprendidas e recomendações, (Clean Hydrogen, 2022).

De acordo com os dados estatísticos apresentados, verifica-se que desde 1940, a tendência do número de incidentes reportados anualmente foi crescente, tendo atingido um máximo na primeira década do ano 2000. Já na década seguinte, verifica-se um decréscimo acentuado no número de ocorrências reportado, sendo que na presente década, assiste-se a um valor residual deste valor.

No gráfico representado à direita, representa-se a percentagem de incidentes com hidrogénio, relacionado com a respetiva aplicação. Verifica-se que estatisticamente, a grande maioria dos incidentes reportados refere-se operações com a indústria química e petroquímica, sendo que o setor da produção apenas representa 2,4% das ocorrências totais.

**Figura 32: Gráficos representativos de dados estatísticos referentes a incidentes com hidrogénio**



Fonte: Clean Hydrogen, 2022

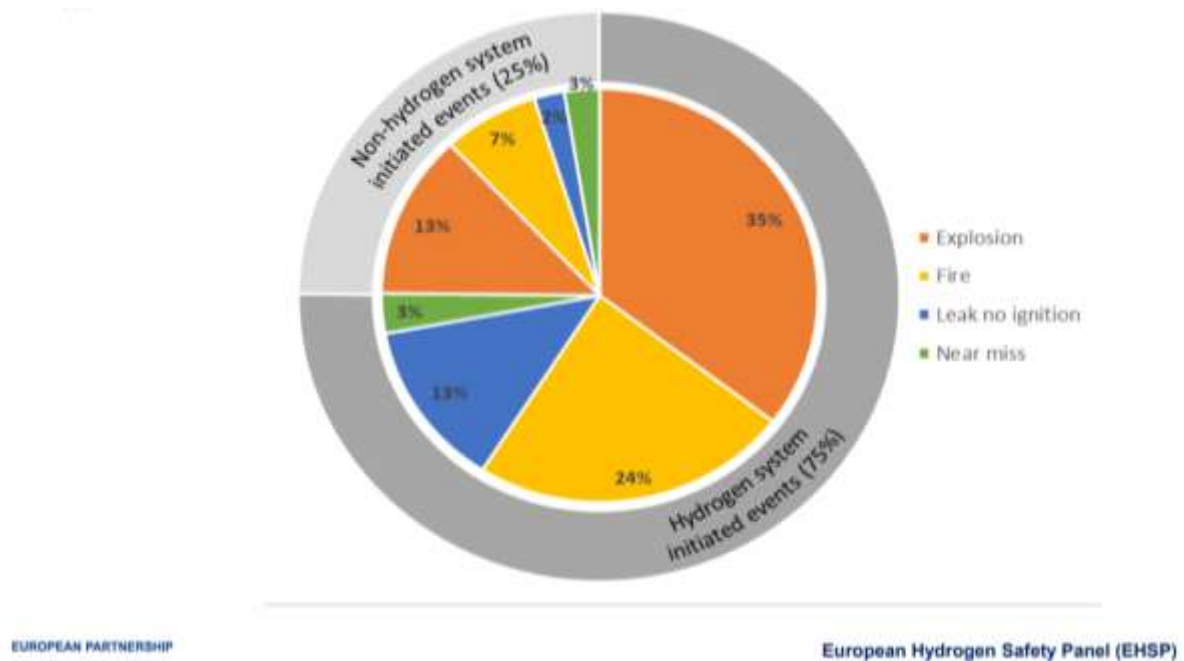
No gráfico seguinte está representada a distribuição percentual para os tipos de incidentes em instalações de hidrogénio. Verifica-se que 75% dos incidentes referem-se ao sistema de hidrogénio propriamente dito, sendo desta fração, as causas dos incidentes têm a seguinte distribuição:

- 35 % referem-se a explosões
- 24% referem-se a incêndios
- 13% referem-se a fugas sem existir ignição
- 3% referem-se a incidentes que não tiveram consequências

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Conclui-se por isso que o risco de explosões tendencialmente é o mais predominante em todos os potenciais riscos presentes em instalações que operam com o hidrogénio, e logo deverá ser o fator de risco mais observado e que deverá ser alvo de implementação de medidas preventivas mais eficazes.

Figura 33: Tipos de incidentes em instalações de produção de hidrogénio

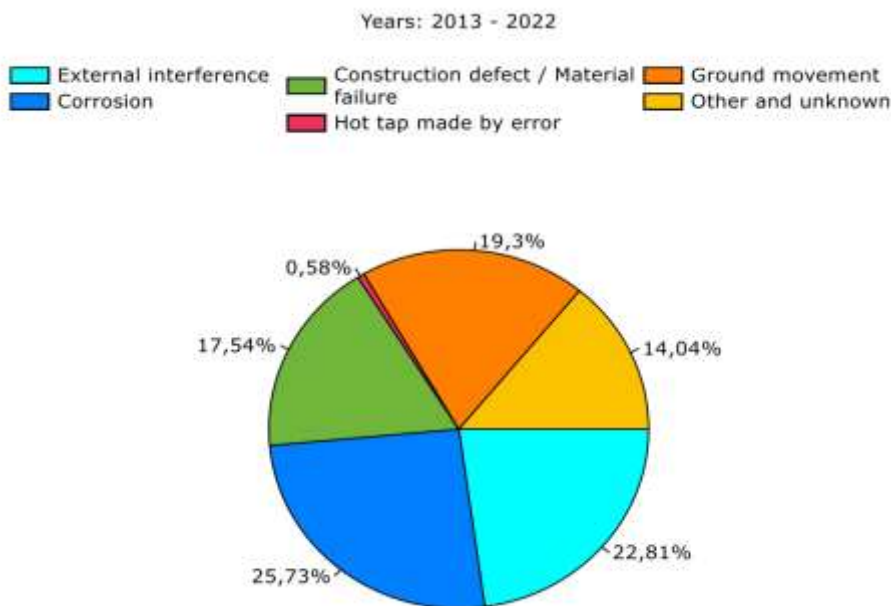


Fonte: Clean Hydrogen, 2022

De acordo com o gráfico abaixo representado, as principais causas reportadas de incidentes na Europa em gasodutos no período compreendido entre 2010 e 2019, têm a seguinte distribuição:

- Interferências externas – 22,81%
- Corrosão nos materiais – 25,73%
- Defeitos de construção ou defeitos nos materiais – 17,54%
- Movimentos de terras ou efeitos mecânicos – 19,3%
- Outras causas/Causas desconhecidas – 14,04%
- Erros em trabalhos em condutas em operação – 0,58 %

Figura 34: Gráfico de distribuição das causas de incidentes na Europa em gasodutos entre 2013 e 2022



Fonte: Clean Hydrogen, 2022

### 1.2.10. Gestão de risco de acidentes

Segundo a definição da norma ISO 45001:2018, (ISO Standards, 2018) o conceito de **perigo** constitui uma determinada situação com potencial para causar danos a pessoas e bens materiais. Por outro lado, o conceito de **risco** representa a combinação de uma avaliação qualitativa e quantitativa desse perigo com a respetiva frequência ou probabilidade de ocorrência.

Em ambientes industriais, tipicamente existem um conjunto de riscos que são frequentes e que podem resultar em acidentes de trabalho. Esses riscos incluem:

- Intoxicação por gases ou vapores
- Esmagamento de membros
- Choques elétricos
- Corte e perfuração de membros
- Projeções de partículas ou peças
- Queda
- Explosão

Embora o risco de incêndios e explosões esteja sempre presente em operações com hidrogénio verde, salienta-se que este, por si só, não representa uma ameaça. Para se

desencadear uma reação perigosa, é necessário que também exista oxigénio, assim como uma fonte de ignição. Logo, uma das principais estratégias de segurança, é manter estes três elementos separados e devidamente controlados.

O hidrogénio no seu estado normal, embora possa ser considerado um gás seguro, limpo e versátil, é também um combustível, e por isso as operações que o envolvem, estão sujeitas a riscos. Neste sentido, para mitigar esses potenciais riscos, as organizações devem adotar uma metodologia de gestão de riscos.

### **Metodologias de avaliação de risco com hidrogénio**

Para estabelecer estratégias e ações preventivas eficientes, é fundamental começar por conhecer e compreender os riscos associados aos gases de modo a eliminar possíveis fontes de risco através de uma avaliação de riscos. Isso significa examinar detalhadamente cada perigo potencial, por meio de um método organizado que envolve descobrir, estimar os riscos e as fragilidades do sistema.

Para uma correta avaliação de riscos, é importante envolver todos os intervenientes nos processos, para que possam tomar parte ativa na identificação de todos os potenciais perigos que evoluem estas atividades, não só na sua fase inicial, mas também ao longo de toda a operação ao longo do tempo.

Este processo é essencial para reconhecer potenciais ameaças originadas pela introdução de novos processos ou equipamentos, incêndio, explosão ou fugas de hidrogénio, (NREL, 2022).

Todos os riscos identificados deverão ser devidamente avaliados e classificados, de acordo com a sua importância e relevância para o processo, assim como determinada a sua probabilidade de ocorrência e potenciais consequências para cada situação.

Devem ser seguidamente ordenados por prioridades de segurança e destacados os que representam riscos cujas consequências são de maior gravidade e que possam representar maior perigo para pessoas e bens, de acordo com o descrito nas diretrizes da norma ISO 31000:2018, (ISO Standards).

Na fase seguinte, devem ser estudadas e discutidas possíveis medidas de mitigação destes riscos, que consigam eliminar, ou minimizar os referidos riscos para níveis aceitáveis, atendendo ao contexto onde estes se verificam, através do desenvolvimento e implementação de procedimentos que assegurem uma operação segura do sistema.

Após serem definidas as medidas preventivas que se entendem mais adequada, estas devem ser implementadas no processo, quer seja através de procedimentos adicionais de

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

segurança, ou introdução de novos sistemas ou dispositivos, cuja função seja de controlar de uma forma mais eficaz um determinado ponto crítico ou um processo que tenha sido identificado.

Estas medidas preventivas implementadas devem ser sempre monitorizadas e acompanhadas de perto pelos intervenientes no processo, verificando se foram efetivamente eficazes a cumprir o seu objetivo, ou se por outro lado, necessitam de medidas preventivas ou corretivas adicionais, constituindo uma metodologia iterativa de melhoria contínua assente sobre um ciclo PDCA (Planear, Implementar, Verificar, Agir).

Esta metodologia está descrita na norma ISO 9001:2015, (ISO Standards, 2015), devendo ser aplicada até alcançar o objetivo estabelecido, que consiste em eliminar um risco específico ou diminuir os perigos a patamares toleráveis.

Além disso, é essencial garantir que estes procedimentos de operação estão sempre atualizados e em conformidade com as normas de segurança em vigor, cabendo à organização promover ações de formação adequadas aos intervenientes, capacitando-os para desempenharem suas funções de forma segura e eficiente.

A norma “IEC 61508 – Segurança Funcional”, representa o conceito de matriz de risco, que relaciona a frequência de ocorrência e a severidade de acidentes, devendo ser considerada no estudo e uso do hidrogénio verde. A matriz de risco é muito importante para organizar visualmente os perigos, assegurando que se mantenham em níveis toleráveis, (Napoleão, 2019) e (Moki Sistemas, 2021).

Figura 35: Representação de uma matriz de risco

Probabilidade/ Impacto	Sem Impacto	Leve	Médio	Grave	Gravíssimo
Quase certo	Risco Elevado	Risco Elevado	Risco Extremo	Risco Extremo	Risco Extremo
Alta	Risco Moderado	Risco Elevado	Risco Elevado	Risco Extremo	Risco Extremo
Média	Risco Baixo	Risco Moderado	Risco Elevado	Risco Extremo	Risco Extremo
Baixa	Risco Baixo	Risco Baixo	Risco Moderado	Risco Elevado	Risco Extremo
Raro	Risco Baixo	Risco Baixo	Risco Moderado	Risco Elevado	Risco Elevado

Fonte: Moki Sistemas, 2021

Com base na Diretiva 1999/92/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 1999, constituinte da diretiva ATEX, verifica-se que tal como descrito no seu

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Anexo I, as áreas onde se podem formar atmosferas explosivas são classificadas em zonas, de acordo com a probabilidade e a duração da sua presença.

A classificação dessas zonas é feita de acordo com a seguinte denominação de acordo com o Anexo I da Diretiva 1999/92/CE:

*Zona 0: Uma área onde uma atmosfera explosiva está presente continuamente ou por longos períodos.*

*Zona 1: Uma área onde uma atmosfera explosiva é provável de ocorrer ocasionalmente em condições normais de operação.*

*Zona 2: Uma área onde a formação de uma atmosfera explosiva não é provável em condições normais e, se ocorrer, será de curta duração. (...)”, (Parlamento Europeu, 1999).*

Em instalações que compreendem a utilização de hidrogénio, tais como as instalações de produção, armazenamento e consumo, onde se destacam os locais onde se situam os eletrolisadores e os locais de armazenamento, podem ter um risco acrescido de fugas de hidrogénio, que pode resultar numa classificação como Zonas 1 ou 2, dependendo do grau de confinamento e da eficácia das medidas de controlo, (Weg, 2020).

Em casos muito específicos, nomeadamente no interior de reservatórios de armazenamento, num eventual espaço confinado sem ventilação adequada, essa zona pode ser classificada como Zona 0.

### 1.2.11. Questão da pesquisa

Apesar de em certa medida ser possível estabelecer uma analogia entre a produção e armazenamento de hidrogénio verde e o hidrogénio produzido através de outros recursos provenientes de combustíveis fósseis, um conjunto de questões emergem, que devem ser analisadas em detalhe, previamente à entrada em serviço de um conjunto crescente de projetos em desenvolvimento. Deverão ser respondidas com clareza e objetividade, questões como:

- Quais são os riscos inerentes às centrais de produção e armazenamento de hidrogénio verde?
- Quais os procedimentos e precauções a tomar por parte das organizações em termos de segurança?

### 1.3.Estado da arte

#### 1.3.1.As metas para a descarbonização

Conforme já referido, a sociedade atual depara-se com a necessidade urgente de efetuar uma rápida transição para um panorama energético mais sustentável.

Neste sentido, a produção de hidrogénio verde tem vindo a ganhar destaque no contexto energético atual, como sendo uma opção viável e segura, constituindo uma opção certa para cumprir os compromissos assumidos em termos de descarbonização da economia e um elemento-chave para alavancar o desenvolvimento económico, (EDP, 2021b).

O conjunto de tecnologias que servem de base à produção de hidrogénio verde, têm vindo a ser utilizadas em projetos piloto, (OECD, 2023), demonstrando a capacidade de conferir fiabilidade técnica a essas tecnologias, e têm vindo a ser desenvolvidas de forma continuada com vista a melhorar o seu desempenho e uma redução de custos, (Cardoso, 2022).

Porém, o acesso a esta fonte de energia a preços competitivos, que será uma necessidade a curto prazo, constituirá um desafio para essas tecnologias chegarem a amadurecer em tempo útil.

Para tal, será necessário contar com um forte investimento, através de um esforço coordenado a nível global, de modo a incrementar a eficácia deste processo de produção de hidrogénio, coordenando o financiamento e aumentando a partilha de conhecimento e interação entre as equipas de investigação e desenvolvimento, a indústria no seu todo, em estreita ligação com o governo, conforme referido pela Direção Geral de Energia e Geologia, (DGEG, 2019).

Paralelamente à necessidade de crescimento tecnológico a fim de aportar consistência, fiabilidade e custos mais atrativos financeiramente, existe a questão da perceção e aceitação social, que à semelhança de outras tecnologias do passado, nomeadamente a tecnologia solar fotovoltaica, necessita de transpor curvas de aprendizagem que envolvem risco, não só financeiro, mas também riscos de segurança nas operações que lhe estão associadas.

Estes representam um dos maiores desafios associados à implementação do hidrogénio no contexto energético em Portugal e ao desenvolvimento da sua indústria, (Boal, 2022).

Em analogia com o estado da tecnologia fotovoltaica há uma década, poderemos verificar que também os equipamentos à data, além de terem um custo muito elevado e representar uma tecnologia extremamente cara, face às restantes tecnologias disponíveis no mercado, apresentavam requisitos de segurança no seu desenvolvimento e operação totalmente distintos, do que presentemente se praticam.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A perceção do perigo do hidrogénio é importante, não apenas com o propósito de estimular a aceitação das tecnologias, mas também para garantir que os regulamentos e padrões impostos sejam proporcionais ao nível de risco.

Verifica-se, pois, que o excesso de legislação e regulamentos, mesmo não sendo prescritiva, o que condicionaria a inovação, pode resultar num aumento do custo de projetos específicos, por sobrevalorização dos riscos reais.

Por este motivo, os projetos piloto de demonstração estratégica são pois de importância crítica, (OECD, 2023), não apenas para avaliar a viabilidade das tecnologias, mas para demonstrar a sua segurança, no que respeita aos operadores e à própria infraestrutura, conforme previsto no Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal, (DGEG, 2019).

Estes projetos piloto e experimentais já implementados em território nacional referenciados no presente documento, servem como base de recolha de informação e também como um modelo representativo destas instalações, que através de estratégias de comunicação adequadas, podem servir de modelo para a realização de ações de sensibilização, informação e formação para diferentes públicos-alvo.

Têm como objetivo de contribuir para um maior conhecimento sobre o hidrogénio verde por parte dos intervenientes e da comunidade em geral, sendo particularmente importante para atrair investidores para este tipo de tecnologias, (Cardoso, 2022).

Para estas ações informativas e de sensibilização serem produtivas, devem ser implementados métodos adequados de gestão de riscos e o estabelecimento de regras de segurança nas operações com o hidrogénio verde (DGEG, 2018), sendo que projetos exigindo maiores infraestruturas, obrigam necessariamente a planos de maior detalhe, incluindo o modo como envolver a comunidade local.

No que respeita à necessidade de salvaguardar a saúde e segurança ao longo de todo o ciclo de vida do hidrogénio, os referidos projetos servem como plataforma de aprendizagem para estabelecer procedimentos mais adequados em termos de segurança no local de trabalho e para impulsionar a prevenção ou mitigação de acidentes.

A aceitação da tecnologia do hidrogénio verde por parte do público e das comunidades em geral está diretamente relacionada com a sua segurança, tratando-se de um dos aspetos de maior preocupação, não só na sua operação e manuseamento, mas também nos aspetos de segurança das suas infraestruturas e respetivos equipamentos constituintes.

Este fator, contribui também para a necessidade de implementar sistemas de segurança adequados e confiáveis, de forma a desenvolver competências na área da segurança neste campo de aplicação, (DGEG, 2018).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Torna-se evidente que ainda existe um inevitável percurso ao nível dos equipamentos e materiais, para atingir os níveis de segurança e eficiência operacional desejados, a um custo atrativo, de acordo com o referido pela DGEG, (2019).

Os esforços conjuntos das várias entidades em promover uma cultura de segurança neste domínio, permitirão enquadrar o hidrogénio verde como um agente decisivo para a descarbonização do sistema energético, contribuindo para uma sociedade mais saudável e segura, resultando num impacto positivo em futuros e avaliação de projetos de hidrogénio em Portugal.

Comparativamente com os restantes tipos de hidrogénio provenientes de outras fontes de energia, o hidrogénio verde, é o menos impactante em termos ambientais, em linha com os objetivos ambientais internacionais assumidos com o Acordo de Paris. "*(...) O hidrogénio renovável oferece um caminho para reduzir significativamente as emissões de carbono em vários setores. (...)*", (EDP 2024).

A implantação dos projetos de hidrogénio verde em território nacional irá contribuir para a independência e segurança energética do país, reduzindo a dependência externa dos combustíveis fósseis e aumentando a sua resiliência energética a fatores externos que possam levar a interrupções no fornecimento de energia.

Embora o conceito da eletrólise e da produção de hidrogénio já não ser novo, e existir há muitos anos em determinados contextos industriais, nunca foi idealizado ou visto como um vetor energético destinado a uma produção em larga escala, para o efeito de contribuição para a descarbonização da economia, tal como previsto para as próximas décadas.

Como tal, e dado ainda representar apenas uma pequena quota parte na indústria, não se assistiu, ao contrário do que se passou com outras tecnologias, nomeadamente o solar fotovoltaico, a um rápido crescimento da sua representatividade no contexto energético.

Consequentemente, toda a tecnologia em termos de equipamentos, eletrolisadores, não sofreu evoluções significativas ao longo dos anos. Esta curva lenta de aprendizagem da tecnologia da produção de hidrogénio, implica não só a necessidade de otimizar e fazer evoluir os equipamentos e materiais em termos de eficiência, mas também do respetivo custo, que ainda se mantém muito elevado, (EDP, 2024).

As implicações desta situação são numerosas, incluindo a falta de capacidade de produção, a baixa eficiência dos eletrolisadores e a incerteza quanto ao seu funcionamento ao longo do tempo (tempo de vida, degradação, condições de funcionamento), (Monteiro, 2021).

### Imaturidade da tecnologia

Existe alguma controvérsia, acerca do tema “imaturidade” da tecnologia de produção do hidrogénio verde. Efetivamente, as técnicas de produção de hidrogénio verde baseiam-se em três tecnologias já conhecidas:

- A desmineralização de água (processo existente há mais de um século);
- A eletrólise da água com recurso a eletricidade (existente há dois séculos);
- A produção de eletricidade verde, ou seja, obtida através de fontes de energia renovável, que têm vindo aumentar a sua capacidade em Portugal, tendencialmente com redução progressiva de custos, devido a uma economia de escala.

Todas estas tecnologias indicadas não são consideradas imaturas, pois baseiam-se no conceito da eletrólise de água já bem conhecido. No entanto, a sua combinação para se realizar a eletrólise da água, ainda terá um longo caminho de desenvolvimento em termos de eficiência e redução de custos, assim como todos os aspetos de segurança que também acompanharão esta evolução tecnológica.

Neste aspeto, esta tecnologia revela ainda muita imaturidade, pois ainda tem um longo caminho a percorrer na sua consolidação em termos tecnológicos, enquadrada numa economia de grande escala de produção de hidrogénio verde.

Esta imaturidade reflete-se ainda na escassez de legislação regulatória para a sua utilização, e mais concretamente no que respeita aos aspetos de segurança, é necessário desenvolver requisitos específicos para não só a produção de eletrolisadores e outro equipamento necessário, mas também, especificar procedimentos de operação e de emergência que todos os utilizadores desta tecnologia deverão respeitar.

A utilização deste vetor energético numa economia de grande escala irá resultar seguramente numa produção industrial de grande volume de todos os equipamentos de uma forma harmonizada e por conseguinte, o custo de produção de cada unidade tenderá a reduzir, ao contrário da sua eficiência que tenderá a aumentar, (APREN, 2021).

### Curvas de aprendizagem para a eletrólise

Através de uma abordagem de uma economia de grande escala, será possível uma redução substancial de custos nas produções em massa.

A massificação da tecnologia permite uma dinamização em termos de investigação e desenvolvimento a nível de componentes, materiais e equipamentos que aumenta significativamente o nível de conhecimento deste tema em particular, evidenciando um

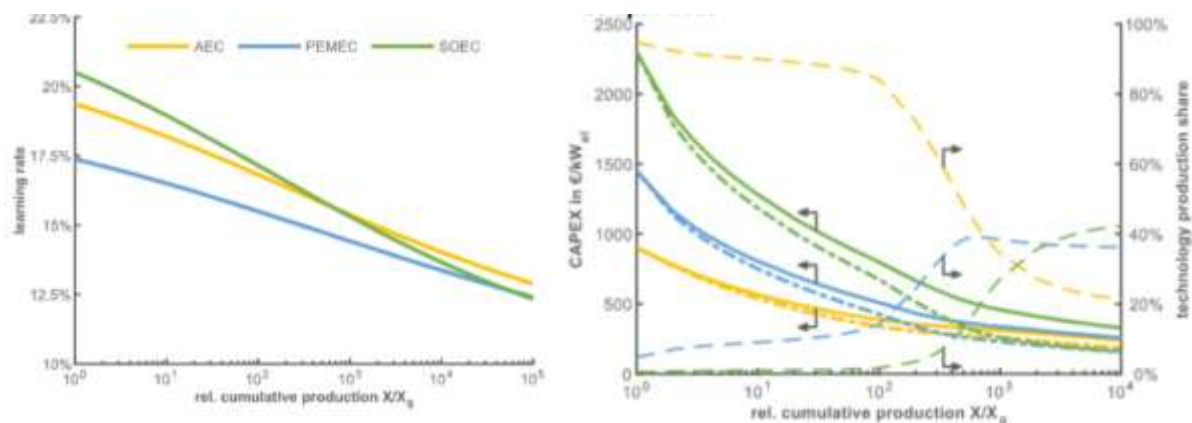
decréscimo nos custos de produção, que ocorre pelo aumento da escala dos processos de fabrico.

Isto resulta na alteração dos custos dos materiais, que tornam as margens negociais mais atrativas, permitindo uma estimativa mais precisa do desenvolvimento futuro dos custos de produção com base nos custos das matérias-primas.

O maior conhecimento e a evolução dos produtos determinado pela produção em massa dos equipamentos, resultará ainda numa redução dos tempos de fabrico, podendo ser determinados e avaliadas com maior precisão, permitindo efetuar planeamentos mais objetivos e aproximados da realidade.

Relativamente aos custos, esta massificação também resultará numa redução dos custos de processamento das máquinas e também nos custos de tempo de trabalho manual, (Bohm et al., 2019).

**Figura 36: Curvas de aprendizagem e respetivo custo para sistemas de eletrólise em função da produção**



**Fonte: Bohm et al.,2019**

A imaturidade da tecnologia de produção do hidrogénio verde, reflete-se sobretudo na baixa eficiência e nos custos elevados deste processo, justificada por um número limitado de empresas que operam neste setor que recorrem a esta tecnologia, e que utilizam hidrogénio verde como matéria-prima.

Atendendo à expectável necessidade de evolução e crescimento em termos tecnológicos, acompanhando a curva de aprendizagem, também os métodos e procedimentos de segurança implementados atualmente, deverão igualmente ser alvo de constantes revisões, em linha com o desenvolvimento tecnológico que se irá fazer sentir, para os tornar mais eficazes e abrangentes.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A constante evolução dos equipamentos e dos processos tecnológicos deverá ser sempre acompanhada por uma igual evolução dos conceitos de segurança associados ao processo, nomeadamente revisão de procedimentos, ou mesmo implementação de novos sistemas de prevenção de acidentes que contribuam para níveis superiores de segurança no trabalho, (EDP, 2024).

Esta imaturidade tecnológica que se verifica atualmente não deve ser compreendida meramente como uma ameaça, podendo ser vista como uma oportunidade para que Portugal se evidencie neste mercado e na futura cadeia de valor do hidrogénio verde, tal como é previsto por João Bernardo, Ex-Diretor-Geral da DGEG e atual Presidente do Conselho de Administração do Centro de Biomassa para a Energia, (Associação Industrial Portuguesa, 2022).

Neste sentido, é importante desenvolver investigação mais aprofundada para desenvolver normas de segurança bem definidas, baseadas em evidências e histórico de incidentes previamente registados.

Em linha com esta metodologia, a Associação Internacional para a Segurança do Hidrogénio (HySafe), desenvolveu um estudo sobre as Prioridades de Investigação para a Segurança do Hidrogénio, representando o estado da arte e o progresso recente na investigação, sobre o tema da operação com Hidrogénio Verde, para apoiar o desenvolvimento de novas normas, evidenciando a identificação e classificação das necessidades de investigação pendentes.

Neste estudo foram identificadas necessidades de investigação em diversas áreas da segurança, nomeadamente relacionados com a compatibilidade de certos materiais (metais e plásticos) com o hidrogénio; deteção de fugas de hidrogénio; modelação de fenómenos de hidrogénio; e segurança de eletrólise para operações em estado instável.

Este estudo, indica ainda que embora tenhamos assistido recentemente a um crescimento desta tecnologia, ainda é evidente um considerável grau de imaturidade que tem de ser explorado e desenvolvido em termos de segurança, representando um desafio importante nos próximos anos, (IEA, 2021).

O aumento de produção de hidrogénio verde estimado para os próximos anos, que por sua vez irá contribuir para o processo de descarbonização, deverá ser acompanhado por um proporcional aumento da geração de energia renovável injetada na rede, e consequentemente, de um aumento da sua capacidade instalada.

Este cenário, irá implicar que a procura de todos os equipamentos, em particular os eletrolisadores que estão associados à produção do hidrogénio verde, irá aumentar, para dar

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

resposta à implantação de novos projetos de centrais, com vista ao aumento da sua capacidade de produção.

Neste contexto, estima-se que a procura de eletricidade proveniente de fontes de energia renovável, destinada à produção de hidrogénio verde aumentará nos próximos anos, ao adotar uma economia de escala nos projetos de produção de hidrogénio verde, até alcançar as metas traçadas até 2030 e 2050.

A Comissão Europeia estima que sejam necessários cerca de 500 TWh de eletricidade renovável para atingir as metas estabelecidas até 2030, pelo “*REPowerEU*”, para produzir 10 milhões de toneladas de combustíveis renováveis de origem não biológica, a que correspondem 14 % do consumo total de energia da UE. Estas metas estabelecidas têm como propósito um aumento para 45 % a meta estabelecida para 2030 em matéria de energias renováveis.

Atendendo às metas estabelecidas pela União Europeia, e à necessidade de cumprimento das mesmas através da participação de diversas empresas, será necessário um conjunto de investimentos faseados, permitindo que o setor se possa adaptar a este novo contexto, implementando as respetivas regras de forma progressiva, mas sempre garantindo a máxima segurança para bens e pessoas.

Estas regras devem gradualmente passar a ser mais rigorosas e detalhadas. Esta evolução do nível de exigência das regras que serão impostas, irá passar por uma fase de transição, que corresponde ao período necessário para que eletrolisadores sejam desenvolvidos e introduzidos no mercado, para os projetos de hidrogénio que entrarão em funcionamento antes de 1 de janeiro de 2028.

Os Estados-Membros poderão, no entanto, introduzir regras mais rigorosas em matéria de correlação temporal até 1 de julho de 2027, (Comissão Europeia, 2023).

### 1.3.2. Projetos de produção de hidrogénio verde em Portugal

Estão a decorrer em simultâneo vários projetos em todo o Mundo, com investimentos importantes e de grande dimensão, que refletem a importância dada pelos investidores a este vetor energético, enquadrados no contexto atual geopolítico, que não só potencialmente contribuirá para a descarbonização de toda a economia, mas também para a autonomia e excesso de dependência de países com recursos energéticos derivados de combustíveis fósseis.

Os projetos de hidrogénio verde serão enquadrados dentro das seguintes configurações:

- Local, de pequena escala e com foco na mobilidade

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Local, de média escala e com foco na indústria
- Grande escala, de relevo internacional e com foco na exportação

Atualmente já existem diversos projetos em desenvolvimento em Portugal, entre os quais destaca-se os projetos de Sines, que representa a maior instalação de hidrogénio atualmente existente no país, instalações nos concelhos da Nazaré, Marinha Grande, Leiria e Alcobaça, Vila Franca de Xira, Estarreja e Oliveira do Bairro.

Abaixo indica-se alguns detalhes das instalações de produção de hidrogénio verde mencionadas: (Neto, 2025) e (INEGI, 2025).

- Vale Sines: Projeto da GALP (100 MW – 600MW de Eletrólise) e Projeto Madoqua Renewables;
- Vale de Aveiro: Oliveira do Bairro, Aveiro, Aveiro Green H2 Valley, promovido pela Smartenergy, 100 MW de eletrólise;
- Vale da Nazaré: Projeto da REGA Energy, 40 MW de eletrólise numa fase inicial e um objetivo de 600 MW no futuro;
- Vale de Estarreja: Projeto H2Enable da Bondalti H2, Sistema de eletrólise de 40 MW;
- Vale de Vila Franca de Xira, A Smartenergy implementou o Galileu Green H2 Valley, 125 MW de capacidade de eletrólise a partir de uma central solar de 400 MW;
- Póvoa de Santa Iria, Projeto H2Hub da HyChem com reforço de potência dos 2 MW já em produção para uma capacidade de 12 MW;
- Iberdrola and Fertiberia hydrogen: Fábrica de produção de amoníaco com hidrogénio verde, em PuertoLlano, 100 MW Solar, 20 MW de Eletrólise, 20 MWh de armazenamento, 40 000 toneladas;
- Projeto Piloto no Seixal formando o “Green Pipeline Project” – É efetuada uma mistura de hidrogénio Verde numa rede de distribuição dedicada construída especificamente para o projeto, alimentando cerca de 80 consumidores maioritariamente residenciais. O hidrogénio verde utilizado recorre a energia solar e é misturado numa percentagem de 12%, que será aumentada até uma concentração de 20% até ao final do projeto, (Comissão Europeia, 2022) e (Floene, 2025);
- A Dourogás em parceria com a empresa Lightsource bp, para a produção de hidrogénio verde em Portugal poderá criar mais de mil postos de trabalho. Serão oito projetos de produção de hidrogénio verde nos quais 200 MWp envolverão a energia solar produzida pela Lightsource bp. Estes alimentarão eletrolisadores de 130 MW desenvolvidos pela

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Dourogás, que converterão água em hidrogénio verde e oxigénio. O hidrogénio será injetado diretamente na rede de gás do país, (Lightsource, 2021);

- Em outubro de 2024 foi também anunciado o investimento de 26 milhões de euros por parte da Voltalia, em dois projetos de produção de hidrogénio verde com a eletrólise da água alimentada por fontes 100% renováveis, como energia eólica e fotovoltaica. perto do Carregado e na região da Covilhã, de acordo com o publicado no Jornal de Negócios, (Jornal Negócios, 2024).

Figura 37: Projetos de hidrogénio previstos até 2030 em GW de potência instalada



Fonte: ISQ, 2024

### Projetos implementados e em curso na Europa e outros países

A União Europeia e vários países a nível individual, como Portugal, apresentaram recentemente estratégias para o hidrogénio verde. Este conjunto de países formaram a Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo, que junta mais de mil entidades, entre empresas, associações, centros de investigação e outras entidades públicas e privadas, (Comissão Europeia, 2023).

A Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo pretende desenvolver e implementar o hidrogénio verde como um vetor energético viável e competitivo na Europa até 2050, apoiando a implementação da estratégia do hidrogénio para uma Europa com neutralidade carbónica, construindo uma cadeia de valor harmonizada, para toda a União Europeia.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Estão previstos investimentos para a instalação de pelo menos 6 GW de eletrolisadores de hidrogénio renovável na UE até 2024 e 40 GW de eletrolisadores de hidrogénio renovável até 2030, (Comissão europeia, 2020).

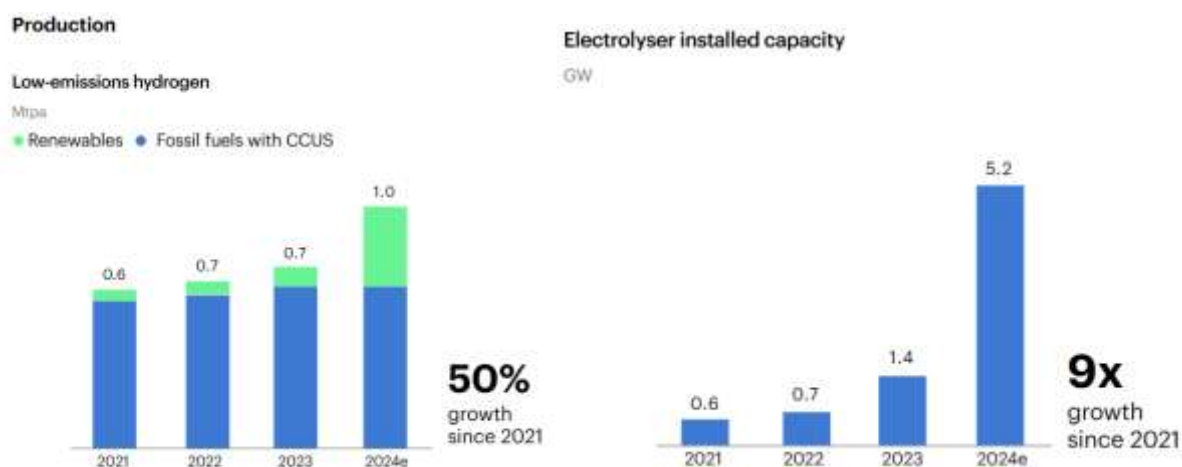
A estratégia de investimento da União Europeia compreende três fases de desenvolvimento da economia do hidrogénio limpo, nos diferentes setores da indústria, (Diário da República, 2020).

Na primeira fase, o objetivo é descarbonizar a produção atual de hidrogénio em aplicações como o sector químico, e promovê-la para novas aplicações, o que implicará um aumento da capacidade instalada de aproximadamente 6 GW de eletrolisadores de hidrogénio verde, com o objetivo de produzir até um milhão de toneladas.

Após concluída esta fase, o objetivo passa por inserir o hidrogénio verde num sistema energético integrado, com o objetivo estratégico de instalar pelo menos 40 gigawatts de eletrolisadores de hidrogénio renovável até 2030 e produzir até dez milhões de toneladas de hidrogénio renovável na União Europeia, sendo a sua aplicação expandida para outros setores como a siderurgia, transportes e transporte marítimo.

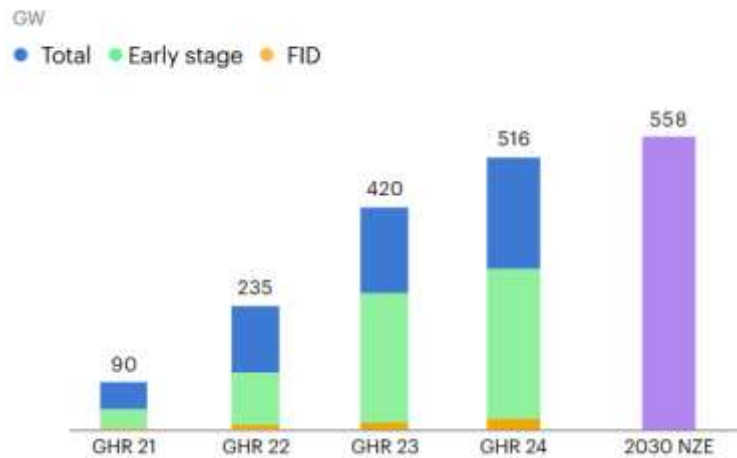
A terceira fase, compreendida entre 2030 e 2050, terá como objetivo implantar o hidrogénio verde em larga escala, sendo expectável que nessa altura esta tecnologia tenha atingido uma maturidade suficiente para ser eficiente e economicamente viável, (Comissão europeia, 2020a).

**Figura 38: Produção de hidrogénio verde entre 2021 e 2024 (esquerda); Capacidade instalada de eletrolisadores entre 2021 e 2024 (direita)**



Fonte: IEA - International Energy Agency, 2024

**Figura 39: Projetos anunciados de eletrolisadores até 2030 em (GW)**  
Announced electrolyser projects by 2030



Fonte: IEA - International Energy Agency, 2024

### Portugal

O surgimento de novos projetos em Portugal está diretamente relacionado com a viabilidade económica e a construção de modelos de negócio, que despertem o interesse a investidores.

Atualmente diversos projetos encontram-se em fase de desenvolvimento e em fase de licenciamento, porém, verifica-se que ainda existe uma grande complexidade e ausência de legislação concreta e clara, que introduzem incerteza e consequentemente retraem alguns dos potenciais investidores.

Existe uma forte ambição para alavancar esta tecnologia, tal como está refletida nas metas estipuladas pelo governo português, demonstrado nos objetivos abaixo indicados:

- 770 eletrolisadores em 2030, com uma potência de 7,45GWh;
- 3,64GWh injetados na indústria;
- 900 GWh usados na produção de 2,83GWh de eletricidade;
- 109.400 veículos ligeiros a hidrogénio (54.700 no pior cenário);
- 350 autocarros, 830 camiões e 5 comboios movidos a H<sub>2</sub>;
- 196 estações de serviço com fornecimento de hidrogénio (100 no pior cenário);
- 1,8 milhões de toneladas de emissões poluentes evitadas, (EDP, 2021c).

As metas definidas no documento da Estratégia Nacional para o Hidrogénio até 2030 a nível de percentagens são as seguintes:

- 10% a 15% de injeção de hidrogénio verde nas redes de gás natural;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- 2% a 5% de hidrogénio verde no consumo de energia do setor da indústria;
- 1% a 5% de hidrogénio verde no consumo de energia do transporte rodoviário;
- 3% a 5% de hidrogénio verde no consumo de energia do transporte marítimo e doméstico;
- 1,5% a 2% de hidrogénio verde no consumo final de energia;
- 2 GW a 2,5 GW de capacidade instalada em eletrolisadores;
- Criação de 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogénio, (DGEG, 2020).

Devido ao expectável crescimento da produção do hidrogénio verde, o governo português tem previstas um conjunto de ações a serem implementadas:

- Regulamentar a produção de hidrogénio verde;
- Regulamentar a injeção de hidrogénio verde na rede nacional de gás natural;
- Desenhar um mecanismo de apoio à produção de hidrogénio verde;
- Implementar um sistema de garantias de origem para o hidrogénio verde;
- Garantir que os recursos financeiros disponíveis em fundos nacionais e europeus permitem o apoio à produção de hidrogénio verde;
- Propor a fixação de metas vinculativas até 2030 para a incorporação de hidrogénio verde na rede de gás natural no sistema energético nacional.

### 1.3.3. Desafios na implementação da tecnologia

O grau de imaturidade desta tecnologia, associado a uma falta de historial e evolução tecnológica, e o facto de ainda não existir um quadro regulamentar completo específico sobre o tema, introduz um conjunto de incertezas que criam constrangimentos à sua utilização, (EDP, 2024).

Devido à transição energética, é expectável que o hidrogénio verde tenha um crescimento muito rápido e acentuado, havendo uma necessidade na construção de instalações de hidrogénio verde em grande escala, emergindo novas questões de segurança, que diferem substancialmente das conhecidas de pequena dimensão.

Dada a necessidade de combinar um elevado número de grupos eletrolisadores, é necessário avaliar os riscos introduzidos com a interligação entre os referidos grupos e uma maior complexidade dos sistemas de controlo e monitorização das instalações, havendo ainda

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

a necessidade de um controlo muito mais rigoroso e complexo em termos de manutenção preventiva, (Veiga, 2022).

Na publicação do Guia do Promotor publicado pela Direção Geral de Energia e Geologia referente à legislação e regulação para a economia do hidrogénio, é referido que, “(...) *Cumprir com esta trajetória apresenta um conjunto de desafios verdadeiramente transformacionais, com particular relevo para os padrões de produção e de consumo e à forma como produzimos e consumimos a nossa energia (...)*”, (DGEG, 2021).

A grande diversidade expectável de promotores deste tipo de instalações, resultará em diferentes perfis de conservadorismo em termos de segurança a adotar nas instalações, podendo nuns casos levar a um sobredimensionamento dos sistemas de segurança implementados, e noutros a fazer menores investimentos, obtendo por isso níveis de segurança inferiores.

Nesta situação, será sempre preferível adotar uma operação segura, através da utilização de pressupostos mais conservadores, para abordar as incertezas específicas relativas aos perigos existentes no processo, (EDP, 2024).

As propriedades do hidrogénio apresentam também algumas características que o evidenciam, pois este isoladamente não é um gás tóxico, corrosivo, radioativo, poluente ou auto inflamável.

Para que possa ocorrer uma explosão, é necessário se misturar com um oxidante, tal como o oxigénio, e surgir a uma fonte de ignição para a sua combustão, conforme descrito por Adolf et al, (2017).

Uma das suas características que se destaca, tem a ver com a necessidade de uma energia mínima para se dar a ignição, o que no caso do hidrogénio é cerca de doze vezes menor que a da gasolina.

Esta característica, embora seja de grande utilidade em algumas aplicações, também se afigura um risco acrescido na sua utilização, representando um grande desafio em termos de mecanismos de segurança e controlo.

Uma outra característica do hidrogénio verde é o facto de apresentar uma chama de baixa visibilidade, dificultando a identificação de fugas.

Outra propriedade do hidrogénio que representa um desafio em termos de segurança, é o facto de ter uma baixa densidade, o que representa numa maior facilidade de se difundir através de vedantes, potenciando um acidente, exigindo um cuidado redobrado nas manutenções preventivas e nos respetivos procedimentos de segurança, (General Electric Company, 2019).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Adicionalmente, todos os equipamentos utilizados no processo de produção e armazenamento, devem estar devidamente certificados e respeitar normas de segurança muito rigorosas, procurando evitar a existência de quaisquer fontes de ignição (Adolf et al., 2017).

Sendo ainda a produção de hidrogénio verde inteiramente dependente das fontes de energia renovável, tipicamente o solar e o eólico, esta estará dependente das flutuações e variabilidade intrínseca destas fontes de energia, que contam com alguma imprevisibilidade, e dependência de fatores externos tais como a existência de irradiação solar ou vento, (Diário da República, 2020).

Estas variações de produção e imprevisibilidade, poderão levar a mais ou menos frequentes paragens ou variações importantes também na produção do hidrogénio, forçando os eletrolisadores a ter variações frequentes da sua carga, o que poderá também só por si representar um risco acrescido, nomeadamente na sua degradação prematura, e afetar decisivamente diversos aspetos relacionados com a segurança, (Cate et al., 2023).

Considerado como um dos principais desafios atuais para a viabilização dos projetos de hidrogénio verde, é a questão económica e dos custos de produção ainda elevados comparativamente a outros recursos energéticos, devido sobretudo à ainda imaturidade e competitividade das tecnologias de eletrólise, ao custo superior da energia renovável e à ausência de uma produção de grande escala, (EDP, 2024a).

Por outro lado, é fundamental obter eletrolisadores mais eficientes e mais baratos e ter acesso a energias renováveis com tarifas mais acessíveis.

Estes fatores conjugados influenciam determinantemente o custo do investimento, (EDP, 2024a), pelo que é expectável que as economias de escala no mercado global de hidrogénio verde contribuam para a redução dos custos totais, através de um investimento sólido na fase inicial de implementação desta tecnologia, (DGEG, 2018).

De uma forma sintética, pode-se considerar que para impulsionar a produção do hidrogénio verde, no sentido que este se torne efetivamente uma solução viável para a transição energética, têm de ser estudadas soluções que respondam aos desafios abaixo indicados:

- Inexistência de Infraestruturas de produção, transporte e armazenamento, implicando um investimento significativo por parte dos promotores e do governo para impulsionar o crescimento desta tecnologia;
- Imaturidade da tecnologia, que pode representar vários anos até que a tecnologia possa atingir um patamar de maturidade que permita que os preços se tornem mais competitivos;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Atribuição de incentivos económicos que tornem economicamente viável os investimentos por parte dos promotores;
- Falta de regulamentação e certificação do hidrogénio verde será um fator muito importante para atrair a confiança dos investidores, dando o conforto necessário em termos da definição das regras, permitindo ter uma visão clara do modelo de negócio a criar, assim como permitir uma diminuição da carga burocrática e administrativa, permitindo a redução da complexidade dos processos de licenciamento das instalações, (DGEG, 2021);
- Do ponto de vista político e económico, será fundamental o estabelecimento de linhas de financiamento diretos com os promotores e investidores destes projetos, de forma a promover estas iniciativas e dar um impulso inicial, e fixar objetivos e metas concretos a nível nacional;
- Estabelecimento de protocolos de cooperação entre países para haver intercambio na produção e consumo de hidrogénio verde, assim como uma harmonização técnica para flexibilizar o mercado global do hidrogénio verde, (International Renewable Energy Agency, 2023);
- Necessidade de aumentar a capacidade instalada de centrais de produção de energia renovável para alimentar as centrais de produção de hidrogénio verde;
- Criação e implementação de novas normas de segurança, e procedimentos de operação mais detalhados e complexos;
- Investimentos substanciais em novas soluções mais eficientes e seguras para armazenar hidrogénio verde, assim como obter uma redução dos respetivos custos, (Diário da República, 2020);
- Ausência de regras claras, e complexidade nos processos de licenciamento dos projetos.

### 1.3.4. Regras de segurança implementadas

Em todas as atividades empresariais, seja qual for o contexto, ou setor onde esta se enquadra, a segurança das pessoas e bens deve ser sempre o fator prioritário para o seu desenvolvimento e continuidade em operação.

O grau de preocupação, o tempo e investimento financeiro por parte das empresas nesta área da segurança, é proporcional à sua eficiência, à sua credibilidade e prosperidade no setor.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A obtenção de certificados normativos, nomeadamente a certificação em normativas específicas sobre a segurança nos processos, é fundamental para esta área de negócio, não só transmitindo confiança aos seus trabalhadores, mas também transmitindo segurança aos clientes e outros parceiros comerciais, (IPHE, 2024).

Atendendo aos riscos inerentes das operações com o hidrogénio verde, evidenciados nos capítulos anteriores, estão implementados nas organizações, um conjunto de procedimentos e medidas preventivas para minimizar o risco de ocorrência de acidentes ou mitigar esses possíveis riscos, como é o caso das diretivas ATEX, (Parlamento Europeu, 2014).

Estas descrevem os requisitos mínimos de segurança para locais de trabalho e respetivos equipamentos usados em atmosferas explosivas. A adoção de procedimentos de segurança rigorosos é necessária para garantir a compatibilidade dos sistemas existentes com a presença de hidrogénio.

Ao trabalhar com hidrogénio, é também essencial o envolvimento das autoridades de segurança e meios de emergência locais para garantir a eficácia das medidas de emergência implementadas e também a conformidade com normas e regulamentos, assegurando que todos os procedimentos e equipamentos cumprem todos os padrões de segurança e prevenção de riscos.

### Princípios básicos de segurança do hidrogénio

Para atenuar os riscos associados ao hidrogénio, torna-se necessária a implementação de um conjunto de medidas preventivas.

Representando um dos principais e mais evidentes princípios de segurança numa instalação que opera com hidrogénio, a constante necessidade da monitorização de potenciais fugas em todo o sistema, deve ser sempre assegurada, através da instalação de dispositivos com capacidade de gerar alertas, vitais para identificar anomalias precocemente e evitar consequências mais graves, (Buttner, 2024).

Por outro lado, a utilização de materiais robustos, projetados para mitigar a fragilização induzida pelo hidrogénio, contribui para assegurar a integridade da estrutura.

Uma ventilação adequada e medidas preventivas básicas, reforçam a prevenção para evitar a acumulação perigosa do hidrogénio. No que respeita ao armazenamento na forma líquida, o isolamento térmico é especialmente importante para minimizar perdas por evaporação e atenuar riscos de temperaturas extremamente baixas, garantindo um armazenamento mais seguro e eficiente, (Atlas Copco, 2023), (Columbia University, 2020).

### Sistema em pressão

Os sistemas de produção e armazenamento de hidrogénio verde estão constantemente pressurizados, representando por isso um risco acrescido na sua operação. O risco de suceder um defeito num segmento da instalação, pode originar a libertação da sua energia acumulada de uma forma descontrolada, o que potencialmente pode originar acidentes com consequências graves.

Por conseguinte, devem ser adotados procedimentos e sistemas de segurança que, de forma preventiva possam antecipar estes casos, nomeadamente a implementação de sistemas de monitorização de pressões e caudais, sistemas de alerta automático de anomalias e recurso a diversos tipos de válvulas e dispositivos de segurança de corte automático, (Reda, 2023).

### Incêndio

Uma operação segura com o hidrogénio verde, implica um controlo rigoroso em permanência da existência de fugas e os seus níveis de concentração, temperatura e pressão, prevenindo a formação de atmosferas potencialmente explosivas, devendo ainda ser identificadas todas as possíveis fontes de ignição nas proximidades da instalação, que possam dar início a uma explosão ou incêndio.

Nesse caso, o primeiro passo a tomar, será sempre de isolar o segmento da instalação onde está a ocorrer o incêndio, interrompendo de imediato o fornecimento do hidrogénio, e caso não haja risco acrescido para o ambiente envolvente, deverá deixar-se o fogo arder até esgotar o gás residual nesse segmento da instalação.

Caso o incêndio possa comprometer outras áreas sensíveis ou possa estar a criar riscos para pessoas ou à restante instalação, o incêndio deverá ser combatido com água pulverizada, pó químico ou dióxido de carbono a partir de uma posição devidamente protegida, com o apoio dos meios de emergência locais, (Atlas Copco, 2025).

Os sistemas de ventilação devem ser devidamente certificados para operação com hidrogénio, garantindo que o seu funcionamento não introduz risco de ignição em caso de fuga.

### Compatibilidade de materiais

Está demonstrado que existem casos de incompatibilidade do hidrogénio verde com determinados materiais, cujas propriedades demonstram certas reações adversas, sendo por isso sensíveis à sua presença.

Conforme evidenciado em capítulos anteriores, alguns metais tornam-se frágeis e quebradiços devido ao contacto destes com o hidrogénio. Essa fragilização pode causar uma

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

ductilidade reduzida e uma diminuição das suas capacidades mecânicas, o que pode originar fissuras e que o material constituinte das infraestruturas, fique quebradiço e mais suscetível a vibrações, impactos e com limites de resistência mecânicos abaixo do expectável.

Por este motivo, a verificação da compatibilidade dos materiais com o hidrogénio é importante para garantir a segurança de bens e pessoas, mas também para assegurar a durabilidade e bom funcionamento da instalação. A fragilização dos materiais por vezes resulta no surgimento de microfissuras, que potencialmente podem resultar em fugas de hidrogénio.

A resistência ao surgimento de fissuras e a taxa de propagação das mesmas nos materiais, na presença de hidrogénio, são fatores críticos que devem ser estudados e avaliados com muito detalhe, (Gangloff et al., 2012).

O surgimento destes efeitos adversos tipicamente diminui com o aumento da temperatura, verificando-se que, por norma, a maioria dos metais são relativamente imunes à fragilização pelo hidrogénio, acima de 150 °C.

Desta forma uma estratégia para minimizar este efeito será operar o sistema a temperaturas elevadas, a rondar os 400 °C e mantê-lo a esta temperatura durante um tempo definido, para retirar o hidrogénio microscópico que se encontra acumulado nas suas paredes internas, (Columbia University, 2020).

Atualmente, este fenómeno da fragilização dos materiais representa um dos principais desafios nesta tecnologia, sendo fundamental o estudo e aperfeiçoamento do tipo de materiais a recorrer no futuro, testando a sua compatibilidade e resistência à degradação imposta pelo hidrogénio, para que possam suportar eficazmente pressões cada vez mais elevadas e ao mesmo tempo permitir a necessária elasticidade a vibrações.

Os referidos testes devem simular e avaliar os esforços mecânicos a que o sistema está sujeito, observando a taxa de crescimento das microfissuras, incluindo simulações reais com gás em circulação no seu interior.

A necessidade desta evolução em termos de materiais a utilizar é reforçada ainda pela tendência de se vir a aumentar gradualmente a concentração de hidrogénio nos sistemas de transporte e distribuição, que representará uma desgaste acrescido, e por isso, reforça a necessidade da introdução de novos materiais de forma a garantir a segurança necessária para a sua operação em condições cada vez mais exigentes.

Atualmente, os principais elementos da infraestrutura de transporte, armazenamento e distribuição de gás natural, bem como os aparelhos domésticos a gás, devem ser capazes de operar confortavelmente com até 10% de hidrogénio, sem necessidade de modificações, (Diário da República, 2025).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A tendência a médio prazo, será ir aumentando faseadamente a concentração do hidrogénio para valores a rondar os 20% na infraestrutura de distribuição de gás natural, caminhando para uma adaptação gradual à introdução desse elemento na matriz energética, podendo ser necessário que sejam introduzidas melhorias nos materiais e substituídos determinados componentes considerados mais frágeis, (Diário da República, 2025).

### Recomendações para materiais na infraestrutura de hidrogénio

Para fazer face aos efeitos negativos que o hidrogénio provoca nos materiais, podem ser tomadas em consideração algumas diretrizes acerca da seleção de materiais a utilizar, e também a procedimentos de manutenção e operação:

- Retirar impurezas existentes, rugosidades no material, dureza excessiva e corrosão, que potenciam a acumulação de moléculas de hidrogénio, e que consequentemente fragilizam o material;
- Recorrer a tratamentos térmicos específicos para reforçar a resistência dos materiais e reduzir as acumulações de hidrogénio;
- Assegurar elevadas qualidades de soldadura e de aço minimizando as acumulações de hidrogénio;
- Inspeccionar e testar as condutas procurando quaisquer microfissuras existentes, eliminando esses pontos, que potencialmente representam pontos fracos que terão tendência a agravarem-se;
- Evitar elevada dureza nas zonas de soldadura, pois pode aumentar a suscetibilidade à fragilização do material;
- Adotar métodos avançados de inspeção de toda a infraestrutura, tais como testes de aumento da concentração de hidrogénio na infraestrutura, com vista à deteção precoce de defeitos e à certificação da adequabilidade da infraestrutura existente, com a concentração de hidrogénio aplicada, (Diário da República, 2025a);
- Ter em conta as exigências operacionais, nomeadamente as pressões nominais que todo o sistema irá operar, assim como a respetiva temperatura e concentração de hidrogénio, que são fatores que contribuem para uma maior ou menor degradação;
- Avaliar qual o nível de periodicidade que deverão ter as inspeções e o nível de desgaste a que o sistema irá estar sujeito, (Atlas Copco, 2023).

### Ventilação

A implementação de sistemas de ventilação adequados e eficientes, representa uma estratégia de mitigação de risco de elevada relevância em aplicações que envolvem hidrogénio. Estes equipamentos têm um papel fundamental na "desclassificação de zonas de risco de explosão".

Ao ventilar uma área com ar livre de gases inflamáveis, a concentração de hidrogénio pode ser reduzida e mantida abaixo do seu Limite Inferior de Explosividade, permitindo que uma zona de maior risco seja reclassificada para uma de menor risco.

A implementação de um sistema de ventilação fiável e eficaz, permite assegurar ambientes com ar de boa qualidade e sem contaminação de outros gases, sobretudo nos ambientes mais confinados.

A ventilação pode ser natural ou forçada através de exaustores ou ventiladores específicos para operar em zonas ATEX, devendo existir um estudo prévio e respetivo dimensionamento, de acordo com as condições existentes e aos tipos de riscos identificados. A instalação deve por isso estar equipada com extratores devidamente dimensionados e com capacidade de extração de potenciais fugas de gases indesejados.

Em ambientes fechados, onde há possibilidade de acumulação de altas concentrações de hidrogénio, a utilização de equipamentos de ventilação resistentes à explosão, bem como sistemas de ventilação de escape adequados, são fundamentais para garantir um ambiente operacional seguro.

Uma ventilação adequada deverá ser sempre considerada prioritária, e caso esta não esteja a qualquer momento garantida, as operações não devem prosseguir. Atendendo à característica do hidrogénio que sobe quando existe uma fuga, existe a tendência a criar-se uma acumulação nas zonas mais altas de um ambiente fabril fechado, como telhados, coberturas, etc.

A vantagem desta estratégia não é meramente obter uma segurança acrescida, mas também obter uma potencial redução de custos, não tendo a necessidade em alguns casos de recorrer a equipamentos certificados para atmosferas explosivas, cujo custo é muito superior.

A desclassificação de uma determinada zona possibilita a redução da exigência dos requisitos de proteção dos equipamentos a instalar, com reflexos positivos nos custos de instalação e manutenção.

O recurso a um sistema de ventilação com certificação ATEX, tal como os utilizados em aplicações com hidrogénio, é por isso, um investimento a considerar que pode ter um retorno significativo ao permitir a otimização dos requisitos de outros equipamentos.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

São, por isso, recomendáveis métodos de ventilação passiva, recorrendo a aberturas naturais de ventilação nos telhados, que correspondem aos pontos de acumulação do hidrogénio, impedindo atingir uma concentração elevada do mesmo em caso de fuga. Tendo implementado um sistema de ventilação adequado, confere à instalação um nível de proteção superior contra a formação de concentrações perigosas de hidrogénio.

### Dispositivos de controlo e segurança

Tal como descrito anteriormente, os riscos em sistemas de produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio verde exigem medidas rigorosas de segurança para evitar acidentes graves.

Para garantir a segurança em todo o sistema, existe um conjunto de dispositivos de controlo e segurança instalados e dimensionados, destinados a assegurar o bom funcionamento das instalações.

Entre os referidos dispositivos, destacam-se as válvulas de segurança e verificação, que desempenham um papel essencial em todo o sistema, garantindo que em nenhuma circunstância, o fluxo do hidrogénio se inverta e regresse à fonte geradora.

Além disso, as válvulas de segurança também desempenham a função de limitação de fluxo de hidrogénio em excesso, caso este ultrapasse os patamares definidos, limitando ou interrompendo automaticamente a sua circulação.

Estas válvulas são particularmente importantes em situações em que ocorra uma fuga de uma linha de distribuição, tendo a capacidade de isolar o segmento em defeito e evitar a extensão da fuga.

As válvulas de segurança também têm a função da limitação da pressão no sistema, estando devidamente calibradas para não permitir que a pressão interna das condutas não exceda um determinado valor.

Para garantir uma proteção adicional, devem ser instaladas válvulas retentoras de detonação em diversos pontos do sistema, particularmente importantes para evitar efeitos indesejados de detonação no sistema.

Complementando as válvulas de segurança, é importante também o recurso a manómetros de pressão e fluxo, que se tratam de dispositivos calibrados, dotados de uma escala, que indicam visualmente a pressão em diferentes pontos do sistema, permitindo aos operadores controlarem os valores nominais de funcionamento em tempo real, (Columbia University, 2020).

**Figura 40: Representação de uma válvula de segurança reguladora de pressão**



Fonte: Neto, 2025

### Procedimentos de segurança

No sentido de assegurar uma operação eficaz da instalação e garantir a segurança da mesma no que respeita a pessoas e bens, devem ser estabelecidos determinados procedimentos de segurança, essenciais para assegurar que todas as normas e legislação aplicável estejam a ser respeitadas.

Complementarmente às referidas normas, devem ser cumpridas todas as regras de segurança implementadas pela empresa e recomendadas pelos fabricantes dos equipamentos, atendendo às boas práticas nas operações com o hidrogénio verde, que embora possam estar omissas na legislação, que ainda apresenta as suas lacunas, não deixam de ser essenciais para uma atividade segura.

A elaboração dos referidos procedimentos de segurança relativa às operações com hidrogénio verde, dada a ainda imaturidade da tecnologia e consequentemente de legislação não muito detalhada, representa um esforço suplementar na sua concretização.

Neste caso, toda a equipa da segurança, operadores e representantes dos fabricantes dos equipamentos deverão ser envolvidos, conforme diretrizes da ISO 45001:2018, (ISO Standards, 2018), de forma a considerar todas as particularidades de cada fábrica, indústria, ou atividade, tomando em consideração elementos como a sua localização geográfica, meteorologia, ambiente envolvente, entre outros fatores que possam influenciar aspetos de segurança na sua operação.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Assim, torna-se essencial complementar as normas e regulamentos em vigor e ir além do existente, estabelecendo procedimentos específicos, e a partilha de conhecimentos de todas as partes intervenientes no processo.

No entanto, o “input” introduzido por cada uma das partes não poderá resultar em procedimentos demasiado complexos e difíceis de implementar, que se tornam difíceis de transmitir aos operadores, e que por isso, nem sempre se traduzem em maior segurança para a operação.

Neste sentido, deverá existir o cuidado de elaborar procedimentos claros, práticos, concisos e objetivos para serem facilmente interpretados pelos intervenientes, recorrendo a fluxogramas, imagens ou outro tipo de auxiliares visuais, possibilitando assim uma boa compreensão do seu conteúdo.

É importante que as instruções sejam bem compreendidas, e como tal, deverão ser promovidas ações de formação periódicas para a boa compreensão e consolidação do seu conteúdo, para minimizar a possibilidade de os trabalhadores contornarem as regras ou negligenciarem determinadas partes dos procedimentos.

Com a introdução destes procedimentos, existe ainda um trabalho de sensibilização para os intervenientes, onde se deve esclarecer todos os temas relacionados com a segurança na operação da central de produção de hidrogénio verde, e reforçar que todos devem ter a consciência de todos os perigos envolvidos nesta atividade, e que tal representa um esforço suplementar para garantir a segurança de todos como um bem comum, conforme previsto na ISO 45001:2018, (ISO Standard, 2018).

Para garantir uma segurança eficaz é também necessário manter atualizações periódicas dos respetivos procedimentos, ou sempre que houver algum fator que introduza uma nova variável, uma mudança de equipamento, ou sempre que se justifique por diversos fatores.

As referidas alterações ou atualizações deverão ser efetuadas apenas por técnicos devidamente autorizados e com formação para esse efeito, com uma hierarquia de aprovações devidamente identificada, antes da nova versão passar a efetiva.

Estas alterações devem ser sempre discutidas com todos os intervenientes, envolvendo os respetivos fabricantes dos equipamentos, não devendo ser permitidas quaisquer modificações aos procedimentos sem este ciclo de envolvimento dos intervenientes e da hierarquia de aprovações.

A segurança da equipa deverá ser sempre uma prioridade, particularmente na presença de atmosferas perigosas, devendo ser incutida aos intervenientes a responsabilidade de qualquer elemento da equipa de alertar ou mesmo suspender atividades, se perceber uma

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

violação dos procedimentos de segurança implementados, sendo esta conduta considerada uma medida proativa de prevenção.

Todos os intervenientes deverão ter sempre presente que a segurança nunca poderá ser colocada em causa, independentemente da sua posição hierárquica na organização.

Será essencial que todos os intervenientes sejam conhecedores e estejam de acordo com os procedimentos estabelecidos, permitindo um intercâmbio de ajudas e perceções e possibilitem uma coordenação eficaz entre todas as equipas, pois cada indivíduo será responsável não apenas por sua própria segurança, mas também pela segurança de todos os membros da equipa, de acordo com as cláusulas 5.4 e 7.4 da ISO 45001:2018, (ISO Standards, 2018).

Uma exposição desnecessária ou inconsciente a um determinado perigo, poderá implicar consequências não só para o indivíduo em questão, mas também para os restantes membros da equipa, que eventualmente também se iriam expor aos mesmos riscos para o socorrer numa emergência.

A utilização de impressos tipo “*checklists*” poderá representar uma ferramenta de muita utilidade nas operações com hidrogénio verde. Este tipo de documento, constitui um auxiliar para qualquer interveniente, elencando de uma forma lógica e sequencial os corretos procedimentos de verificações de segurança e operação com o sistema, advertindo-o ao mesmo tempo para determinadas situações às quais deverá ter particular atenção.

Através das “*checklists*”, poderão ser também planeadas atividades antecipadamente, servindo de guia para uma correta operação diária, contribuindo decisivamente para minimizar eventuais riscos durante a operação, maximizando a segurança de todos os intervenientes.

Previamente a qualquer operação, deverão ser atribuídas funções e responsabilidades a cada interveniente, devendo deixar bem claro a todos, quais são as suas obrigações, responsabilidades, e respetivas ações a tomar em caso de emergência, garantido que essa resposta seja o mais eficaz e imediata possível.

No caso de ocorrência de uma emergência, é fundamental haver um controlo dos participantes, contabilizando todos os intervenientes na ocorrência, garantindo a segurança de todos e comprovando que não houve consequências para nenhum elemento das equipas.

Essa função deve ser atribuída a um elemento externo à zona de operações e fora das zonas de risco, que tenha a função de controlar e monitorizar a segurança de toda a operação, enquanto outros elementos executam as tarefas que envolvem estar expostos a fatores de perigo.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Cabe a estes elementos, o papel de assegurar a segurança de todas as equipas operacionais, emitindo alertas e tomando as primeiras providências para socorro imediato em caso de acidente, de acordo com os procedimentos de emergência implementados.

Em diversos locais devem estar afixados e bem visíveis os número de contacto direto com os meios de emergência e bombeiros para um contato imediato.

Todos os intervenientes devem ser inteiramente conhecedores dos potenciais perigos ou acidentes que podem ocorrer. Esta informação deve ser afixada e disponibilizada através de meios informáticos, folhas informativas, além das formações periódicas que os trabalhadores deverão frequentar.

Os requisitos e procedimentos de segurança deverão ser também revistos periodicamente e atualizados sempre que necessário, com base em alterações na legislação ou nos resultados das inspeções e manutenção e simulacros, (Atlas Copco, 2023).

### Procedimentos em caso de fugas

Durante a sua operação, as condutas, vedantes e todos os equipamentos constituintes do sistema estão sujeitos a variações de pressão e temperatura, resultando na dilatação e contração dos mesmos, podendo a longo prazo dar origem ao aparecimento de fugas de hidrogénio.

Por conseguinte, é necessário realizar inspeções periódicas ao sistema completo para testar possíveis fugas, possíveis devido à reduzida dimensão das moléculas do hidrogénio, que potencializa as referidas fugas através de microfissuras, no próprio material ou através de juntas e vedantes.

Estas inspeções devem ser realizadas recorrendo a nitrogénio gasoso ou outro gás inerte, em alternativa ao uso de hidrogénio, pois estes não representam qualquer risco de inflamação nesta operação, (Atlas Copco, 2023).

No caso de se verificar uma fuga, devem estar implementados procedimentos de diagnóstico, com orientações claras para uma abordagem estruturada e objetiva, a fim de determinar corretamente todos os fatores de risco envolvidos e avaliar a situação com rigor, para ser possível aplicar as medidas corretivas mais adequadas e salvaguardar de imediato a segurança de pessoas e bens.

Os procedimentos de atuação em caso de emergência devem por isso seguir protocolos bem definidos, e bem assimilados pelas equipas de intervenção, que devem dar como prioridade à contenção imediata do foco de incêndio ou da fuga.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Para esse efeito, é necessário recorrer a equipamentos de diagnóstico e de deteção portáteis para identificar fugas e eventuais chamas, que poderão não ser perceptíveis de imediato, pois de acordo com as propriedades do hidrogénio, a sua chama além de libertar pouco calor, também é incolor, dificultando ainda mais a sua deteção.

Os equipamentos de diagnóstico com sensores óticos e térmicos permitem identificar de uma forma eficaz os pontos da instalação onde se verificam esses focos de perigo, e direcionar os meios de intervenção de emergência, (Columbia University, 2020).

Para que o sistema de segurança implementado seja eficaz em termos preventivos, é importante que sejam instalados conjuntos dos referidos sensores de deteção de fuga e chama em diversos pontos do sistema, e integrá-los em sistemas de monitorização contínua, reforçando a capacidade de resposta e mitigação de potenciais incidentes.

No caso de ser detetada uma fuga, deve-se manter ligada a ventilação para extrair e diminuir a concentração de hidrogénio. Em ambientes fechados, onde há maior risco de acumulação de hidrogénio, o sistema de deteção de fugas deve ser dotado alarmes visuais e sonoros que alertem o pessoal no local sempre que o ambiente se torne inseguro.

Por outro lado, também a instalação deve estar devidamente equipada com conjuntos de dispositivos de segurança e de controlo automático, elétricos, eletrónicos ou mecânicos, que operam em simultâneo, assegurando o bom funcionamento da instalação em segurança, (Neves et al., 2023).

Estes conjuntos de dispositivos de controlo e segurança, também por sua vez, devem ser monitorizados e controlados em tempo real pelo sistema de gestão global da instalação, tendo a capacidade de operar de imediato, caso o sistema identifique um possível defeito, ou por ordem direta dos operadores. A sua operação possibilita a interrupção do fluxo de hidrogénio, seccionando de imediato a parte da instalação em defeito.

Os sensores e dispositivos de segurança deverão ser dotados de redundância, ou seja, no caso de avaria de um deles, são automaticamente sobrepostos na sua função por um outro que o substitui na mesma operação.

O modo de operação descrito caracteriza-se por uma solução eficiente, que garante a continuidade operacional e a proteção contra eventuais falhas, sendo particularmente relevante para sistemas que envolvem o uso de hidrogénio, onde é prática comum a utilização de dois conjuntos de válvulas, incluindo válvula manual, válvula pneumática, válvula reguladora de pressão e válvula de alívio de pressão, (Buttner, 2024).

### Equipamento de proteção individual

Para assegurar a proteção individual dos trabalhadores nas instalações que operam com hidrogénio, devem ser adotadas medidas de controlo de exposição dos intervenientes, sendo obrigatório o uso capacete, de óculos de proteção, luvas protetoras, máscara adequada para ambientes com presença de gases e fato completo isolante e ignífugo, sobretudo para os trabalhadores que frequentam zonas próximas de locais com sistemas pressurizados e com risco de explosão ou incêndio.

No caso de se tratarem de zonas de armazenamento de hidrogénio líquido, atendendo às temperaturas de operação extremamente baixas, as medidas de proteção aplicadas devem ser ainda mais restritas, incluindo o uso de fatos completos com luvas isolantes do frio, óculos de proteção mais envolventes contra salpicos, dispositivos de lavagem ocular para uma resposta rápida em casos de exposição e chuveiros de emergência para neutralizar contaminações, (Columbia University, 2020).

Além da disponibilização desses equipamentos, é essencial que os colaboradores sejam instruídos sobre os procedimentos corretos de utilização, garantindo que cada item seja usado adequadamente para garantir uma proteção eficaz.

Complementarmente, a sensibilização contínua na utilização de EPI's é uma ferramenta fundamental para reforçar a importância da segurança no ambiente de trabalho. Para isso, a empresa pode exibir autocolantes e decalques nos pontos de entrada, incentivando os colaboradores a usar seus EPI e lembrando-os da necessidade de seguir as medidas de segurança para a sua própria proteção, (Atlas Copco, 2023).

### Controlo das fontes de ignição

Uma forma de minimizar o risco de incêndio ou explosão devido a uma fuga de hidrogénio é de controlar as possíveis fontes de ignição que possam originar a sua inflamação. Assim, todos os processos e equipamentos em áreas de trabalho de hidrogénio, devem ter precauções quanto à presença de:

- Fontes de energia elétrica, tomadas e dispositivos capazes de gerar arcos elétricos;
- Pontos possíveis de eletricidade estática ou carga elétrica residual, proveniente de equipamentos operacionais;
- Componentes ou equipamento mecânico onde se desenvolva fricção ou impacto;
- Fontes térmicas, como chamas, superfícies quentes ou sistemas de escape de máquinas;
- Fontes químicas que possam inflamar o hidrogénio;(Schneider et al., 2023)

### Métodos de deteção de fugas de hidrogénio

Conforme referido anteriormente, devido às reduzidas dimensões da molécula de hidrogénio, torna-se um risco acrescido a dificuldade em garantir a estanquicidade de todo o sistema, e consequentemente, garantir que as concentrações de hidrogénio não excedam níveis limite de segurança. Para tal, será importante detetar qualquer fuga no primeiro instante que ocorrer, (NREL, 2022).

Neste sentido, deverão ser implementados sistemas de deteção de fugas no sistema de hidrogénio em diversos pontos definidos. Os sistemas de deteção de fugas têm a função de sinalizar e atuar sobre os órgãos de segurança que automaticamente desliguem e coloquem em segurança a infraestrutura de hidrogénio no caso de ser detetada uma fuga em qualquer segmento da instalação.

Os sensores de deteção de hidrogénio devem ser posicionados em locais estratégicos, como próximo das tubagens e nos pontos mais altos do teto, onde o gás se pode concentrar, (Buttner, 2024).

Os sistemas de monitorização que recolhem os dados e sinalizações provenientes dos diversos detetores e sensores de medida, recebendo valores de pressões, caudais, temperaturas, de posição das válvulas, concentrações de hidrogénio e interpretam estes valores, e através de algoritmos internos detetam anomalias quando se verificam desvios nos valores recolhidos em cada uma destas variáveis.

O sistema de monitorização deve ter a capacidade de poder interpretar toda essa informação, identificando de forma automática o tipo de defeito, o local da instalação onde se verifica e despoletar um conjunto de ações, dependentes do nível de gravidade.

Este tipo de ações podem ser a emissão um simples alerta visual e sonoro, informando automaticamente os operadores qual o tipo de gás envolvido, e quais os procedimentos a adotar, como também pode operar autonomamente as válvulas de segurança automáticas que permitam estancar o defeito e colocar a instalação em segurança, (Columbia University, 2020).

Sucintamente, pode-se compilar algumas das regras principais de segurança a tomar em consideração, nas operações com o hidrogénio verde:

- Garantir distâncias mínimas seguras em relação a vias públicas, transformadores, redes elétricas e materiais combustíveis;
- Os locais de implantação do sistema devem ser bem ventilados, secos e isolados de materiais corrosivos, além de contar com um piso horizontal e resistente ao fogo;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- A estrutura deve permitir a dissipação segura de gás, devendo os tetos serem inclinados e permitirem a dissipação para o exterior;
- O acesso às instalações deve ser restrito apenas a pessoas devidamente formadas e qualificadas;
- As vias de acesso devem estar sempre desimpedidas para circulação eficiente de pessoas, assegurando uma evacuação rápida em caso de emergência;
- As vias de evacuação devem estar devidamente assinaladas e bem visíveis a todos;
- Todos os equipamentos elétricos, como tomadas, lâmpadas, interruptores, e todos os equipamentos constituintes do sistema devem ser à prova de explosão e adequados para ambientes ATEX, para evitar riscos acrescidos, conforme descrito no ponto 1.5 da Diretiva ATEX 2014/34/UE, (Parlamento Europeu, 2014);
- Todos os dispositivos que não sejam estritamente essenciais para o bom funcionamento do sistema devem ser instalados a uma distância segura para não representarem um risco de ignição no caso de fugas;
- Para reforçar a segurança no ambiente, toda a sinalização deve ser perfeitamente adequada, clara, visível e em número suficiente, incluindo alertas explícitos como “Proibido fumar, provocar faíscas ou chamas”, minimizando riscos de incêndios e explosões;
- Quaisquer reparações ou ações de manutenção em qualquer componente ou segmento da instalação devem ser realizados preferencialmente com essa parte da instalação devidamente consignada e fora de serviço;
- Se necessário, deve-se recorrer aos fabricantes dos equipamentos, para qualquer intervenção que não esteja prevista na manutenção normal;
- Nas proximidades do sistema, o capacete de proteção deve estar sempre colocado, e não deve ser removido;
- Devem ser instalados reguladores de pressão para garantir que as pressões internas do sistema estão sempre controladas dentro dos limites estipulados;
- Tipicamente, em situações em que a fuga de hidrogénio não pode ser contida, deverá ser seccionado o segmento da instalação onde se verifica a fuga através de válvulas de seccionamento de segurança. Somente após a contenção completa da secção onde se verifica a fuga, é que se poderá dar início a uma intervenção direta;
- Instalar conjuntos de detetores de hidrogénio em espaços fechados, alertando de imediato e de forma automática a presença de fugas;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Monitorizar em permanência as pressões internas das tubagens e os respetivos caudais para alterações de pressão resultantes de fugas;
- Instalar detetores de hidrogénio nas proximidades das tubagens, juntas e vedantes, e nos pontos mais altos do teto onde o hidrogénio se pode acumular.

### Espaços confinados

De acordo com o ACT ou Autoridade para as Condições de Trabalho, um espaço confinado é “(...) qualquer local com aberturas limitadas de entrada e saída, com ventilação natural desfavorável e níveis deficientes de oxigénio, podendo conter ou produzir contaminantes químicos tóxicos ou inflamáveis e que não está concebido para uma ocupação contínua por trabalhadores (...)”, (ACT, 2012).

Ainda de acordo com o estipulado pelo ACT, existem “(...) dois tipos de espaços confinados:

- *espaço confinado fechado* - caracteriza-se por não ser concebido para uma ocupação humana permanente, por ter frequentemente dimensões reduzidas, por possuir vias de acesso estreitas e por permitir a entrada/saída de apenas um trabalhador de cada vez.
- *espaço confinado aberto* – é um espaço que tem entradas e saídas sem condicionantes e com facilidade de acessos a pessoas e máquinas, mas que, face à existência de substâncias perigosas, às dificuldades de ventilação natural, à sua configuração, à sua extensão, à natureza dos trabalhos, ao tipo de equipamentos utilizados, comporta riscos elevados para o trabalhador (...)”, (ACT, 2012).

Espaços confinados são caracterizados pela sua natureza insegura e imprevisível, sendo que implica cuidados acrescidos para o seu acesso. Neste âmbito, deverá ser assegurada a presença de hidrogénio no seu interior através de equipamento de monitorização de oxigénio e hidrogénio.

Qualquer atividade no interior de um espaço confinado, representa um risco acrescido e deve estar a ser monitorizado em permanência, pois repentinamente pode ocorrer uma fuga que altere as condições de segurança dessa zona em particular.

Deverão estar implementados sensores específicos previamente instalados nesses locais, para detetar gases na atmosfera, sendo essenciais para avaliar o nível de segurança que um determinado espaço ou segmento da instalação apresenta para poder ser acedido, e se representa perigo para pessoas, (Neves, 2023).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Como recomendação, qualquer espaço ou local da instalação que possa ser considerado como um espaço confinado, deverá ser apenas acedido por pessoal qualificado e adequadamente identificado através de sinalética visual e luminosa, advertindo para os potenciais perigos envolvidos.

Atendendo a que a segurança dentro destes espaços confinados não é garantida, estes devem ser sujeitos a uma análise de risco cuidada e deverão existir procedimentos específicos de atuação perante este tipo de ambientes, nomeadamente a necessidade de autorização formal e controlada para entrada de pessoal qualificado no seu interior.

Considerações gerais sobre espaços confinados:

- Inseguros e imprevisíveis;
- Necessidade de monitorização permanente;
- As condições no interior de espaço confinado podem mudar repentinamente;
- Riscos elevados no seu interior;
- Deve ser feita uma análise de risco para estes espaços;
- Recorrer a detetores de hidrogénio portáteis antes de entrar no espaço;
- Deve ser elaborado um plano de controlo de riscos com procedimentos específicos para este tipo de espaços.;
- O acesso a estes espaços deve carecer de uma autorização prévia;
- Estes espaços devem ser restritos e dotados de sinalética e sinalização advertindo dos perigos existentes na sua proximidade;
- Embora alguns espaços exteriores não se enquadrem na definição de espaço confinado, podem requerer os mesmos procedimentos de segurança e cuidados que são estipulados para os espaços confinados.

### Reguladores de pressão

Os reguladores de redução de pressão têm a função de regular com segurança a pressão interna de hidrogénio em determinadas zonas da infraestrutura das condutas. Geralmente, são utilizados reguladores de duas fases, equipados com dispositivos de monitorização que indicam a pressão do sistema antes e depois da regulação.

Estes reguladores estão tipicamente dotados de dispositivos de segurança que protegem os reguladores de pressão, caso estes excedam as pressões nominais previstas, (Columbia University, 2020).

### Planeamento de resposta a emergências

Para fazer face a emergências, devem ser implementados um conjunto de procedimentos, alinhados com as políticas ambientais e de segurança da empresa, que contemplem um plano elaborado conjuntamente com as autoridades e instituições de emergência locais para dar resposta a acidentes, tais como incêndios, explosões e eventuais fugas de hidrogénio.

O plano de emergência deve estar sempre atualizado e em conformidade com as normas e regulamentos de segurança aplicáveis e em vigor.

Estes procedimentos devem estar bem consolidados em todos os trabalhadores, transversalmente a toda a empresa, sendo, por isso, necessárias sessões de formação adequadas a todos os intervenientes no processo, acerca do referido plano, assim como uma formação detalhada com recurso a simulacros sobre os procedimentos de resposta a emergências.

Alinhado com as diretrizes da ISO 45001:2018, (ISO Standards, 2018), os simulacros de treino deverão ser realizados periodicamente e frequentemente, não só para aferir a eficácia do plano de resposta a emergências como também para avaliar a compreensão e preparação dos trabalhadores, assim como a eficácia e adequabilidade das formações que foram promovidas até então.

Mediante estes resultados deverá ser avaliada a necessidade ou não de implementar medidas de segurança adicionais, ou de promover novas ações de formação e de sensibilização.

Os procedimentos de emergência em caso de acidente ou de libertação de hidrogénio deverão dar indicações claras e objetivas acerca dos procedimentos de evacuação, percurso a seguir, zonas de agrupamento e quais as ações a tomar para minimizar o impacto do incidente nas pessoas e instalação.

O primeiro objetivo dos procedimentos de segurança e de resposta a emergências é garantir a segurança dos trabalhadores e das vidas humanas, sendo esta a sua maior prioridade, pelo que estes procedimentos devem sempre ter em vista mantê-los em segurança e garantir que todos os perigos a que possam estar sujeitos estão devidamente identificados e acautelados, minimizando esses riscos, mas também protegê-los em caso de emergência, em situações que as medidas preventivas implementadas falhem.

### Formação e simulacros

Em qualquer contexto relativo ao tema de segurança, a promoção de ações de formação contínuas acerca dos corretos procedimentos a adotar em caso de acidente ou em emergência é fundamental para minimizar os impactos que tal ocorrência possa causar.

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

Estas ações de formação deverão ser complementadas pela realização de simulacros para avaliar e comprovar a eficácia das medidas preventivas implementadas, avaliar a reação e o conhecimento de todos os intervenientes sobre os procedimentos de emergência implementados, assim como a adequação dos sistemas de segurança e funcionamento dos equipamentos instalados, (ISO Standards, 2018).

Devido às características muito específicas do hidrogénio, os operacionais e as equipas de intervenção devem ser instruídos adequadamente com conhecimentos técnicos detalhados acerca dos riscos envolvidos, consequências de possíveis acidentes e sobretudo acerca das medidas preventivas e dos procedimentos a adotar em caso de emergência.

As referidas ações de segurança devem transmitir as informações necessárias de uma forma clara, concisa e objetiva, sem possibilidade de ocorrerem diferentes interpretações. Devem ainda garantir que os intervenientes compreendem e assimilam todos os protocolos de segurança, e que conseguem colocá-los em prática.

As ações de formação em aplicações com hidrogénio verde assumem uma importância acrescida, e devem por isso, ser realizadas com uma elevada frequência, a fim de promover hábitos de segurança entre os trabalhadores e o reconhecimento por parte destes sobre a importância dos aspetos de segurança e do cumprimento rigoroso das regras e procedimentos, (Atlas Copco, 2023).

Os simulacros por sua vez, permitem testar em condições o mais próximas de situações reais possível, qual o comportamento e eficácia dos Sistemas de Gestão de Prevenção de Acidentes implementado na organização. Nestes se incluem a avaliação da capacidade de resposta das equipas simulando fugas de hidrogénio, ou situações de incêndio, envolvendo também meios de emergência externos à organização, (Cate et al., 2023).

Estes simulacros deverão ser efetuados com uma periodicidade mínima, de acordo um programa definido, e de acordo com os resultados obtidos em cada avaliação, deverá ser ponderada a necessidade de reforçar as formações e aumentar a frequência de determinadas medidas, caso estas representem alguma suspeita de uma potencial anomalia.

### **Segurança elétrica**

Dada a necessidade de isolar qualquer potencial fonte de ignição da presença de ambientes com possível presença de hidrogénio, é fundamental garantir que todos os equipamentos e sistemas relacionados com a segurança elétrica são concebidos e instalados de acordo com as normas de segurança relevantes.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Neste caso, a seleção dos equipamentos elétricos a implementar no sistema é de extrema importância pois estes devem ser certificados para operação em ambientes explosivos, não potenciando arcos elétricos ou faíscas, ou até mesmo operação a temperaturas elevadas que possam causar risco para a instalação, (Atlas Copco, 2023).

Por outro lado, a instalação deve ser dimensionada de forma a garantir que está devidamente protegida em termos elétricos para a eventualidade de qualquer defeito desta natureza, isolando convenientemente qualquer defeito que possa ocorrer de uma forma rápida e eficaz, prevenindo qualquer foco de incêndio ou surgimento de arcos elétricos que possam resultar numa fonte de ignição, de acordo com as diretrizes ATEX, (Parlamento Europeu, 2014).

Por outro lado, devem tomar-se precauções na utilização de motores com escovas e outro tipo de aparelhos de corte que são suscetíveis de criar os referidos arcos elétricos, (Columbia University, 2023).

Estes equipamentos, assim como toda a cablagem e restante instalação elétrica no seu todo, devem ser alvo de inspeções e manutenções periódicas e frequentes, garantindo a consistência e bom funcionamento e adequação às normas de segurança previstas.

Deve ser prestada formação adequada aos trabalhadores, advertindo-os dos perigos relativos à presença de instalações elétricas em ambientes explosivos, neste caso, na presença de hidrogénio, e formando-os acerca dos procedimentos de operação e manutenção em segurança da instalação elétrica na presença de hidrogénio, e quais as precauções a tomar.

Estes devem estar a todo o momento capacitados para o manuseamento dos meios de combate a incêndios e emergência, com presença de fontes de energia elétricas, sendo que o primeiro passo a tomar é garantir o corte de energia elétrica e do fornecimento de hidrogénio naquela secção da instalação.

### **Inspeções e manutenção da instalação**

As ações de inspeção e manutenção das instalações são essenciais para uma operação segura de toda a infraestrutura, para minimizar os riscos associados à atividade, assegurando que estas se encontram em boas condições de operabilidade.

No caso de instalações que envolvem hidrogénio, é particularmente importante que todas as ações de manutenção, incluam inspeções rigorosas no que respeita à deteção de fugas, incluam testes de estanquicidade do sistema, testes dos sistemas automáticos de segurança, monitorização e de sistemas de proteção contra incêndios.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A realização destas manutenções e inspeções devem estar devidamente definidas em termos de tarefas a executar, mas também em termos de datas de realização, cuja frequência deverá ser ajustada em função de resultados obtidos de avaliações prévias, de necessidades detetadas ou de alterações implementadas no sistema, sempre atendendo às necessidades específicas da instalação.

Previamente às ações de manutenção e inspeção, deverão ser definidas as equipas operacionais constituídas por técnicos devidamente qualificados para o efeito, a definição das tarefas para cada equipa e atribuição de responsabilidades a cada elemento das equipas, definindo igualmente as áreas de intervenção para cada uma.

Posteriormente às referidas intervenções preventivas ou corretivas, deverão ser elaborados relatórios de manutenção e de inspeções onde são registados todos os valores de controlo medidos e tarefas executadas, sendo fundamental a manutenção destes registos para posterior análise e comparação com histórico de intervenções anteriores.

Mediante estes registos e os resultados obtidos deve ser avaliada a necessidade de introduzir alterações, medidas corretivas adicionais ou ajustar a periodicidade de determinadas tarefas de manutenção.

É importante que as equipas de manutenção e inspeção tenham formações e simulacros de segurança periódicos, para reforçar práticas seguras e procedimentos de emergência, (Atlas Copco, 2023).

Os procedimentos de segurança devem sempre garantir que todas as recomendações de segurança dos fabricantes dos equipamentos estão a ser cumpridos e integralmente transpostos para os manuais de operação e manutenção da instalação assim como para o manual de emergência, (OECD, 2023).

Previamente à implementação de medidas corretivas ou a qualquer alteração de procedimentos de operação e segurança, estes devem ser aprovados quer pelo departamento de segurança, quer pela administração e outros órgãos relevantes para as operações com o hidrogénio verde, envolvendo todos as equipas operacionais, levando a que todas as partes interessadas possam dar o seu contributo para a melhoria do funcionamento global da instalação, (Atlas Copco, 2023).

### 1.3.5. Justificação e importância do estudo

O presente estudo é importante devido à crescente relevância do hidrogénio verde como vetor energético na transição para uma economia de baixo carbono, conforme estipulado no Plano Estratégico Nacional para o Hidrogénio (Fonte: EN-H2).

O aprofundamento de conhecimentos em termos de segurança neste contexto, poderá contribuir não só para evitar potenciais acidentes e proteger pessoas e bens, mas também para viabilizar o crescimento sustentável desta tecnologia, maximizando os seus benefícios e minimizando riscos, permitindo assim, consolidar esta tecnologia como uma solução confiável e atrativa para potenciais investidores.

Um dos principais temas que terá bastante relevo neste contexto, será de garantir a segurança dessas instalações e proteger os seus intervenientes, representando um aspeto fundamental para viabilizar a sua operação sustentável.

A garantia de cumprimento das normas de segurança por parte destas instalações, assim como o cumprimento das normas ambientais aplicáveis, será essencial, permitindo fortalecer a sua posição na comunidade, promover a confiança na tecnologia, e consequentemente atrair potenciais investidores, que são essenciais para o desenvolvimento da indústria da produção de hidrogénio verde.

Existem, no entanto, alguns desafios em termos de segurança que têm de ser precavidos, que podem colocar em risco as instalações e intervenientes, impactando negativamente no meio ambiente e colocando em causa a sustentabilidade e credibilidade desta tecnologia.

É por isso importante, avaliar que tipo de sistemas de gestão de prevenção de riscos é que as empresas deste setor adotam e quais os métodos que recorrem para garantir níveis de segurança adequados para esta atividade.

É importante ainda garantir o cumprimento rigoroso das regras de segurança impostas pela legislação em vigor, não só para evitar potenciais litígios ou contraordenações, mas também prevenir acidentes graves, procurando aumentar a eficiência global deste processo.

Devido ao facto de as centrais de produção de Hidrogénio Verde representarem um número muito reduzido a nível mundial, e a tecnologia ainda se encontrar pouco evoluída, o tema da segurança neste contexto muito específico, ainda não se encontra muito detalhado, pelo que se verifica alguma escassez de informação detalhada, e legislação específica sobre este tema.

Considera-se que os resultados obtidos nesta investigação possam ser interessantes quer para as organizações que estão já envolvidas com projetos desta natureza, quer para contribuir

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

para esclarecer ou desmistificar algumas incertezas que rodeiam o tema da segurança aplicado ao contexto do Hidrogénio Verde, e potencialmente promover o desenvolvimento de novos projetos que conduzam à descarbonização da nossa sociedade em segurança.

Pelo exposto, devido à necessidade de um rápido crescimento na quantidade de instalações que operam com hidrogénio verde, é essencial uma atenção redobrada em todos os aspetos de segurança associados direta ou indiretamente a esta atividade.

Deverá ser adotada uma política de segurança preventiva em toda a cadeia de produção do hidrogénio verde para não comprometer todo o processo de evolução e crescimento desta tecnologia, e constituir um vetor energético decisivo para alcançar as metas previstas de descarbonização da economia.

O tema do hidrogénio verde tem ganho ainda mais relevância nos últimos anos perante a invasão da Ucrânia pela Rússia, que evidenciou a necessidade urgente de diversificação energética na Europa. O hidrogénio, antes visto como uma oportunidade estratégica, agora é uma solução essencial para substituir combustíveis gasosos, impulsionando novas tecnologias e investimentos.

## 2. Objetivos

### 2.1 Geral

Definiu-se como principal objetivo deste trabalho, investigar e analisar os aspetos relacionados com a segurança de trabalhadores e infraestruturas em operações de produção e armazenamento de Hidrogénio Verde em Portugal.

### 2.2 Específicos

Como objetivos específicos foram estipulados os seguintes:

1. Identificar os riscos associados às operações com Hidrogénio Verde e métodos de segurança implementados no setor;
2. Analisar Procedimentos de Segurança de empresas já envolvidas em projetos com hidrogénio verde em Portugal;
3. Identificar eventuais lacunas ou oportunidades de melhoria (Operações com Hidrogénio Verde e Legislação).

### 3. Metodologia

Uma pesquisa para ser eficaz e conduzir às respostas ambicionadas às questões inicialmente colocadas, deverá ser orientada por uma metodologia científica, que através de uma forma adequada, permita a compreensão das evidências observadas, (Bunge, 1972).

Para o desenvolvimento desta investigação, é importante considerar três etapas que a compõem, com vista à recolha de dados, e que se referem à pesquisa bibliográfica, a investigação em campo e a fase de entrevistas, que serão essenciais para se relacionarem entre si, procurando extrair uma visão completa da segurança, em contexto operacional do Hidrogénio Verde.

O momento inicial desta investigação, deverá ser a recolha de informação sobre o tema, através de uma pesquisa exaustiva de bibliografia, artigos científicos, normativas e outros documentos subordinados a este tema, e que possam contribuir para a recolha de dados que se complementem entre si.

A determinada altura, deverá ser efetuada uma investigação em campo, com o objetivo de poder relacionar a informação recolhida através da pesquisa bibliográfica, com a informação que efetivamente se pode observar em estudos de caso reais, (Boni et al., 2005).

No caso da presente investigação, trata-se de verificar em instalações de produção e armazenamento de Hidrogénio Verde em operação, as condições de segurança existentes, e como estão implementadas as diretivas de segurança, previstas nos procedimentos do sistema de gestão da segurança e a sua conformidade com a legislação.

Para o efeito, serão estabelecidos diversos contactos com alguns intervenientes em projetos de hidrogénio verde, procurando obter informações acerca do sistema de gestão de prevenção contra acidentes graves e das medidas preventivas implementadas ou previstas para a entrada em operação das instalações de produção, para obter uma perspetiva do seu grau de preparação em termos de segurança.

Esta informação será complementada com a terceira vertente desta investigação, que se refere às entrevistas semiestruturadas, com os principais intervenientes nas operações, nomeadamente elementos operacionais do sistema, responsáveis pela segurança da operação e elementos da gestão de topo, procurando ter uma visão mais abrangente desta tecnologia e das perspetivas de futuro da utilização do hidrogénio verde na organização.

### 3.1 Classificação quanto aos objetivos da pesquisa

#### 3.1.1 Pesquisa exploratório-descritiva

Quanto aos objetivos da pesquisa, esta investigação pode classificar-se Exploratório- Descritiva e Não Participante, pois não só promove a abertura do investigador a todas as suas descobertas no âmbito das suas observações, proporcionando uma maior familiaridade com o processo (Selltiz et al., 1965), neste caso dos aspetos de segurança relacionados com o hidrogénio verde, como também procura descrever as características deste processo, conforme referido por Gil, (2008).

Apesar de tomar como base do seu estudo, um contexto e uma pré investigação teórica, deverá manter-se atento a todos os fatores que poderão surgir no decorrer do estudo. Zikmund, (2000), refere que os estudos exploratórios são geralmente importantes para diagnosticar situações e descobrir alternativas ou novas ideias.

De acordo com as características desta investigação em concreto, a pesquisa exploratória está associada também a uma abordagem qualitativa, também se caracterizando por hipóteses pouco definidas, conforme indicado por Aaker et al., (2004).

Esta investigação será também não participante, uma vez que a observação dos processos não implica uma intervenção direta nestes, procurando minimizar a sua interferência no decorrer da observação, proporcionando ao investigador uma familiaridade mais objetiva com o processo, considerando que ainda existe pouco conhecimento sobre essa realidade específica (Vieira, 2002).

Para transformar o objeto num construto científico, torna-se necessário aprofundar o conhecimento nacional e internacional acumulado, focando a investigação nesse tema, caso não haja estudos sobre o mesmo assunto, como ocorre nas investigações exploratórias, (Minayo, 2011).

Quanto à componente descritiva, neste estudo, é também relevante a descrição das características do processo e o relacionamento entre variáveis, de acordo com afirmações de Gil, (1999), procurando descrever os processos em detalhe, (Selltiz et al., 1965).

### 3.2 Classificação quanto à natureza da pesquisa

#### 3.2.1 Pesquisa qualitativa

Creswell (2014), refere que a pesquisa qualitativa é reconhecida como sendo adequada para o estudo e compreensão de processo complexo de forma detalhada, não se baseando em

critérios numéricos para garantir a sua representatividade, conforme suportado por Minayo (2011).

No método de pesquisa qualitativa a fonte direta dos dados será o próprio contexto dos processos de produção e armazenamento de hidrogénio verde, em que o investigador é o instrumento principal, conforme referido por Bogdan e Biklen (1994).

Ao contrário da investigação quantitativa, os métodos qualitativos encaram a interação do investigador com o campo e os seus membros como parte explícita da produção do saber, em lugar de a excluírem a todo o custo, como variável interveniente. “(...) *A subjetividade do investigador e dos sujeitos estudados faz parte do processo de investigação (...)*”, (Flick, 2005, p. 6).

A adoção do método de pesquisa qualitativa é justificada pelas suas características orientadas para a exploração e a compreensão de forma detalhada dos processos em estudo, a partir dos significados atribuídos pelos próprios participantes (Creswell & Creswell, 2018).

Minayo, (2011, p. 622), refere que “(...) *as premissas para a discussão da análise qualitativa estão apresentadas em forma de decálogo, na busca de facilitar a compreensão para os que buscam se familiarizar com a abordagem qualitativa. (...)*”.

De acordo com Minayo, (2011), o fundamento principal da análise qualitativa é compreender, que se traduz pela capacidade de se colocar no lugar do outro.

De acordo com Bodgan e Biklen, (1994), o método qualitativo é caracterizado por considerar o contexto a investigar como a principal fonte dos dados e os instrumentos fundamentais do trabalho do investigador, não sendo possível dissociar o ato dos mesmos, pois comprometeria o seu significado.

O método qualitativo é adequado para a investigação dos aspetos de segurança nas operações com hidrogénio verde, pois permite investigar questões subjetivas que não podem ser quantificadas facilmente, demonstrando alguma flexibilidade para ajustar o estudo em função dos resultados atendendo ao decorrer do estudo, proporcionando uma compreensão detalhada e rica do objeto de estudo, indo além de números ou estatísticas.

Permite explorar fenómenos em profundidade, o que pode ser difícil de alcançar com métodos quantitativos. O método qualitativo baseia-se sobretudo em dados qualitativos, resultando em análises interpretativas e não quantificáveis (O’Leary, 2017).

### 3.3 Classificação quanto à escolha do objeto de estudo

#### 3.3.1 Estudo de casos múltiplos

Quanto à escolha do objeto de estudo, a investigação selecionada para este trabalho é o estudo de caso, uma vez que permite compreender com maior clareza os fenómenos individuais e, sobretudo, os processos organizacionais, sendo útil quando o objeto a ser estudado é amplo, complexo e não pode ser estudado fora do seu contexto (Yin, 2001).

A metodologia de estudo de caso tem como propósito investigar e verificar se uma determinada teoria se adequa na prática, recorrendo a recolha de informações pelos métodos da entrevista, pesquisa bibliográfica e análise documental.

A designação atribuída na classificação, Estudo de Casos múltiplos, refere-se aos estudos envolvem dois ou mais sujeitos, tal como neste caso em que temos duas instituições. Neste caso, deverão ser descritas ambas as organizações, e estabelecer comparações e associações de dados.

### 3.4 Classificação quanto à técnica de recolha de dados

#### 3.4.1 Entrevista

Como parte constituinte da investigação exploratória de campo, a realização de entrevistas também será uma ferramenta importante de recolha de informações relevantes para a investigação.

Através destas entrevistas, pretende-se complementar as informações recolhidas pela pesquisa bibliográfica e através da observação em campo. Haguette (1997, p. 86) define uma entrevista como sendo como um “(...) *processo de interação social entre duas pessoas na qual uma delas, o entrevistador, tem por objetivo a obtenção de informações por parte do outro, o entrevistado (...)*”.

A entrevista aos intervenientes no campo servirá para compreender o entendimento que estes têm acerca dos aspetos de segurança relacionados com a operação com o Hidrogénio Verde, o alinhamento das suas ações com o estipulado nos procedimentos de segurança e com a legislação, e compreender as suas necessidades e dificuldades, identificando possíveis formas de otimizar ou prestar informações mais claras acerca dos aspetos de segurança relacionado com as tarefas que desenvolve.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Como fase preparatória da entrevista, será definido um conjunto de questões, que servirão de base para a elaboração de um guião, e deverá ser escolhido um entrevistado, que deverá ser familiar com o tema pesquisado.

Deverá ser ainda definida a data da entrevista, de acordo com a disponibilidade do entrevistado, devendo esta ser marcada com antecedência, para que o investigador se assegure de que será recebido, prevendo as condições necessárias para garantir ao entrevistado o segredo de suas confidências e de sua identidade e, por fim, a preparação específica que consiste em organizar a sequência lógica das questões, (Lakatos, 1996).

Neste estudo em concreto, serão definidas previamente entrevistas semiestruturadas, que se traduzem numa aproximação flexível de recolha de informações, permitindo ao investigador adaptar as perguntas conforme a entrevista se desenrola, com recurso a um guião de entrevista a ser elaborado especificamente para o efeito, (Minayo, 2014).

Este método de condução de uma entrevista permite não só abordar temas previamente definidos, mas permite igualmente desvios para novos temas que sejam considerados relevantes que possam surgir no decorrer da entrevista. A partilha de informações e conhecimentos com o objetivo de partilhar dados de um determinado tema, é evidenciado por Gómez, Flores e Jiménez (1996, p. 167).

Serão efetuados contactos com empresas e intervenientes neste setor, onde se procurará recolher toda a informação possível relativa à segurança com as operações com o Hidrogénio Verde, e finalmente relacionar os contextos de cada uma das empresas visitadas, e possivelmente reunir informação suficiente para harmonizar e otimizar algumas das oportunidades de melhoria que possam vir a ser identificadas.

De acordo com a recetividade ou interesse na divulgação de nomes ou designação social de empresas, serão ou não indicados mais ou menos detalhes acerca de cada uma das entidades, ou mesmo pessoas que possam eventualmente colaborar neste estudo.

Qualquer conteúdo disponibilizado por estas entidades terá associado um consentimento da divulgação deste mesmo conteúdo. O estudo não terá qualquer tipo de interesses comerciais e/ou financeiros, remetendo-se exclusivamente a interesses meramente académicos.

As entrevistas serão conduzidas presencialmente diretamente com os intervenientes, com uma duração prevista variável, dependendo da disponibilidade de cada entrevistado.

As entrevistas serão gravadas caso seja dado o consentimento prévio dos participantes, para posterior recolha de dados.

### 3.4.2 Observação em campo

A observação e investigação em campo será determinante para conseguir recolher informações sobre determinados aspetos da realidade neste tipo de atividade, permitindo ao investigador estar em contacto direto com os locais das operações e junto dos intervenientes do processo, permitindo identificar e recolher evidências acerca das práticas empregues por estes, e da sua concordância com o estipulado nos procedimentos e legislação em vigor. Lakatos, (1996).

Dirigir-se informalmente ao cenário de pesquisa, buscando observar os processos que nele ocorrem. É preciso ir a campo sem pretensões formais e ampliar o grau de segurança em relação à abordagem do objeto, inclusive, se possível, realizar algumas entrevistas abertas, promover o redesenho de hipóteses, pressupostos e instrumentos, buscando uma sintonia fina entre o quadro teórico e os primeiros influxos da realidade. “(...) *O olhar analítico deve acompanhar todo o percurso de aproximação do campo (...)*”, (Minayo, 2011, p. 623).

Para uma recolha de dados mais eficaz e de forma a otimizar o tempo disponível, pretende-se adotar uma Observação Sistemática e Não Participante, onde é preparado um conjunto de documentação prévio acerca dos aspetos que estão identificados e que se pretende avaliar, com o recurso de “*checklists*” ou outros documentos que permitam facilitar a observação e a recolha de dados, sem tomar parte no processo agindo com um espectador, conforme previsto por Lakatos (1999, p. 92).

Gil (1999, p.100) afirma que, a observação é um “(...) *elemento fundamental para a pesquisa (...) chega a ser mesmo considerada como método de investigação (...)*”, que se baseia numa recolha de informações e utiliza os sentidos na perceção de determinados aspetos da realidade observada, não se limitando apenas em ver e ouvir, mas também em estudar os processos que se quer estudar.

Marconi et al. (1999), referem ainda que a abrangência dos fenómenos, a facilidade de aplicação e a não dependência de introspeção, constituem vantagens da observação.

Ainda Gil (1999), considera que na observação simples, o investigador assume um papel de mero observador, não interferindo no processo, sendo considerado por isso, não participante.

O observador “(...) *presencia o facto, mas não participa dele; não se deixa envolver pelas situações; faz mais o papel de espectador (...)*”. (Lakatos, 1999, p. 92). Já Marconi et al., (1999), referem que a eficácia na recolha de dados depende das características do próprio observador.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

No caso deste estudo em particular, a investigação em campo consistirá em visitas às instalações de uma ou mais empresas envolvidas em projetos de hidrogénio verde e que pretendem ampliar e investir num reforço de capacidade de produção de hidrogénio verde.

Será importante também verificar a existência de mecanismos ou software de monitorização contínuo da operação e a certificação dos equipamentos utilizados, (IPHE, 2024) e (Diário da República, 2025a).

### 3.4.3 Pesquisa bibliográfica

De uma forma abreviada, a pesquisa bibliográfica é uma síntese e compilação de trabalhos científicos realizados sobre esta temática, disponibilizando informação complementar e relevante. Nesta investigação são utilizados artigos científicos, livros, recursos online, legislação e normativas aplicáveis. Esta pesquisa complementa a pesquisa exploratória no campo, conforme descrito por Luna, (1999).

Gil (2002) afirma sobre a pesquisa bibliográfica *"(...) embora em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho dessa natureza, há pesquisas desenvolvidas exclusivamente a partir de fontes bibliográficas (...)"*.

Para Pizzani et al. (2012), a pesquisa bibliográfica pode ser entendida como *"(...) a revisão de literatura sobre as principais teorias que norteiam o trabalho científico"* e o levantamento bibliográfico pode ser realizado *"(...) em livros, periódicos, artigo de jornais, sites da Internet entre outras fontes (...)"*.

## 3.5 Classificação quanto à técnica de análise de dados

### 3.5.1 Análise de conteúdo

A análise do conteúdo associado ao Método Qualitativo é utilizada nesta investigação seguindo as etapas previstas nesta técnica. A primeira etapa é a pré-análise, observação e organização dos dados recolhidos, classificando-os por relevância quanto ao tema em estudo e por validade, descartando a informação, ou parte da informação que não contribui para o estudo propriamente dito.

Esta análise aplica-se à pesquisa bibliográfica, aos registos obtidos na investigação de campo, assim como aos relatos obtidos pelas entrevistas, cuja informação relevante deverá ser

filtrada, para ser utilizada nos resultados da investigação, correspondente à fase da codificação, (Bardin, 1977).

Por fim, a informação resultante será compilada e servirá para proceder à fase de interpretação e extrair as respostas às questões levantadas no início da investigação e tecer as conclusões finais do estudo, de acordo com o método definido por Bardin, (2016). Esta autora refere ainda que “(...) *as diferentes fases da análise de conteúdo (...) organizam-se em torno de três pólos cronológicos: a pré-análise; a exploração do material; o tratamento dos resultados, a inferência e a interpretação, (...)*”, (Bardin, 1977, p.95).

Valle et al. (2023, p.21) referem que “(...) *A análise de conteúdo, na perspectiva de Bardin, oferece várias contribuições importantes para a pesquisa qualitativa (...) incluindo uma análise sistemática e rigorosa dos dados (...), uma compreensão mais profunda dos fenómenos estudados, uma abordagem flexível e adaptável à possibilidade de identificação de lacunas na literatura e a triangulação dos dados. (...)*”.

### 3.5.2 Triangulação na análise

Para relacionar a informação recolhida através da pesquisa documental da observação em campo e das entrevistas, minimizar a sua subjetividade, e validar a veracidade e objetividade das informações entre si, será adotada a técnica da triangulação, através da combinação dos referidos três instrumentos de pesquisa utilizados nesta investigação.

O método da triangulação cruza os três métodos de recolha de dados utilizados, mencionados anteriormente, com o objetivo de reconhecer a sua validade e integridade, desde que se verifique consistência entre eles.

Para o método qualitativo, a validação dos dados através da técnica da triangulação é importante, na medida em que retira uma parte considerável da subjetividade das informações recolhidas, garantido assim a sua eficácia. O grau máximo de consistência será atingido sempre que uma determinada informação é confirmada pelos três métodos simultaneamente, (Duarte, 2009).

### 4. Análise de resultados e discussão

#### 4.1 Estudo de caso – Bondalti

##### 4.1.1 Caracterização da empresa

A Bondalti é o maior produtor português e um dos principais operadores ibéricos no setor de químicos industriais, com unidades fabris em Portugal (Estarreja) e Espanha (Torrelavega), destinadas a satisfazer um conjunto alargado de clientes no mercado nacional e internacional, exportando cerca de 90% do que produz.

Sucessora da Companhia União Fabril (CUF), que remonta ao ano de 1898, tendo mais de um século de história, destaca-se pela adaptação e inovação ao longo de diferentes contextos políticos e económicos. Mais recentemente, em 2009, a CUF expandiu o Complexo Químico de Estarreja, investindo 125 milhões de euros, duplicando a produção de anilina e posicionando-se entre as principais empresas do setor químico da Península Ibérica.

Em 2018, a empresa adotou a marca Bondalti, refletindo um reposicionamento estratégico focado em crescimento, inovação e internacionalização. Esse movimento consolidou sua liderança na produção de anilina e nitrobenzeno, além de viabilizar a expansão para o mercado ibérico de cloro, com a aquisição de uma unidade fabril em Cantábria, Espanha.

Em 2020, a Bondalti diversificou suas operações ao entrar no setor de tratamento e reciclagem de águas, adquirindo participação na “*Enkrott*”, empresa líder em Portugal. No mesmo ano, iniciou uma nova fase na transição energética, apostando em energias renováveis, como hidrogénio e lítio, alinhadas aos seus objetivos de neutralidade carbónica até 2030 e climática até 2050.

Em 2023, a empresa reforçou sua presença na Espanha, inaugurando uma delegação em Madrid. Em abril, apresentou uma nova identidade visual, refletindo sua estratégia de internacionalização e descarbonização, com três divisões de negócio: “Bondalti Chemistry” (químicos industriais), “Bondalti Water” (tratamento de água) e “Bondalti Energy” (energias renováveis).

No segmento dos químicos orgânicos, a Bondalti mantém-se como líder de vendas na Europa e um dos principais produtores mundiais não integrados de anilina, utilizando tecnologia própria. É, também, o maior produtor ibérico de cloro, no segmento dos químicos inorgânicos, recorrendo à tecnologia mais sustentável e eficiente e a práticas de referência no domínio ambiental.

É igualmente especializada na área da gestão e reutilização de água, com tecnologia e capacidades de engenharia próprias, através da oferta de soluções que permitam às empresas,

indústrias e setor público, uma atuação sustentável no tratamento e na reutilização deste recurso.

Focada na produção de energias verdes, a atuação da Bondalti na área da energia pretende contribuir para o cumprimento das metas europeias em termos climáticos e energéticos, dando resposta a uma crescente procura por soluções sustentáveis no setor industrial, capitalizando o *"know-how"* acumulado ao longo de décadas no desenvolvimento de tecnologias e processos na área dos químicos industriais, com especial foco no processo de eletrólise.

A estratégia da Bondalti passa por atingir níveis de rentabilidade em linha com o mercado europeu, e estar envolvida em negócios de forte potencial de crescimento, como é o caso do hidrogénio verde, reforçando a sua liderança de mercado e pela otimização da performance operacional, (Bondalti, 2025).

### 4.1.2 Operação com hidrogénio verde

A Bondalti tem uma vasta experiência na produção de gases, entre os quais os hidrogénio. Esta inclui o hidrogénio verde na sua estratégia até 2030, visando a descarbonização das operações e o cumprimento das metas climáticas europeias. A empresa lidera dois projetos nesta área que estão em fase de desenvolvimento e licenciamento:

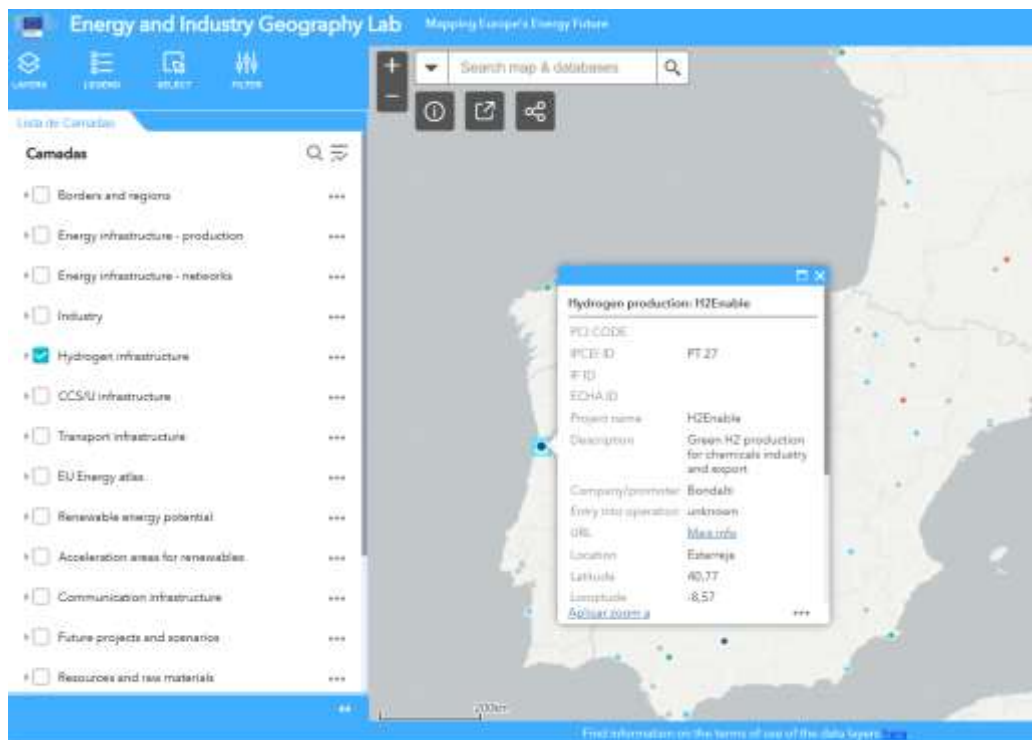
- Projeto "H2 Enable", que se refere à construção de uma infraestrutura de produção de hidrogénio verde em Estarreja para autoabastecimento e venda ao mercado, incluindo injeção na rede de gás natural e aplicação na mobilidade. Tem uma capacidade de produção instalada prevista de 40 MW de eletrólise e 5,5 quilotoneladas anuais de produção. O projeto, com 140 milhões de euros de investimento, já recebeu o estatuto de "Projeto de Interesse Europeu Comum" e financiamento do Plano de Recuperação e Resiliência.
- Projeto "Green H2 Atlantic", desenvolvido em Sines por um consórcio de 13 empresas e entidades, foi selecionado no "European Green Deal", para demonstrar a viabilidade do hidrogénio verde em larga escala. Com 100 MW de capacidade instalada, deverá entrar em operação em 2026, com um investimento superior a 150 milhões de euros, (Bondalti, 2025) e (Green H2 Atlantic, 2025).

Na figura abaixo representa-se o projeto de hidrogénio verde da Bondalti, através da ferramenta interativa "Laboratório de Geografia da Energia e da Indústria", que apresenta

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

dados geográficos relacionados com a energia, a indústria e as infraestruturas europeias. A ferramenta permite encontrar e filtrar dados relacionados com a energia, bem como criar e partilhar mapas que exibem as respetivas localizações e diversas informações.

Figura 41: Projeto de hidrogénio verde “H2Enable” da Bondalti, referenciado no mapa energético europeu



Fonte: Energy and Industry Geography Lab, 2025

### 4.1.3 Regras de segurança implementadas

Atendendo às suas obrigações legais, ambientais e no âmbito da Prevenção de Acidentes Graves, a Bondalti definiu uma Política de Segurança para o Complexo Industrial de Estarreja e instalações do Parque de Armazenamento de Aveiro que abrange a produção de hidrogénio verde. Esta política encontra-se em linha com a política da qualidade, ambiente e segurança.

Encontra-se implementado um Sistema de Gestão da Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves (SGSPAG), suportado pelo Sistema de Gestão Integrado (SGI), que:

- Descreve as funções e responsabilidades das pessoas envolvidas nos diferentes níveis da organização na gestão da segurança assim como de outros trabalhadores, incluindo subcontratados;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Identifica, avalia e gere os riscos inerentes às atividades, de modo a evitar a ocorrência de acidentes graves;
- Desenvolve e implementa procedimentos operacionais de modo a alcançar elevados níveis de desempenho operacional;
- Define metas, objetivos de controlo de riscos de acidentes graves, atividades de segurança e ambiente, monitorizando o desempenho no que respeita ao seu cumprimento;
- Assegura que as modificações sejam realizadas com base num método estruturado, minimizando os riscos associados a cada processo;
- Estabelece a resposta de emergência a situações que podem colocar em risco as instalações, os seus trabalhadores e populações vizinhas, de modo a diminuir os seus efeitos;
- Promove a formação e treino como forma de consciencializar e promover a melhoria contínua do desempenho no controlo dos perigos de acidentes graves;
- Promove a realização de auditorias sistemáticas ao grau de implementação do Sistema de Gestão da Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves;
- Prevê a realização da avaliação do Sistema de Gestão da Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves.

Assim, a Bondalti compromete-se a assegurar os meios (materiais, humanos, tecnológicos e financeiros) e estruturas adequadas, para promover a melhoria contínua do Sistema de Gestão da Prevenção de Acidentes Graves de acordo com a legislação em vigor neste âmbito, e dos princípios da Atuação Responsável, procurando uma melhoria do controlo dos riscos de acidentes graves para garantir um elevado nível de proteção, conforme requerido pelas instalações que operam com hidrogénio, (Bondalti, 2023).

### 4.1.4 Resultados da investigação em campo

Foi concedida por parte da Bondalti, a possibilidade de uma visita às instalações de produção de hidrogénio, inseridas no complexo industrial químico de Estarreja. A preocupação com os aspetos de segurança é muito evidente, pois antes de ser possível o acesso às instalações, é realizada uma formação de segurança para os visitantes, alertando-os para os potenciais perigos existentes neste complexo industrial.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Todos os que frequentam os espaços próximos das infraestruturas de produção e respetivo sistema de produção estão sujeitos a estas regras de segurança que têm como objetivo fundamental a proteção de pessoas e bens.

Nesta formação, destaca-se também todas as orientações sobre a forma correta da utilização dos equipamentos de proteção individuais, assim como se deverão interpretar os sinais de emergência, e respetivas ações que os visitantes deverão tomar para cumprir as normas de segurança estipuladas.

Foi também distribuído um folheto informativo contendo um conjunto de regras de segurança e recomendações, complementadas por instruções para atuar em caso de emergência, com os respetivos contactos a utilizar nessas situações, e respetiva planta das instalações representando os trajetos de evacuação, pontos de encontro e postos de emergência médica.

No anexo 3, encontra-se a reprodução do referido folheto informativo.

A visita abrangeu:

- Observação do sistema de monitorização, comando e controlo remoto da instalação;
- Verificação das principais grandezas monitorizadas;
- Verificação da sinalização e alertas disponibilizados pelo sistema;
- Explicação do sinótico representado a instalação;
- Alertas automáticos para as equipas de intervenção.

Uma das regras implementadas é a restrição da utilização de equipamentos eletrónicos, nomeadamente telefones ou câmaras fotográficas, ou qualquer outro dispositivo que possa ser considerado como fonte de ignição.

Foi possível visitar a unidade de produção de hidrogénio, já preparada para a produção de hidrogénio verde, onde foi possível observar o funcionamento dos grupos eletrolisadores existentes que se encontravam em operação.

O arranque da eletrólise com eletrolisadores AZEC-B1 efetivou-se em 2002, por substituição das antigas eletrólises de mercúrio, passando a totalidade da produção de cloro, hidrogénio e soda cáustica na Bondalti a ser feita usando tecnologia limpa, de membrana.

A decisão de converter a tecnologia de mercúrio, foi feita cerca de 17 anos antes de entrar em vigor a proibição de utilização de mercúrio para produção de cloro, com vista a cumprir os seus objetivos relacionados com o meio ambiente, optando sempre por aplicar e melhorar os seus processos, selecionando alternativas e tecnologias amigas do ambiente.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

A secção da eletrólise de salmoura consiste, essencialmente, de nove eletrolisadores AZEC-B1 e catorze eletrolisadores MGC23. A salmoura purificada proveniente da Secção de Tratamento de Salmoura é alimentada ao compartimento anódico, onde o cloro gasoso e a salmoura diluída são produzidos.

Por outro lado, a soda cáustica é alimentada ao compartimento do cátodo dos eletrolisadores, sob concentração controlada, de modo a produzir soda cáustica a aproximadamente 32%. Esta soda cáustica é posteriormente enviada para a instalação de Concentração de Soda.

Os nove eletrolisadores AZEC-B1, são dotados da tecnologia mais recente, estão ligados eletricamente em paralelo, sendo que estava em curso à data da visita uma remodelação progressiva das unidades eletrolisadoras. Estes são operados de uma forma autónoma, sem a necessidade da presença de operadores em permanência.

Foi possível visualizar um conjunto de válvulas de segurança próximas dos eletrolisadores controladas manualmente por ação direta de um operador, ou remotamente, de forma automática. Estas válvulas de segurança conferem o corte de abastecimento de hidrogénio, no caso de alguma anomalia detetada, ou em emergência.

Verificou-se ainda a existência de diversos equipamentos de medição e registos de dados que se encontravam diretamente ligados à Central de Comando e Controlo Central, registando um diverso conjunto de parâmetros e grandezas em tempo real.

Na nave industrial onde se encontravam os eletrolisadores, verificaram-se as excelentes condições de ventilação do local, caracterizada por coberturas muito elevadas e com a predominância de aberturas junto à mesma para permitir uma rápida dissipação de hidrogénio, no caso da ocorrência de fugas.

O local é também caracterizado por espaços abertos muito amplos, sem espaços confinados visíveis. É de salientar também a preocupação na ausência de fontes de ignição próximas da zona de implantação dos eletrolisadores ou das tubagens, nomeadamente quadros elétricos, motores, interruptores, etc.

Por outro lado, toda a sinalização luminosa existente encontrava-se totalmente encapsulada para não representar qualquer tipo de risco para a operação do sistema.

Relativamente à sinalética informativa, esta era abundante e diversa, localizada em zonas bastante visíveis em vários pontos no interior da unidade, e em todas as zonas de acesso ao seu interior, garantindo que todos os elementos que entrem no local tenham conhecimento das informações de segurança necessárias para a sua presença.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

**Figura 42: Complexo industrial da Bondalti em Estarreja**



Fonte: Bondalti, 2025

**Figura 43: Grupos eletrolisadores da Bondalti**



Fonte: Bondalti, 2025

**Figura 44: Vista superior - Eletrolisador da Bondalti**



Fonte: Bondalti, 2025

### 4.1.5 Resultados das entrevistas

Além da visita às instalações, foi possível realizar uma entrevista com o diretor da área de negócio do hidrogénio e um dos responsáveis pelas operações com o hidrogénio na Bondalti.

Os seus contributos eram essenciais para obter uma visão mais geral sobre todo o tema do hidrogénio verde, quais as perspetivas de futuro e desafios, e também obter uma visão mais orientada para a componente operacional, nomeadamente os aspetos mais técnicos e detalhados sobre a segurança, riscos e outros aspetos relevantes para este estudo.

As entrevistas semiestruturadas, foram realizadas com o apoio de um guião com um conjunto de questões sobre o tema do hidrogénio verde, orientando o discurso para as questões de segurança que envolvem o tema, mas permitindo uma ampla margem aos entrevistados para desenvolverem o seu discurso, no sentido de obter o máximo de informação possível.

Questionados acerca de qual o envolvimento que a Bondalti tem com o hidrogénio verde e respetivas expectativas futuras em termos de projetos de produção, revelam que a Bondalti pretende apostar no hidrogénio verde para se tornarem mais sustentáveis na sua atividade.

Atualmente a sua produção de hidrogénio através da eletrólise, recorre à matéria-prima de salmoura (sal + água) e energia elétrica, sendo separado em três produtos: Cloro, soda cáustica e hidrogénio. Este último é todo consumido internamente para a produção de anilina.

O hidrogénio produzido não é, no entanto, suficiente para o seu próprio consumo, tendo a Bondalti que recorrer à sua compra a um fornecedor externo de hidrogénio, cuja produção resulta da transformação de gás natural.

Com a conclusão do projeto de expansão de autoconsumo, a produção de hidrogénio 100 % verde poderá ser uma realidade, uma vez que terá uma capacidade instalada que poderá dedicar a esta finalidade.

É relatado ainda que o historial existente na Bondalti, confere-lhe o necessário “*know-how*” e experiência no manuseamento do hidrogénio, tendo reunido um conjunto muito amplo de competências na eletrólise.

Têm o objetivo de descarbonizar todo o seu processo produtivo no seu complexo industrial de Estarreja. Consideram que este é um fator que lhes irá considerar uma vantagem e uma diferenciação dos seus produtos.

Salientam que o objetivo final é que todos os elementos da cadeia de valor tenham um componente de carbono cada vez menor, sendo que o hidrogénio verde, pelo expectável peso

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

que terá na produção da Bondalti, permitirá obter um abatimento de intensidade carbónica muito relevante em toda a atividade.

Como projetos futuros já em curso referem o projeto “*H2 Enable*”, está integrado no PRR nacional, sendo considerado um projeto de interesse comum europeu, permitindo um abatimento em torno dos 30% em emissões, o que coloca Portugal na rede europeia de desenvolvimento de hidrogénio verde, o que é fundamental para o país para alavancar outros projetos que envolvam o hidrogénio verde.

O projeto consiste na construção das infraestruturas para a produção de hidrogénio verde no Complexo Industrial de Estarreja. Este projeto tem como objetivo, o autoabastecimento para a produção de anilina, contribuindo para a descarbonização das operações da empresa.

Explicam que este sistema baseia-se num grupo eletrolisador com uma potência nominal de 40 megawatts (MW), alimentada por energia 100% renovável, através do seu parque solar para consumo próprio, destinado à produção de hidrogénio verde, permitindo produzir anualmente 5,5 quilotoneladas de hidrogénio verde, e dotada dos mais sofisticados sistemas de comando e controlo atuais e com sofisticados sistemas de segurança.

De forma complementar, o “*H2 Enable*” vai também permitir a produção para venda direta no mercado, nomeadamente por injeção na rede nacional de gás natural, e para o setor da mobilidade, contribuindo para o posicionamento competitivo de Portugal nas energias verdes e de acordo com os objetivos da Comissão Europeia da “*RePowerEU*”.

Este projeto obteve o estatuto de "Importante Projeto de Interesse Europeu Comum", concedido pela Comissão Europeia, e foi aprovado em 2022 para financiamento pelo Plano de Recuperação e Resiliência.

Complementam que estes projetos servem para demonstrar que a tecnologia funciona, que será possível ter um preço competitivo, no entanto, o tema do custo tem de ser trabalhado. Estes projetos são considerados pela Bondalti, como apostas de médio e longo prazo, não a curto prazo.

Como futuros projetos, revelam ainda que estão a participar muito ativamente no Gasoduto Ibérico, onde se faz a ligação à rede de gás natural existente, cujo objetivo é de interligar as instalações da Bondalti em Estarreja, à rede de distribuição de gás natural, injetando hidrogénio verde com uma concentração de 10% numa fase inicial, sem qualquer alteração ou modificação.

Também no consórcio de Sines, nas quais a GALP e a EDP se incluem, a Bondalti é a empresa de referência que assegura toda a componente técnica e industrial do projeto.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Considera-se que o hidrogénio verde será um vetor energético de futuro, que aliado à sua experiência de muitos anos com o seu manuseamento e com a operação com eletrolisadores, resultará em que a Bondalti tenha um papel relevante neste contexto.

Afirma-se que Portugal reúne excelentes condições para ser um interveniente relevante para ser um produtor, distribuidor e comercializador de hidrogénio verde.

Sobre as dificuldades verificadas no arranque destes projetos, referem que a desburocratização e diminuição da complexidade dos processos de licenciamento por parte dos órgãos decisores e reguladores são medidas fundamentais para permitir o alavancamento dos projetos de produção de hidrogénio.

Na fase inicial de arranque desta tecnologia, os contributos dos organismos estatais sob a forma de incentivos financeiros, serão incontornáveis para o desenvolvimento dos projetos até conseguirem ganhar escala.

Complementarmente, a necessidade de estabelecer legislação específica para estes projetos relacionados com o hidrogénio verde, é também essencial para prover a necessária confiança por parte dos investidores e para conferir a devida segurança às instalações e promover a aceitação desta tecnologia à sociedade em geral.

No que respeita à tecnologia envolvida na produção de hidrogénio verde, esclarecem que a Bondalti já produz hidrogénio cinzento há muitos anos, embora não tenha sofrido uma evolução muito significativa nesse período.

No passado já produziram hidrogénio verde, não recorrendo a instalações de produção de energia elétrica própria, mas comprando energia verde certificada e consumida diretamente pela Bondalti para a produção de hidrogénio verde.

Espera-se um aumento da eficiência dos eletrolisadores, melhoria nos seus sistemas de controlo e sistemas de segurança, com dimensões mais compactas para a mesma capacidade de produção, acompanhado de uma diminuição dos respetivos custos, com a gradual adoção de uma economia de escala desta tecnologia.

Esta massificação da produção dos eletrolisadores irá forçar os fabricantes destes equipamentos a um rápido desenvolvimento de novas técnicas e à investigação e desenvolvimento de modelos de eletrolisadores mais evoluídos e com maior desempenho.

Segundo as suas indicações, 70% do custo de produção do hidrogénio verde, reside no valor da energia renovável que é utilizada para a eletrólise.

Na sua perspetiva, e atendendo à sua participação com uma forte componente técnica, o colaborador da Bondalti revela que na sua opinião, não têm sido implementados mais projetos

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

de produção de hidrogénio verde em Portugal devido a uma grande dificuldade no estabelecimento de regras claras para a sua operação e falta de adequação ao contexto atual.

Afirma que em primeiro lugar deverá haver uma definição de todos os procedimentos de licenciamento e as regras que todos os promotores deverão cumprir, assim como uma definição clara dos valores de venda, para daí permitir que os investidores criem um modelo de negócio que não esteja permanentemente dependente de financiamentos elevados do estado.

Por outro lado, será fundamental obter uma margem de venda suficiente para permitir que o modelo de negócio criado seja bem-sucedido. Citando uma frase que referiu na entrevista: “(...) *Regras olhando para o futuro, no presente (...)*”.

É da opinião que para não comprometer um crescimento correto e permitir um alavancar desta tecnologia, deveria ser efetuado um recomeço do zero, em termos de procedimentos, regras de segurança, legislação, procurando evitar demasiada complexidade em todas estes temas, mas também no próprio processo de certificação e licenciamento das instalações, evitando o afastamento ou desinteresse de potenciais investidores.

Relativamente às metas estipuladas pelo governo e União Europeia para 2030 e 2050, afirma que será praticamente impossível que estas sejam alcançadas, pelo menos na sua totalidade, acreditando, no entanto, que estas metas terão de ser cumpridas, mas com períodos distintos dos que foram traçados.

As lacunas na regulamentação, a falta de definição concreta dos modelos de negócio, a falta de capacidade de fornecimento de eletrolisadores em tempo útil por parte dos fabricantes e a dificuldade nos licenciamentos destas instalações continuam a constituir uma barreira, não dando as necessárias garantias e a confiança aos promotores.

Acrescenta que as metas deveriam ser revistas e ajustadas à realidade do país e da própria Europa, com metas alcançáveis, com a imposição de penalizações para a indústria que mais polui e que continua a recorrer a recursos energéticos poluentes.

Por outro lado, acredita na importância fundamental das trocas comerciais entre parceiros internacionais do mercado do hidrogénio verde e na sua interligação entre os diferentes países, para permitir um maior alcance de possíveis interessados na compra da sua produção.

A preocupação da Bondalti no que se refere aos temas ambientais é também evidente na desativação e desmantelamento de uma unidade de produção com base na queima de carvão que embora tivesse um bom desempenho, revelava-se extremamente poluente para o meio ambiente.

No final da entrevista, revelaram ainda que acreditam que a produção de hidrogénio verde será sem qualquer dúvida a solução mais viável para o futuro da indústria e a chave para a transição energética que se procura.

### 4.2 Estudo de caso – Floene – Parque industrial do Seixal

#### 4.2.1 Caracterização da empresa

O grupo Floene é o maior operador de distribuição de gás em Portugal, através da participação e gestão direta de nove operadoras regionais de distribuição de gás, presentes em 106 concelhos de norte a sul do país, sendo responsável pela gestão da rede de distribuição de gás de média e baixa pressão, em regime de serviço público.

Com uma rede constituída maioritariamente por polietileno e com uma idade média inferior a 16 anos, a Floene possui uma das infraestruturas mais modernas e eficientes da Europa, o que lhe permite assegurar um abastecimento em total segurança e um serviço de qualidade, cumprindo todos os critérios definidos pela ERSE e pela legislação específica do setor, sendo expectável uma boa compatibilidade com a utilização de hidrogénio.

A Floene está muito comprometida com o tema da descarbonização dos consumos de energia e da transição energética, estando preparada para a distribuição de gases renováveis, assim como para fortalecer a sua rede de distribuição, e dotando-a de dispositivos mais seguros e com uma maior capacidade de monitorização de todo o sistema.

A rede em polietileno implementada pela Floene permite o transporte de hidrogénio verde e de gases de origem não fóssil, como o biometano, assumindo-se assim como um interveniente de relevância na transição para uma economia de baixo carbono.

O seu objetivo é o seu desenvolvimento e crescimento, mas ao mesmo tempo, criando valor de forma sustentável e contribuindo para o bem comum das comunidades com novas energias de futuro, nomeadamente com a distribuição de hidrogénio verde, que constituirá uma das grandes apostas de futuro da Floene.

Na sua política de segurança, saúde, ambiente e prevenção de acidentes graves, é salientado que *“(...) a proteção das pessoas, do ambiente e dos ativos é uma condição essencial à geração de valor sustentável, assumindo a sua responsabilidade na gestão dos riscos e impactes das suas atividades bem como na prevenção de acidentes graves (...)”*, (Floene, 2025).

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Neste sentido, a Floene estabelece o compromisso da melhoria contínua do seu Sistema de Gestão de Segurança, Saúde e Ambiente e Prevenção de Acidentes Graves (SSA e PAG), como contributo para um desenvolvimento sustentável da sua atividade. Na sua política interna, são destacadas as seguintes principais diretrizes que estão diretamente relacionadas com os aspetos de segurança praticados pela empresa para a prevenção de acidentes:

- A integração da Segurança, incluindo a Prevenção de Acidentes Graves, a Saúde e o Ambiente na estratégia e atividades da empresa e das suas participadas, comprometendo todos os colaboradores e prestadores de serviços, nomeadamente através da sua consulta e participação, de forma a melhorar o desempenho do seu sistema de gestão;
- A implementação, manutenção e otimização de um Sistema de Gestão SSA alinhado com as boas práticas definidas nas normas ISO 14001 e ISO 45001, bem como um Sistema de Gestão de Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves (PAG) de acordo com os referenciais legais, definindo práticas e procedimentos adequados;
- Incorporação na sua organização uma estrutura de gestão de SSA e PAG, liderada pela gestão de topo, com a missão de monitorizar a política, programas, metas e objetivos estabelecidos e fornecimento dos meios e recursos adequados à implementação e manutenção do Sistema de Gestão;
- Estabelecimento de objetivos e metas desafiantes sobre matérias de Segurança, Saúde e Ambiente e de Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves, medindo, avaliando, divulgando os resultados obtidos e implementando programas e ações de melhoria;
- Desenvolvimento e implementação de procedimentos operacionais para todas as atividades, de modo a assegurar o cumprimento cabal da legislação vigente;
- Identificação, avaliação, gestão e divulgação aos colaboradores e partes interessadas dos riscos inerentes às atividades, de modo a prevenir a ocorrência de acidentes bem como minimizar os impactos para as pessoas e para o ambiente, garantindo a proteção da biodiversidade e a prevenção da poluição;
- Promoção da formação e informação de todos os colaboradores e prestadores de serviços, garantindo a sua capacitação contínua para o desempenho das suas atividades;
- Implementação de um sistema de gestão das modificações de equipamentos ou de processos, assegurando que os potenciais perigos que possam provocar acidentes graves são devidamente identificados, avaliados e controlados;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Inspeção, manutenção e reparação dos equipamentos e instalações, de acordo com os planos previamente definidos e utilizar a energia e os recursos de forma eficiente;
- Garantir a existência de planos de emergência, a adequada formação e capacitação de todos os envolvidos, bem como a realização de simulacros e treinos;
- Investigação sistemática dos incidentes, determinando as respetivas causas e correção das mesmas, divulgando as suas conclusões e integrando as lições aprendidas, de modo a prevenir a ocorrência de incidentes semelhantes;
- Estabelecimento de planos de auditorias e inspeções, enquanto ferramentas para avaliar a conformidade com os requisitos, como forma de melhorar continuamente o Sistema de Gestão;
- Divulgação da presente política às partes interessadas e comunicação de forma responsável e transparente o desempenho a nível de Ambiente, Saúde e Segurança incluindo a Prevenção de Acidentes Graves.

### 4.2.2 Operação com hidrogénio verde

No dia 7 de março de 2023, a Floene deu, um passo histórico no caminho da transição energética e da descarbonização da economia nacional, sendo oficialmente iniciada a injeção de Hidrogénio Verde na rede de distribuição de gás em Portugal, mais concretamente no município do Seixal.

O projeto “A Energia Natural do Hidrogénio” está a abastecer um conjunto de cerca de oitenta clientes residenciais, terciários e industriais e servirá de exemplo para outros projetos a nível nacional.

Numa primeira fase, considerada uma fase de testes, estes clientes passaram a ser oficialmente abastecidos por uma mistura de hidrogénio verde com gás natural, aumentando progressivamente a sua percentagem até um máximo de 20% num período de dois anos.

O hidrogénio verde é produzido localmente, com energia 100% renovável, no Parque Industrial do Seixal. Depois de produzido e armazenado, o hidrogénio é distribuído através de um gasoduto de polietileno, idêntico a cerca de 95% da rede de gás utilizada em Portugal, até uma estação, onde é misturado com gás natural, sendo depois distribuído aos clientes, (APEG, 2025) e (Floene, 2025).

Através da referida rede com uma extensão de aproximadamente 1400 metros, dedicada ao transporte de hidrogénio, é estabelecida uma interligação entre o seu local de produção e a

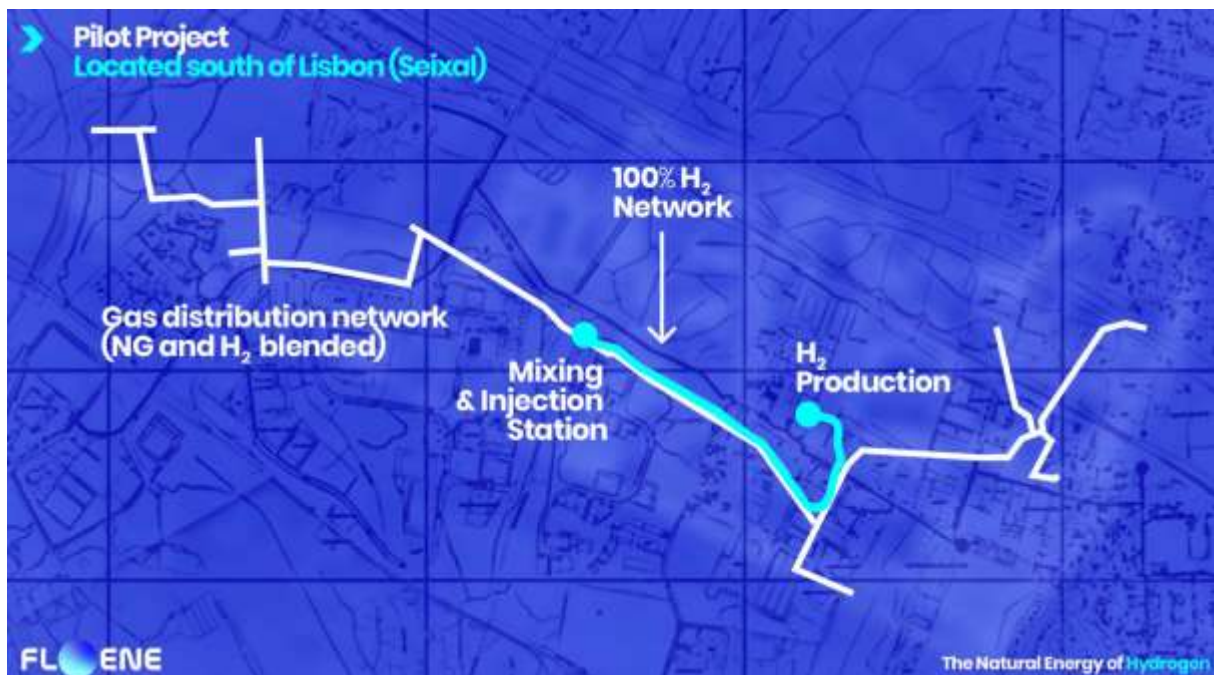
## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

estação de mistura e injeção. A estação de mistura e injeção contém uma misturadora, para garantir a proporção pretendida de hidrogénio com o gás natural, que irá variar entre os 2% e os 20% em volume, um calorímetro, que medirá o poder calorífico da mistura, e um sistema de controlo e monitorização.

Após este passo, a mistura de hidrogénio e gás natural é injetada na rede que abastece os consumidores residenciais, terciários e industriais.

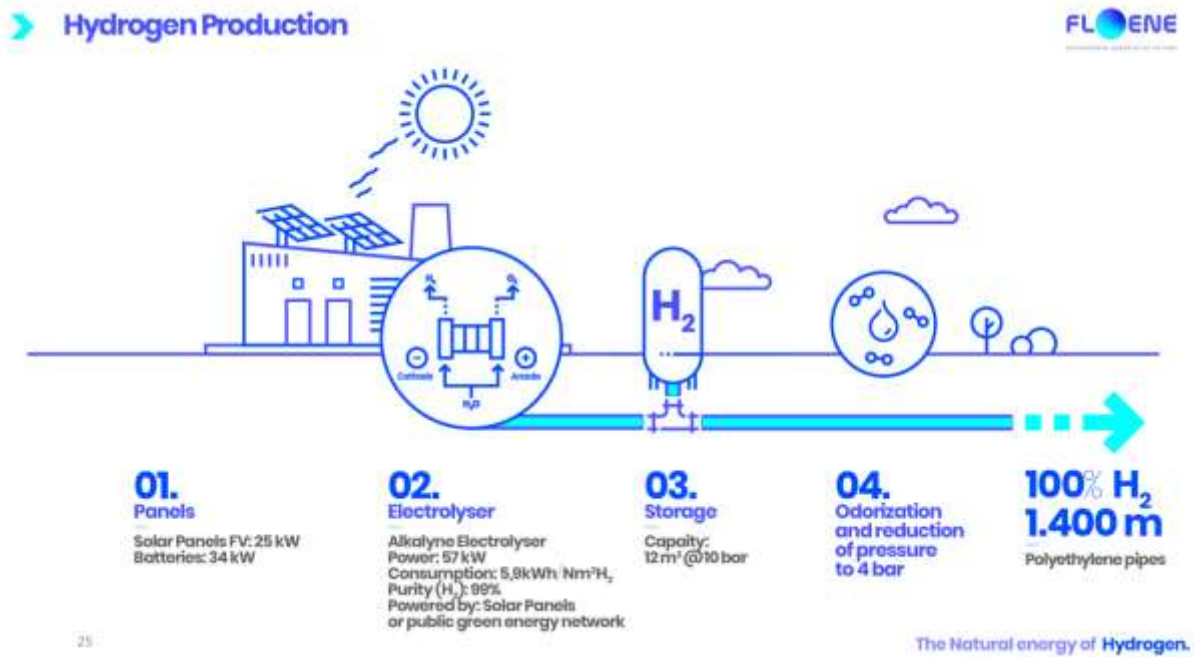
Esta rede de distribuição tem uma extensão total superior a 7500 m e contém componentes como válvulas e contadores, que podem ser encontrados em qualquer zona da rede de distribuição de gás atualmente existente.

Figura 45: Projeto piloto de produção de hidrogénio verde



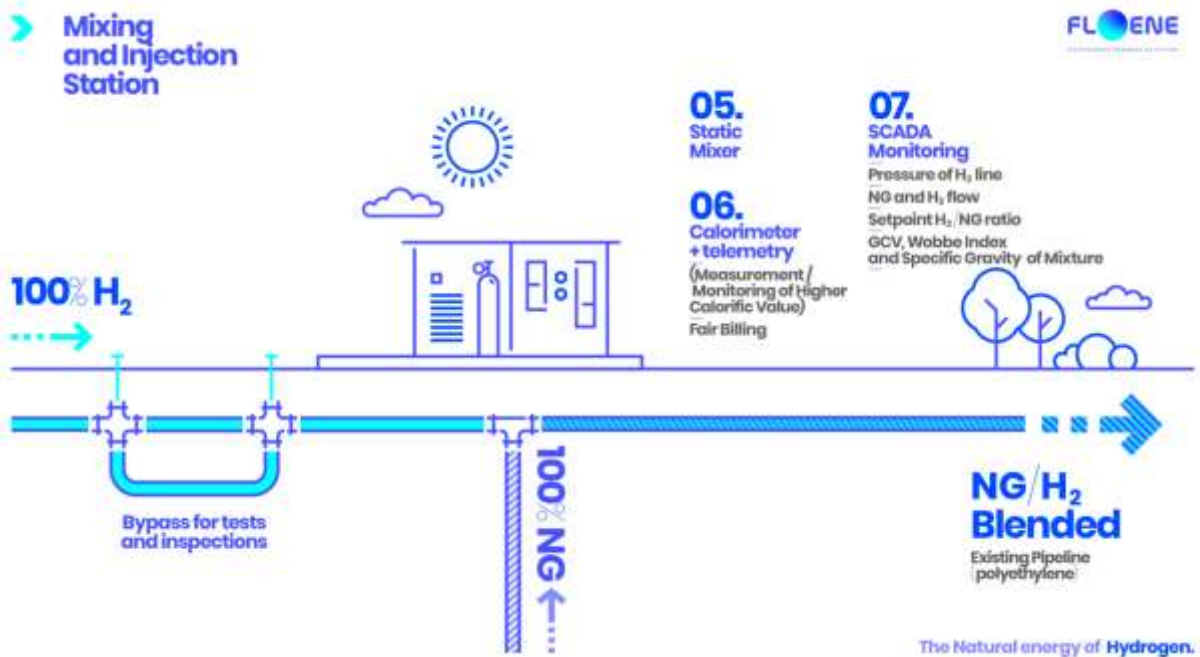
Fonte: Comissão Europeia, 2025

Figura 46: Diagrama representativo do processo de produção do projeto piloto de produção de hidrogénio verde (I)



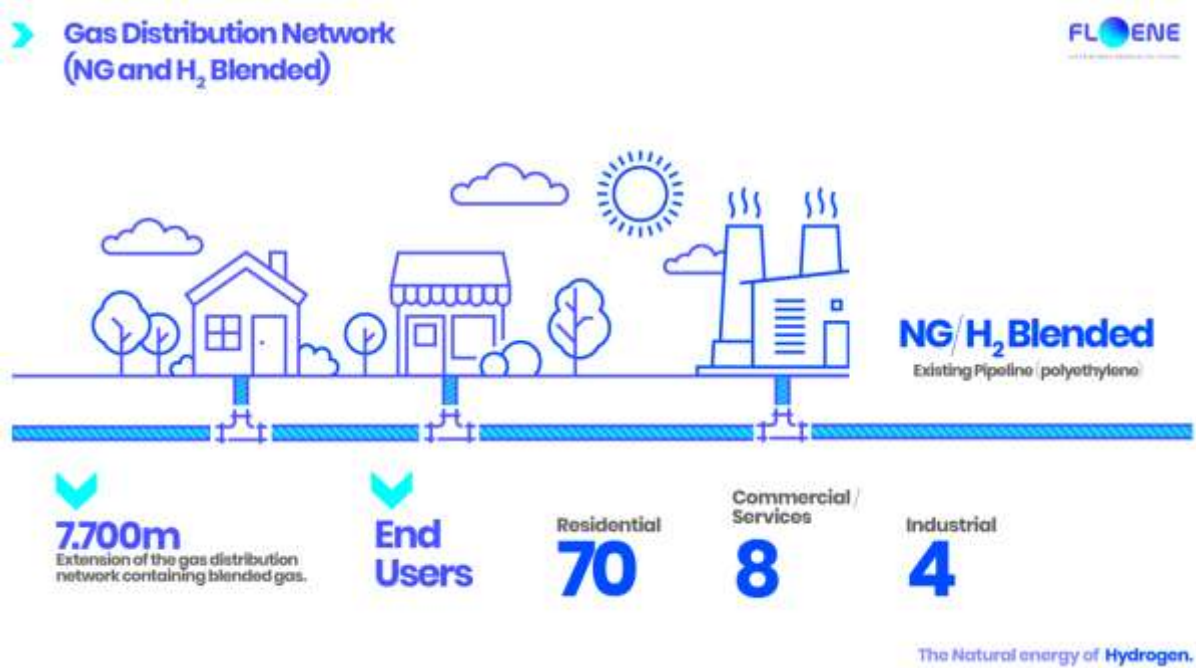
Fonte: Comissão Europeia, 2025

Figura 47: Diagrama simplificado da estação de mistura e injeção de hidrogénio verde do projeto piloto de produção de hidrogénio verde (II)



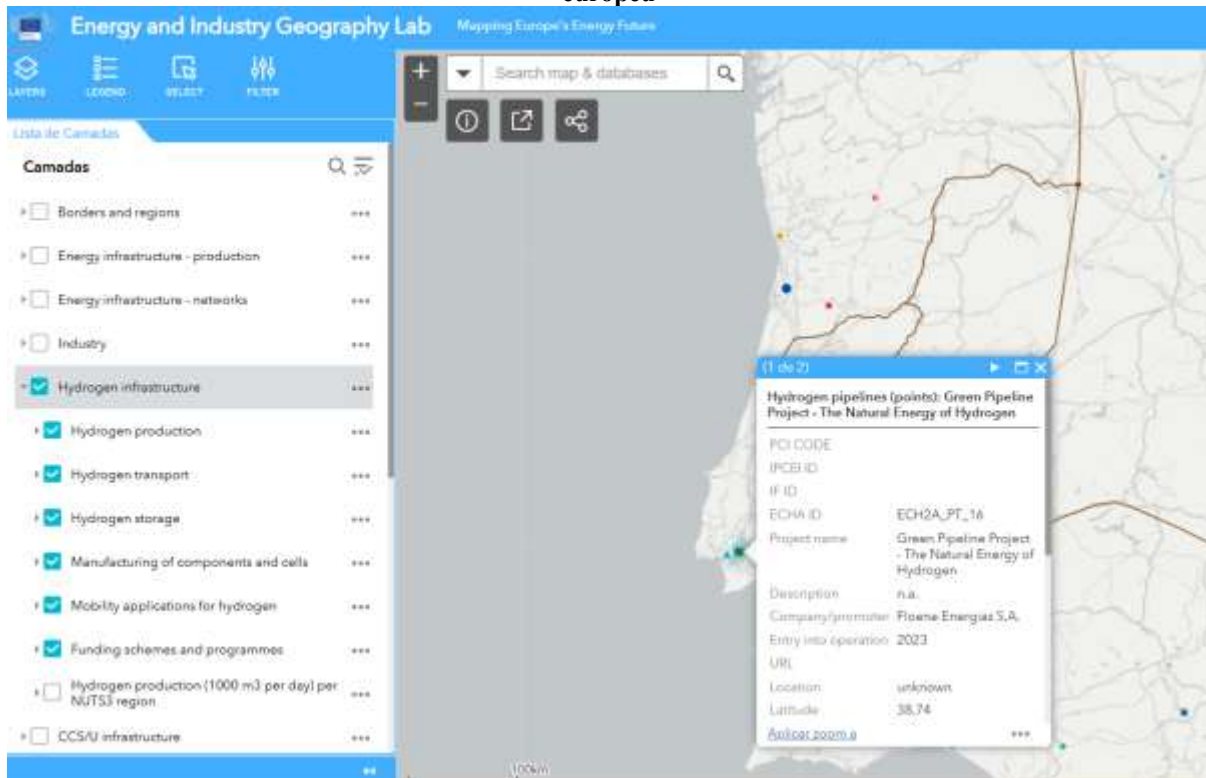
Fonte: Comissão Europeia, 2025

Figura 48: Diagrama da rede de distribuição do hidrogénio verde do projeto piloto de produção de hidrogénio verde (III)



Fonte: Comissão Europeia, 2025

Figura 49: Projeto piloto de hidrogénio verde da Floene no Seixal referenciado no mapa energético europeu



Fonte: Energy and Industry Geography Lab, 2025

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Este projeto tem como principal objetivo estudar o impacto da injeção de H<sub>2</sub> na gestão da infraestrutura de distribuição e nos equipamentos de queima dos consumidores, permitindo adquirir know-how em relação aos seguintes aspetos:

- Comportamento da rede de polietileno para transportar hidrogénio a 100%;
- Testar a adequação do dispositivo de controlo da mistura hidrogénio verde/gás natural;
- Comprovar a eficácia dos sistemas de segurança implementados e respetivos procedimentos existentes;
- Otimizar os procedimentos de operação à veiculação de misturas de gás natural e hidrogénio verde;
- Comportamento dos equipamentos de utilização – fogões, esquentadores e caldeiras a gás natural, já existentes nas instalações de utilização abrangidas.

Foram estabelecidas três fases distintas para a introdução do hidrogénio verde na rede de distribuição de gás natural neste primeiro projeto de descarbonização do setor do gás em Portugal.

A primeira fase, de preparação, consistiu em projetar todo o enquadramento do desenvolvimento do projeto, fazer o levantamento de necessidades técnicas e de comunicação com todos os envolvidos.

A segunda fase, refere-se ao início de construção das infraestruturas, a formação de equipas especializadas para a correta operação das instalações, na comunicação com clientes e fornecedores, nas inspeções necessárias e no início da produção de hidrogénio.

A terceira fase corresponde ao início da primeira injeção de hidrogénio verde no segmento de rede construído, que liga o local de produção à Estação de Mistura e Injeção (EMI), onde o hidrogénio é misturado com o gás natural e distribuído na rede já existente e entregue aos consumidores. O aumento gradual do volume de hidrogénio na mistura, permite um acompanhamento preciso e através de uma monitorização constante e do fornecimento contínuo de dados, é possível avaliar com precisão o comportamento do sistema para cada etapa, dando necessária confiança para adotar concentrações de hidrogénio superiores.

### 4.2.3 Resultados das entrevistas

Para complementar os dados recolhidos até então, foi concedida por parte da Floene a oportunidade de ter uma entrevista com o gestor de projeto, envolvido no projeto piloto de produção e distribuição implementado no Seixal.

A entrevista decorreu num formato semiestruturado, recorrendo a um guião previamente elaborado com um conjunto de questões acerca do tema, permitindo um diálogo aberto entre os participantes e um elevado grau de liberdade para permitir que o entrevistado possa desenvolver mais livremente à volta da questão colocada.

Questionado acerca de projetos futuros relacionados com o hidrogénio verde, foi revelado que a Floene está envolvida na colaboração com diversas entidades e parceiros, na realização de projetos de produção e distribuição, partilhando todo o conhecimento e aprendizagem que tem recebido, nomeadamente com o projeto piloto do Seixal, que tem sido uma importante fonte de recolha de informação.

Destacou-se ainda que a Floene é o maior operador de rede distribuição de gás em Portugal, abastecendo mais de 1 milhão de habitantes, e está fortemente comprometida com a perspetiva da descarbonização de toda a rede de gás em Portugal.

A estratégia pensada pela Floene no que respeita à sua intervenção direta no processo de descarbonização, passa muito pela sua participação ativa em alguns projetos referentes ao hidrogénio verde, colaborando com os seus parceiros e partilhando todo o seu “*know how*” adquirido ao longo de todos os seus anos de atividade que lhe confere um grau de conhecimento único neste setor.

Como já referido anteriormente, é explicado também que o propósito do desenvolvimento do projeto piloto do Seixal foi de servir como uma plataforma de aprendizagem de toda a cadeia de valor do hidrogénio verde desde a sua produção, distribuição até ao consumo final, não só para a Floene, mas também para a partilha com diversas entidades promotoras destes projetos e seus parceiros.

A informação recolhida, além de dar a conhecer aspetos importantes acerca da adequabilidade e comportamento da rede de distribuição de gás nacional, serve também para desmistificar a relutância por parte da população em geral na utilização do hidrogénio como vetor energético nas suas próprias habitações.

O “*green pipeline project*”, conforme denominação atribuída, tem ainda o objetivo de arrancar o projeto de descarbonização e verificar a compatibilidade e adequabilidade da nossa rede de distribuição de gás com a inclusão do hidrogénio. O projeto foi financiado por um

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

fundo ambiental que suportou o acréscimo de custo da utilização do H<sub>2</sub> Verde face ao custo do gás natural, resultando em que o custo adicional da utilização do hidrogénio não foi refletido na fatura dos consumidores finais, tendo sido inteiramente compensado pelo referido fundo ambiental.

Após os 2 anos previstos de operação do projeto, este foi parado temporariamente, devido a necessidades de manutenção aos eletrolisadores, no entanto, existe a intenção por parte da Floene de voltar a reativar a sua operação.

Questionado acerca da expectativa da envolvimento da Floene no processo de descarbonização, como operador de rede, a Floene tem todo o interesse em participar ativamente neste processo, mesmo havendo a necessidade de fazer um forte investimento em novas infraestruturas para a rede de distribuição, nomeadamente a substituição de partes de rede de gasodutos, instalação de novos equipamentos, integração de sensores adequados à presença de hidrogénio e recorrer a novos materiais caso se identifique essa necessidade no momento em que se iniciar a distribuição de hidrogénio acima das percentagens de concentração que os materiais existentes têm capacidade.

Complementam ainda que atendendo ao contexto atual e à transição energética, a visão da Floene sobre a importância do hidrogénio verde é que é fundamental para a descarbonização da indústria. Neste setor, será particularmente importante para a descarbonização da indústria pesada, onde há um grande consumo de energia, e onde é difícil a eletrificação.

Terá também um papel importante no consumo residencial, mas neste caso, a curto médio prazo, deverá manter-se uma limitação a 20% de concentração máxima de hidrogénio na mistura com gás natural, prevista na legislação.

Na sua visão, o hidrogénio será a solução mais viável para a descarbonização da indústria que é a principal fonte de emissões de gases poluentes. Admitem, no entanto, que numa fase inicial, a perspetiva será sempre canalizar toda a produção de hidrogénio verde para a indústria e o excedente será consumido pelas residências habitacionais, com as devidas limitações na sua utilização devido à imposição de 20% de hidrogénio verde em todo o sistema.

De acordo com as suas previsões, apenas num horizonte de 10 a 15 anos é que eventualmente será mais viável a utilização exclusiva de hidrogénio verde no mercado residencial.

Relativamente às dificuldades que preveem na implementação de projetos de hidrogénio verde em grande escala, prendem-se sobretudo com o custo ainda muito alto para se tornar viável e competitivo, e os investimentos iniciais são bastante significativos, atendendo a que os efeitos apenas se farão sentir a longo prazo.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Com o decréscimo do preço dos eletrolisadores a curto ou médio prazo, prevê-se que poderá surgir uma vantagem competitiva, que neste momento não existe. Referem ainda que nos encontramos mesmo no início da curva de aprendizagem desta tecnologia, que está ainda numa fase muito inicial de desenvolvimento, sendo expectável uma evolução em termos de eficiência, custo, segurança e muitos outros fatores que possibilitarão cada vez mais a utilização do hidrogénio verde em grande escala.

Relativamente ao Projeto Piloto do Seixal, que serviu de ponto de referência, as conclusões retiradas foram que a avaliação global do projeto, quer por parte dos promotores e parceiros envolvidos, quer por parte dos consumidores, foi extremamente positiva, reforçando a confiança da sociedade e dos investidores na viabilidade destes projetos e na sua segurança, que é um dos pontos mais críticos sobre este tema.

Neste domínio da segurança, revela que, para além de todos os sistemas de segurança que existem para o sistema de distribuição de gás natural, foram acrescentados dispositivos de controlo e monitorização adicionais específicos para a deteção de hidrogénio, com recolha e gravação de dados em tempo real, emitindo sinalização em caso de fugas ou eventuais anomalias em determinados pontos do sistema.

Como forma de conferir um nível de segurança adicional, foi criada uma linha de apoio ao cliente específica para estes cerca de 80 utilizadores, para individualizarem eventuais ocorrências nestes cerca de 80 clientes participantes neste projeto piloto, numa rede confinada.

Os intervenientes dessa linha de apoio foram especificamente formados e treinados para estarem particularmente atentos a qualquer questão ou anomalia relacionada com o hidrogénio. Por outro lado, também foram criadas equipas de intervenção específicas, disponíveis 24h por dia, para atuar em eventuais incidentes e de prontidão para uma resposta imediata.

Essa monitorização permanente e a disponibilidade imediata de meios de resposta a qualquer ocorrência era essencial, na perspetiva da Floene para não surgirem quaisquer atritos ou relutância por parte da população quanto à recetividade ao hidrogénio nas suas casas.

Passados os dois anos de operação do projeto, verificou-se que o sistema nunca teve qualquer problema de fiabilidade, nem de segurança, não tendo sido reportada qualquer ocorrência de fugas na tubagem, mesmo durante a fase em que a injeção do hidrogénio atingiu a máxima concentração próxima dos 20% e que potencialmente poderia resultar em maiores dificuldades.

A prestação dos equipamentos, gasodutos e toda a infraestrutura correspondeu inteiramente às expectativas, tendo tido uma prestação irrepreensível, não tendo sido registados

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

quaisquer problemas técnicos ou anomalias resultantes da utilização de hidrogénio verde. Em termos de satisfação dos clientes e a sua aceitação, foi bastante positiva.

Salienta-se que uma parte do gasoduto era nova, mas outra parte, a mais significativa e de maior dimensão, era já existente e, portanto, já contava com bastantes anos de utilização.

Um outro método utilizado para garantir a ausência de fugas do sistema, foi implementar uma monitorização constante do volume de hidrogénio injetado no lado da produção e comparar com o registado nos consumos junto aos utilizadores, resultando num excelente indicador da ausência de fugas e da estanquicidade da rede de distribuição.

Em termos de percentagem de “*blending*” com o gás natural, o hidrogénio verde foi introduzido primeiramente em percentagens quase insignificantes, na ordem dos 1 a 2% e foram gradualmente incrementando essa percentagem de hidrogénio por patamares.

Esse incremento sequencial através de percentagens unitárias, foi acompanhado por uma monitorização intensiva de todo o sistema para avaliar permanentemente o seu comportamento face aos aumentos sucessivos das quantidades de hidrogénio verde injetados na rede de distribuição.

O aumento sucessivo das concentrações de hidrogénio atingiu um patamar máximo próximo dos 20%, tendo permanecido durante longos períodos entre os 17% e 18%. Concluiu-se também que a infraestrutura teria capacidade para um aumento ainda superior a esta concentração.

Segundo os dados recolhidos e a avaliação técnica por parte da Floene, este valor poderia ter sido ultrapassado tecnicamente, não comprometendo a fiabilidade e segurança do sistema.

A produção do hidrogénio manteve-se constante, pelo que não fossem os elevados consumos da indústria que estavam associados a esta rede fechada, ter-se-ia alcançado os 20% recorrentemente.

Acerca da ferramentas e procedimentos preventivos ou corretivos que a Floene adotou neste projeto em específico, esclarecem que todo o sistema de operação e de segurança para as operações com o hidrogénio, tomou como base os sistemas já utilizados para o gás natural, com as devidas modificações.

Adicionalmente, foram integradas uma grande quantidade de unidades de monitorização em diversos pontos estratégicos, de forma a obter dados precisos acerca do comportamento de todo o sistema e infraestrutura em tempo real, e assim avaliar a conformidade da instalação com a operação com hidrogénio.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Foi implementado um sistema automático de corte de abastecimento de hidrogénio, com redundância, e com vários pontos de medição, não só interrompendo o abastecimento de hidrogénio a jusante, próximo dos consumidores, mas também a montante, já próximo da central de produção.

Os sistemas de segurança nunca foram ativados, salvo em simulações ou simulacros, pois nunca se verificou qualquer incidente durante todo o seu tempo de operação.

Foi criada ainda uma plataforma específica para o comando e controlo dessa rede fechada e foi vigiado atentamente por uma equipa especializada e destacada especificamente para esta tarefa.

A nível de monitorização do sistema, existe um sistema de comando e controlo que opera em tempo real, monitorizando as principais medidas, alarmes, estados dos dispositivos, e que permite uma rápida paragem e atuação dos dispositivos de segurança para prevenção de acidentes

Tratando-se de um projeto muito em foco e que serviria de base de recolha de dados para futuros projetos, fazia sentido implementar todos os sistemas de monitorização e recolha de dados possíveis para partilha de informação, para obter o máximo de informação possível acerca do seu comportamento.

Indicam ainda que os sistemas de ventilação foram reforçados face às instalações típicas de gás natural, não por qualquer tipo de exigência em termos de legislação, mas por esta ser um ponto de visita e de grande foco para todo o setor.

Foram criados ainda um conjunto complementar de procedimentos de operação em caso de emergência, novos procedimentos de segurança e instruções de trabalho, específicos para a operação com este sistema onde se integra o hidrogénio, referindo as suas especificidades e potenciais riscos associados.

Foi criado todo um conjunto de sinalética específica, e um conjunto de documentos informativos para os operadores do sistema, mas também para os próprios consumidores, no sentido de os informar devidamente acerca do que são os riscos, de como atuar no caso de alguma anomalia, e do que deverá estar atento para identificar qualquer possível problema.

Ainda sobre o tema da segurança, foi referido por parte da Floene, que eram efetuadas com uma elevada frequência ações de formação e simulacros, não só com os operacionais que lidam diretamente com o sistema, mas também com os responsáveis da segurança.

Estas ações, envolviam meios de emergência externos (bombeiros, meios de emergência), numa ação conjunta, permitindo avaliar a eficácia dos procedimentos implementados e da adequabilidade e eficácia dos equipamentos de corte e segurança.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Os simulacros são realizados periodicamente envolvendo todo um conjunto de intervenientes diretos na operação e permitindo que as equipas operacionais partilhem as suas experiências, dificuldades e eventos que tenham sido registados.

Complementarmente, são realizadas reuniões de segurança, com a participação conjunta dos operacionais, responsáveis de segurança e de outros departamentos relevantes, onde todos os intervenientes têm oportunidade de expor a sua visão e experiência do dia a dia onde são analisados os dados recolhidos.

Nessas reuniões, são debatidos temas relacionados com segurança, feedback dos intervenientes acerca de novos potenciais riscos identificados, dificuldades encontradas durante a atividade, ou possíveis sugestões de melhorias a implementar, propostas de revisão a procedimentos existentes, no sentido de os otimizar.

Questionado acerca do entendimento da Floene acerca da adequação da legislação atual existente em Portugal, nomeadamente aos critérios específicos a adotar em termos de segurança, afirmam inequivocamente que a legislação é claramente insuficiente, até porque não existe qualquer legislação específica sobre o hidrogénio, tendo de se apoiar em legislação existente comum a outros gases.

Existe efetivamente legislação para redes de gás, atualmente regem-se pelo regulamento das redes de gás, mas não há referência específica a nada em concreto acerca da sua utilização com hidrogénio.

Para a conceção e operação do projeto do Seixal, foram seguidas as legislações existentes que se referem ao gás natural. O seu funcionamento foi, no entanto, previsto, para não operar perto dos limites previstos reservando uma faixa de utilização considerável de segurança.

Na sua opinião, existem algumas variáveis ou nuances que podem não estar contempladas ou previstas na legislação existente e que poderão vir a ser relevantes, sobretudo numa utilização em grande escala e com concentrações de hidrogénio superiores à atuais.

A sua expectativa é que a legislação irá ser criada, embora ainda não tenham visibilidade de quando acontecerá, podendo surgir apenas existir algum histórico e terem sido reportados alguns problemas.

Relativamente aos desafios tecnológicos na produção de hidrogénio verde em grande escala, e ao grau de maturidade atual desta tecnologia, nomeadamente ao nível da segurança, a Floene considera que claramente a tecnologia dos eletrolisadores está numa fase ainda muito imatura e que ainda tem muito potencial de desenvolvimento, quer a nível de eficiência, a nível técnico e ao nível da segurança.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Na sua perspetiva, assim que se resolverem os problemas dos custos dos eletrolisadores e do custo final do hidrogénio, iremos assistir a um rápido desenvolvimento desta tecnologia que irá conduzir a uma economia de escala.

O desafio económico terá uma influência preponderante na rapidez deste desenvolvimento e será fundamental para obtermos eletrolisadores mais baratos, mais seguros e eficientes, resultando num custo final do hidrogénio mais baixo.

No que respeita à segurança nas operações de produção, transporte, armazenamento e utilização final de hidrogénio verde, a Floene considera que as instalações nunca poderão ser consideradas totalmente seguras, no entanto dada a dimensão das instalações existentes e as quantidades de produção ainda numa escala muito residual, os desafios são significativamente menores e logo mais controláveis.

Com a adoção de uma produção em grande escala, os desafios em termos de segurança serão cada vez maiores e terão de acompanhar a curva de evolução da tecnologia.

Concluem, que embora não se possa considerar que seja uma tecnologia insegura, tem claramente espaço para evoluir e potencial para melhorar. Atendendo a que também não existe legislação nesse sentido, ainda mais reforça a necessidade de evolução da componente da segurança das instalações, evidenciando um grande potencial de melhoria.

Atendendo a que não foram registadas quaisquer ocorrências, nem anomalias em todo o sistema, durante o período de operação do projeto, existem, no entanto, potenciais ações de melhoria que podem contribuir positivamente para a segurança de todo o sistema.

Sem considerar os custos, a Floene aponta uma clara necessidade de introduzir um maior grau de digitalização e mais controlo sobre o sistema, tornando as redes inteligentes. Na sua perspetiva, quanto mais dados se obtiverem e se conseguirem analisar, mais eficaz será o controlo do sistema.

O aumento de pontos de monitorização, a coleção e a recolha de dados, permitem também uma maior resolução de todo o sistema, sendo possível identificar com detalhe os pontos onde possam ocorrer problemas com uma maior definição e de uma forma mais rápida e eficaz. Comparativamente, assumem que não dispõem do mesmo nível de detalhe em termos de dados disponíveis, que por exemplo a rede elétrica nacional.

Seria também muito importante implementar algoritmos de previsão de ocorrências que mediante alguns indicadores poderão prevenir incidentes. Reforçam que quantos mais dados tiverem à disposição, mais rapidamente e atempadamente as equipas de prevenção poderão atuar de uma forma eficaz garantindo a segurança de bens e de pessoas.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Em termos de “*lessons learned*” no capítulo da segurança, a principal conclusão retirada é que a rede atual, está efetivamente preparada para receber hidrogénio verde em segurança até aos 20%, sem qualquer alteração significativa na infraestrutura existente. Por outro lado, verifica-se que os materiais e equipamentos utilizados demonstraram um bom nível de fiabilidade, e corresponderam às expectativas durante a operação e nos simulacros de ocorrências que foram praticados periodicamente durante a operação da instalação.

O projeto neste momento está sem suspenso devido à necessidade de manutenção dos eletrolisadores. O financiamento previa 2 anos de operação da central, e passados esses dois anos o financiamento terminou e é necessário fazer manutenção aos eletrolisadores.

### 4.3 INEGI - A perspetiva da investigação e desenvolvimento

Para complementar o estudo e obter uma visão acerca do tema sob uma perspetiva mais orientada para o futuro e sob o ponto de vista da investigação, participação e desenvolvimento de novos projetos, foi promovido um contacto com elementos do INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, que constitui um Centro de Tecnologia e Inovação (CTI).

Criado em 1986, está vocacionado para a realização de atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos, orientadas para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral.

Neste tema, o INEGI tem dado um forte contributo para a criação de plataformas tecnológicas colaborativas, apoio à preparação de workshops, elaborado estudos de avaliação económica da penetração do hidrogénio no “*mix*” energético português e viabilidade de utilização de hidrogénio enquanto vetor de armazenamento de energia.

Tem em vista promover a utilização do vetor energético hidrogénio verde no setor industrial e um aumento da competitividade das empresas, enquanto utilizadores e detentores de tecnologias com hidrogénio verde como vetor energético, (INEGI, 2025).

O INEGI também está a participar em estudos de investigação e desenvolvimento de novos materiais e estruturas de armazenamento que têm em vista uma evolução da qualidade dos materiais utilizados neste setor, que incrementam significativamente a segurança nestas instalações, assim como a capacidade de armazenamento a pressões mais elevadas, que resultam no aumento significativo da eficiência global dos processos.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Está ainda a realizar estudos e testes de viabilidade da injeção de hidrogénio na rede de distribuição de gás natural, quanto à sua compatibilidade, à avaliação do impacto da receção do hidrogénio na corrente de gás nas redes de distribuição, nos diversos níveis de pressão, ao nível dos materiais, nos processos de queima, e condições de segurança.

Participa também na construção e operação de bancos de ensaios para testar a injeção de hidrogénio na rede de distribuição de gás natural, simulando as condições das redes metálicas de distribuição e abastecimento.

É responsável também pela definição de requisitos e especificação de futuras infraestruturas e instalações para promotores, de forma a operarem em condições de eficiência e segurança, (INEGI, 2022).

O INEGI tem ainda desenvolvido inúmeras soluções para clientes e parceiros, nomeadamente:

- Desenvolvimento de tecnologias de produção de hidrogénio verde – Eletrolisadores;
- Desenvolvimento de reatores de produção de hidrogénio;
- Desenvolvimento de tecnologias para armazenamento de hidrogénio gasoso a alta pressão;
- Desenvolvimento de queimadores a hidrogénio para utilização nos setores industrial, residencial e de serviços;
- Desenvolvimento de pilhas de combustível;

O INEGI constitui uma das maiores referências em termos de fonte de conhecimento das mais recentes tecnologias nesta área, assim como das perspetivas de futuro desta tecnologia, estando presente direta ou indiretamente nos principais projetos que estão a ser desenvolvidos a nível nacional, prestando um contributo incalculável para a sua promoção e desenvolvimento.

Atendendo à vasta experiência e conhecimento que o INEGI tem sobre este tema, foi pedida a sua colaboração para a realização deste estudo, partilhando a visão de alguns dos elementos que constituem a equipa do Departamento de Gases Renováveis, que se dedicam ao estudo e investigação de todos os temas relacionados com o hidrogénio verde.

No âmbito deste estudo, colaboraram três investigadores:

- Ricardo Barbosa – Coordenador da área de Energia do INEGI;
- Lucas Marcon – Coordenador da área de desenvolvimento de gases renováveis;
- Francisco Machado - Investigador do departamento de gases renováveis do INEGI;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Dedicados ao tema do hidrogénio verde, partilharam o seu conhecimento, não só sobre as perspetivas de futuro e considerações acerca do panorama atual de desenvolvimento desta tecnologia internacionalmente e a nível nacional, mas também partilharam as suas preocupações acerca das dificuldades que se fazem sentir em alavancar os projetos de produção de hidrogénio verde em Portugal.

Abordaram ainda os principais projetos que estão envolvidos, e respetivos estudos de viabilidade, assim como projetos de investigação que levam ao desenvolvimento de novas soluções que podem contribuir decisivamente para uma melhoria significativa em termos de eficiência e de segurança das futuras instalações.

A visita às instalações do INEGI foi efetuada no dia 11 de junho de 2025, contando com a presença de 3 elementos do Departamento de projeto e investigação de gases renováveis, que estão atualmente envolvidos em projetos de licenciamento, consultadoria, estudos de viabilidade de futuras instalações de produção de hidrogénio verde, assim como em projetos de investigação e simulações de novos materiais e configurações de reservatórios destinados ao armazenamento.

Perante a questão acerca da importância do hidrogénio verde no contexto da transição energética num futuro a curto e médio prazo, a opinião dos investigadores é consensual, que terá um papel fundamental e de grande relevância, fazendo parte de um “*mix*” de outros vetores energéticos.

Entendem que uma das mais importantes aplicações para o nosso país será a introdução gradual na infraestrutura existente de distribuição de gás natural, com percentagens cada vez superiores, atendendo às capacidades técnicas e de segurança do sistema.

O consumo de hidrogénio verde como alternativa ao gás natural permitirá, não só a diminuição das emissões de hidrocarbonetos, mas também permitirá reduzir a dependência externa de outros países, na importação de gás natural, permitindo uma maior fiabilidade e independência da rede nacional energética.

Sobre a questão colocada relativa aos principais obstáculos e desafios que se têm deparado com os projetos em curso que estão envolvidos, verifica-se que, tal como já se tinha evidenciado com a revisão bibliográfica, existem alguns fatores decisivos que, impõem barreiras importantes à introdução de novos projetos e ao investimento em massa por parte de diversos promotores neste setor.

O primeiro obstáculo referido pelos investigadores, é o fator económico, pois segundo o que apontaram, ainda não existem definições concretas de regras e legislação, que permitam

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

estabelecer modelos de negócio concretos, nomeadamente as tarifas remuneratórias, financiamentos e quais as suas garantias num determinado espaço temporal.

Esta ausência de definições, impacta com a confiança de investidores neste tipo de projetos, retraindo-os de investir em projetos de grande dimensão. Por outro lado, para obter um modelo de negócio é também necessário reunir um conjunto de “*off-takers*” que assumam o interesse na compra de hidrogénio verde.

Existem outros desafios, mais técnicos, que se relacionam com a compatibilidade de materiais e a necessidade de recorrer a novas soluções para armazenamento e distribuição, com a adoção de pressões mais elevadas, com vista a obter uma maior eficiência global do sistema.

Para tal, o INEGI está a investigar e a desenvolver novas soluções e protótipos de reservatórios, que representam um grande desafio, que sejam mais leves e resistentes a pressões mais elevadas, de acordo com as necessidades de aumentar a sua capacidade de armazenamento para menores volumes.

Por outro lado, procuram-se soluções de materiais, cujas características permitam o contacto direto com hidrogénio em concentrações elevadas, mas que ao mesmo tempo não lhe imponha qualquer tipo de degradação, ou efeitos de fragilização, sempre tendo em conta a perspetiva de viabilidade económica.

Envolvidos em vários projetos de licenciamento perante a Direção Geral de Energia e Geologia, comentam ainda que persiste alguma inércia na análise e aprovação de licenças, que se justificam em parte por causa da ausência de regras claras e objetivas, na definição dos referidos modelos de negócio e da participação financiada por parte do estado, que colocam algumas questões burocráticas na emissão destas licenças.

Concluem que, no final, todos estes fatores terão de se conjugar para permitir que estes projetos comecem a ser implementados, impulsionando outros projetos consequentes.

Complementarmente, referem ainda que a imaturidade desta tecnologia, sobretudo nas potencialidades de evolução dos eletrolisadores, cuja eficiência energética na ordem ronda os 60%, pelo que ainda há um caminho grande para evoluir.

A evolução dos eletrolisadores também deverá incidir sobre a sua capacidade de poderem operar eficientemente com uma maior variação e flutuabilidade de cargas, mediante as necessidades e a disponibilidade de capacidade das centrais de produção de energia renovável nesses períodos.

Também a capacidade de produção destes equipamentos por parte dos seus fabricantes, também será um fator importante para a implementação destes projetos, pois a capacidade atual de fabrico destes equipamentos ainda é muito limitada.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Outro aspeto muito importante referido para dar confiança aos investidores e financiadores deste tipo de projetos é as garantias dos equipamentos muito limitadas, que representam um risco acrescido e que conferem um baixo grau de confiança aos investidores.

Relativamente à adequação da legislação, referem que existe efetivamente uma necessidade de criar um conjunto de normativas específicas para o hidrogénio verde, especificando detalhes de segurança, nomeadamente na definição de distâncias de segurança para fatores externos que possam ser considerados uma fonte de risco, distâncias e modos de acondicionamento dos sistemas de armazenamento, e também o estabelecimento de regras de mercado para estes projetos.

Estas diretrizes devem também conter indicações acerca das especificações mínimas dos equipamentos a utilizar neste tipo de instalações, tendo como base a sua certificação para utilização em ambientes ATEX, assim como regular os métodos de ventilação e deteção de fugas, abordando ainda o tema da liquefação, com o objetivo de diminuir os riscos na sua utilização e armazenamento.

Assumem também, que não bastará todo este conjunto de normativas, pois deverá ser ajustado caso a caso, atendendo às particularidades de cada projeto dadas as suas condicionantes.

Referem a importância de tomar em consideração as lições aprendidas em outras instalações, dentro e fora da Europa,

Um outro aspeto importante, será a criação de grupos de trabalhos especializados que reúnam as competências necessárias para certificar este tipo de instalações, atendendo às especificidades de cada uma, garantindo a sua conformidade com a legislação e as regras e boas práticas de operação do hidrogénio verde.

A importância da criação de incentivos alargados e a criação de um Banco de Hidrogénio Verde Europeu, numa lógica de leilão europeu, seria um passo importante no intercâmbio europeu deste vetor energético.

Nos processos de licenciamento que têm participado, verifica-se também que na ausência de diretrizes claras e objetivas acerca do conteúdo dos mesmos, surgem ainda algumas divergências no tipo de requisitos e exigências dependendo da localidade onde os projetos se inserem, revelando que o poder local por vezes cria obstáculos, sobrepondo-se ao poder central.

Quanto às perspetivas de futuro, acredita-se que havendo um comprometimento europeu e também nacional, a troca gradual de combustíveis fósseis pelo hidrogénio renovável será uma realidade nos próximos anos, tendo um grande potencial em termos de consumidores

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

industriais, assim como no consumo doméstico através da infraestrutura existente da rede de distribuição de gás natural.

De acordo com o transmitido, a nossa infraestrutura de distribuição de gás natural é bastante recente, pelo que deverá estar capacitada para a introdução de percentagens consideráveis de hidrogénio verde, sem que sejam necessárias medidas de conversão ou adaptação. Por outro lado, também indicam que a produção de combustíveis sintéticos em grandes quantidades será uma outra aplicação de enorme potencial para o hidrogénio verde.

Abordou-se ainda o tema dos desafios da escalada da tecnologia do hidrogénio verde para uma produção em grande escala, trazendo à discussão a Mega Central de produção de hidrogénio verde localizada na China, de onde poderemos vislumbrar um exemplo de produção em grande escala baseada inteiramente em energias renováveis.

Através deste e de outros projetos similares, assiste-se a um acentuado crescimento no fabrico de eletrolisadores na China, que comparativamente com a Europa já se encontra num patamar mais avançado, já tendo adotado uma economia de escala, no entanto foram identificados alguns problemas de fiabilidade, revelando que a tecnologia ainda tem de evoluir significativamente para consolidar a sua eficiência e maturidade.

Em termos futuros, referem a possibilidade do surgimento de ecossistemas de hidrogénio verde, da introdução nas instalações de novos compósitos e materiais para armazenamento de alta pressão com pressões nominais acima dos 800 e 1000 bar, mais seguros e mais eficientes.

Apostam ainda no desenvolvimento de novas plataformas de monitorização e desenvolvimento de sensores especializados para diferentes ambientes e condicionantes, que serão fundamentais para reforçar a segurança global das instalações, sempre tendo em vista o desenvolvimento de trabalhos de otimização de sistemas de produção transporte e consumo de hidrogénio verde.

O INEGI colabora com diversas empresas do setor na definição dos requisitos das centrais de produção de H<sub>2</sub> verde, identificando o contexto de cada central e avaliando diversos aspetos técnico-económicos, no sentido de selecionar as melhores soluções a implementar com vista a otimizar o seu funcionamento.

O INEGI esteve também envolvido no estudo promovido pela Portgás para determinar a compatibilidade da infraestrutura de distribuição existente de gás natural, com a inclusão de hidrogénio verde com concentrações de 10%, 20% 50% até 100%, identificando as alterações necessárias a realizar, nomeadamente na substituição de alguns componentes e outro tipo de alterações.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Neste estudo foi concluído que a rede é bastante recente, pelo que não foram identificados nenhuns constrangimentos muito significativos, no entanto os maiores desafios poderão surgir devido à necessidade de adotar maiores caudais a pressões mais elevadas e por isso torna-se necessário garantir que todos os componentes podem abarcar com estes novos requisitos.

Já do ponto de vista doméstico, existe uma garantia dos fabricantes de equipamento de esquentadores, etc, que podem operar com até 23% de hidrogénio, pelo que não irá constituir um impedimento da utilização do hidrogénio verde até essa concentração.

### 4.4 Resultados globais

Através da observação em campo possibilitada pelas visitas aos locais de produção, do contacto direto com diversos intervenientes dos processos industriais, assim como interlocutores de diferentes hierarquias, ocupando funções de direção que detêm uma visão mais estratégica e a longo prazo, foi possível estabelecer relações entre os diversos temas que abrangem as operações com o hidrogénio verde.

Foi ainda possível distinguir algumas diferentes perspetivas em termos das suas condições atuais, e no que cada uma das partes vislumbra para o futuro.

Por outro lado, foi possível enquadrar esta visão sob a perspetiva industrial, com a da investigação e desenvolvimento, sendo perceptíveis algumas divergências em termos de perspetivas futuras, sobretudo no que respeita ao potencial de evolução desta tecnologia que ainda se encontra numa fase muito pouco desenvolvida.

Relacionando a informação recolhida através da pesquisa bibliográfica, com as observações e evidências obtidas pela investigação em campo, e ainda com toda a informação recolhida através das entrevistas efetuadas, foi possível efetuar uma triangulação dos dados, reforçando a sua consistência e veracidade, permitindo retirar conclusões objetivas e com um bom grau de confiança.

Em termos da perceção dos diversos intervenientes acerca da importância do hidrogénio verde e no seu papel na descarbonização da economia, existe uma clara unanimidade em afirmar que efetivamente, este vetor energético, embora não represente por si só uma solução, constitui uma das principais soluções para atingirmos essas metas definidas.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O seu potencial em termos de versatilidade e de capacidade de aplicação em diversos domínios, quer a nível industrial, quer a nível de gestão energética, confere ao hidrogénio verde uma vantagem clara sobre outras fontes de energia.

É evidente um alinhamento entre todos os participantes do estudo, acerca da clara insuficiência da legislação atual, nem adequada para regulamentar as futuras instalações, sobretudo as de grande escala, que inevitavelmente carecerão de requisitos mais elaborados e complexos do que os atualmente impostos.

Existem lacunas a diversos níveis, mas destacam-se a ausência de requisitos obrigatórios para determinados equipamentos, nomeadamente os eletrolisadores, gasodutos, reservatórios de armazenamento e equipamentos de segurança, no que respeita aos seus materiais constituintes, adequabilidade e certificação para utilização com hidrogénio e outras características relevantes para a operação com este gás.

Por outro lado, é necessário estabelecer regras de distanciamento a vias de acesso, fontes de ignição, a fontes de calor, para garantir também uma homogeneização dos requisitos para todas as instalações futuras.

A existência de espaços confinados e locais fechados ou com pouca ventilação deve também ser cautelosamente legislada, com regras específicas e bem detalhadas, pois representam as zonas mais críticas na operação com hidrogénio.

A ausência de legislação constitui efetivamente uma barreira para o arranque desta tecnologia, sendo que existe muito interesse por parte de promotores em participar e investir ativamente na realização de projetos neste setor.

No entanto, na ausência de regras e legislação claramente definida (quer em termos técnicos e de segurança, quer em termos de negócio, nomeadamente quais serão as garantias de financiamento e incentivos), esta inexistência de legislação resulta numa retração por parte dos investidores.

Particularmente, no caso do INEGI, existe uma grande sensibilidade à ainda imaturidade desta tecnologia, que embora o seu conceito já exista há muitos anos, a tecnologia não está devidamente evoluída para se considerar eficiente, ou com um grau de segurança compatível com instalações desta natureza em grande escala.

O contributo da Floene neste sentido também é de grande relevância ao partilhar os resultados e as lições aprendidas do seu projeto de produção, distribuição e consumo, no qual retrata toda a cadeia de valor do hidrogénio verde, permitindo vislumbrar o comportamento destes sistemas e antever potenciais riscos e problemas de segurança que inevitavelmente irão surgir.

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

Todos os intervenientes tiveram parte na avaliação das infraestruturas existentes em termos de compatibilidade com a utilização do hidrogénio, sendo que no caso do INEGI, o seu contributo em termos de investigação foi decisivo, pois esteve envolvido diretamente no estudo realizado a nível nacional acerca das condições de recetividade da infraestrutura de gás natural à integração de hidrogénio verde.

No caso do projeto da Floene, contribui com uma vertente mais prática, no caso do seu projeto piloto no Seixal que esteve em funcionamento por um período de dois anos e permitiu recolher informação e dados reais do seu comportamento.

É de consenso entre todas as partes, que embora não se possa dizer que as instalações atuais não são seguras, a verdade é que os métodos de segurança existentes são apenas adequados a instalações de pequena dimensão e de certa forma bastante controlados.

Com a adoção de uma produção em grande escala, será necessário ir muito mais além e desenvolver novos métodos e sistemas mais complexos e dinâmicos para terem um resultado eficaz em termos de segurança das instalações, pessoas e bens.

### 5. Conclusões

O presente trabalho foi resultado do desenvolvimento de um conjunto de etapas, assentes sobre uma metodologia previamente definida, que procurou informar e destacar um tema que está bem atual no contexto global, embora ainda numa fase inicial do seu desenvolvimento.

Mais concretamente, pretendeu demonstrar a importância de investigar e desenvolver as técnicas, procedimentos e regras, ainda numa fase precoce, correspondente ao início da curva ascendente da evolução da tecnologia, discutindo as dificuldades, os riscos, as ferramentas e a necessidade de garantir a segurança, o bem-estar e a saúde dos intervenientes, nos processos relacionados com o hidrogénio verde, que poderão ter impacto na sociedade em geral.

#### **Principais contributos do trabalho e implicações práticas e teóricas**

O contributo deste estudo focado na segurança em operações com o hidrogénio verde, estende-se tanto no plano académico e científico, como no plano prático e operacional, constituindo um tema ainda pouco consolidado em Portugal.

O enquadramento teórico, complementado com a investigação em campo, e respetivas conclusões e oportunidades de melhoria, representam uma fonte de conhecimento académico para estudantes, investigadores e profissionais que necessitem de compreender não apenas o potencial energético do hidrogénio, mas também as implicações da sua utilização em termos de segurança, evidenciando diversos aspetos que devem ser tomados em consideração no manuseamento de hidrogénio verde.

Entende-se que esta dissertação contribui para destacar a sua importância estratégica no contexto atual da transição energética e descarbonização, evidenciando as metas previstas para o efeito e apontando os benefícios para os diversos setores na sua utilização, mas também dar a conhecer aspetos práticos atuais na área da segurança em operações com hidrogénio verde.

No que respeita à questão normativa, o contributo deste estudo prende-se com a identificação e sistematização da legislação nacional e internacional aplicável ao hidrogénio verde, identificando lacunas e desafios de harmonização regulatória, alertando para a necessidade de criar um quadro normativo mais seguro e robusto, adaptado à utilização do hidrogénio nas centrais de produção e rede de distribuição, assim como à realidade portuguesa.

O presente estudo contribui ainda para destacar as propriedades do hidrogénio que mais impactam com a segurança, relacionando-as com os riscos específicos associados ao longo da

sua cadeia de valor e respetivos desafios de segurança resultantes, constituindo um dos objetivos propostos.

Em termos práticos, este estudo contribui ainda para evidenciar os riscos inerentes ao manuseamento de hidrogénio verde, apontando as medidas preventivas atualmente praticadas em instalações reais, a descrição de sistemas de monitorização, estratégias de mitigação e necessidades de formação, permitindo às empresas ou técnicos de segurança apoiar a elaboração de políticas de segurança, na conceção de protocolos operacionais, planos de manutenção e planos de emergência, aumentando a robustez das práticas de prevenção de acidentes.

A análise dos resultados e as oportunidades de melhoria identificadas contribuem ainda para criar uma base de discussão para o desenvolvimento de investigação relativa a temas de segurança, e impulsionar estudos futuros em áreas como a padronização de procedimentos e normas, protocolos de segurança, desenvolvimento de materiais mais seguros ou criação de novos sistemas de monitorização e segurança das infraestruturas, ligando o meio académico, industrial e regulatório.

Do ponto de vista prático, esta compilação de requisitos pode prestar recomendações úteis para intervenientes nos processos, operadores e empresas, contribuindo para criar condições para um desenvolvimento seguro e sustentável do setor.

### **Conclusões finais**

Numa primeira fase, o estudo realizado recorreu a um período de pesquisa e respetivo estudo de documentação bibliográfica, recolhida a partir de diversas fontes, nomeadamente livros, artigos científicos, jornais, legislação, informação disponibilizada pelas empresas do setor, que constituiu a base do estudo e permitiu enquadrar o tema desta dissertação no contexto atual e salientar a sua importância e relevância para um futuro a curto/médio prazo.

A participação em seminários, webinários e ainda formações constituíram também uma importante fonte de informação, que para além de muito rica e atual, conta com o relato de diversos intervenientes diretos nos processos.

Esta estratégia de participação neste tipo de eventos permitiu também o contacto direto com as principais empresas e entidades regulatórias e de investigação, que estão envolvidas em projetos com hidrogénio verde, o que se revelou de extrema importância para estabelecer os contactos necessários para a realização das entrevistas e visitas às respetivas instalações.

Uma das primeiras conclusões, partilhada pela unanimidade dos intervenientes, seja da área da investigação, quer a nível de direção, até às áreas mais operacionais, é que efetivamente,

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

o tema da segurança nestes projetos, além de ser considerado da mais alta prioridade, assenta essencialmente sobre toda uma lógica preventiva, em que todos os esforços se desdobram para a prevenção de acidentes e incidentes.

Conclui-se ainda que, consensualmente, todos os elementos que contribuíram para este estudo, assim como a generalidade da documentação bibliográfica consultada, refere o hidrogénio como um dos vetores energéticos com maior potencial para enfrentar o processo de descarbonização que enfrentamos.

O hidrogénio verde tem efetivamente características importantes e até únicas, para o destacar entre outros vetores energéticos alternativos, nomeadamente a ausência total de emissões poluentes na sua combustão, assim como no processo de produção, sendo possível recorrer inteiramente a fontes de energia 100% renováveis para o obter.

É evidente também que apesar dos benefícios, o hidrogénio é altamente volátil e inflamável, exigindo rigorosos padrões de segurança para evitar fugas e explosões.

Perante os testemunhos dos intervenientes que colaboraram neste estudo, verifica-se que efetivamente ainda permanecem importantes barreiras que têm atrasado o arranque destes projetos, algumas que se prendem com algum grau de desconhecimento perante esta tecnologia e seus riscos, lacunas nas diretivas de segurança e operações, mas também dificuldades com a obtenção de licenciamento das instalações e dificuldades na integração adequada das particularidades das operações com o hidrogénio com a legislação de segurança industrial existente.

### Legislação

Conclui-se também que a falta de regulamentação, elevados custos resultantes de produção sem estarem claramente definidas as compensações governamentais, com a dificuldade na definição de modelos económicos viáveis e a falta de infraestruturas, são desafios incontornáveis que terão de ser devidamente tratados num futuro próximo.

Relativamente ao tema da legislação, conclui-se que à data, não existe legislação específica suficiente para o hidrogénio verde, no que respeita às regras técnicas de operação e aspetos de segurança a respeitar em termos legais, nem regras orientadoras para a criação de modelos de negócio sólidos e sustentáveis.

Esta inexistência de legislação adequada, deve-se em parte a que a sua utilização ainda é muito residual, e por isso o universo deste tipo de projetos ainda não é significativo, nem tem peso suficiente para despoletar as ações necessárias para desenvolver legislação específica sobre o tema.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Também por esse motivo, não existe um historial robusto para retirar conclusões acerca de determinados aspetos mais específicos acerca da utilização com o hidrogénio verde.

Conclui-se por isso que será fundamental uma partilha de conhecimento e uma cooperação internacional para o desenvolvimento de normas, que não só abranjam todos os critérios de todas as partes envolvidas, mas que igualmente não constituam barreiras adicionais e não introduzam demasiada complexidade, sendo para isso necessário estabelecer compromissos entre o cenário desejável, e o que é adequado na prática.

Neste período de transição e de início dos primeiros projetos, os documentos regulatórios aplicáveis assentam sobretudo em diretivas da União Europeia sobre a utilização de hidrogénio e outros gases equivalentes, em legislação nacional que regula a utilização de gás natural, e sobre a legislação de gases comprimidos e ambientes ATEX em geral.

De acordo com as informações recolhidas por parte dos diversos intervenientes nesta atividade, existe igualmente um consenso em admitir que é essencial que seja criado um conjunto de legislação específico para este setor, não só para garantir níveis de segurança mínimos por parte das instalações, mas também para regular as suas operações e ditar as regras do mercado.

É também consensual para todos, que esta legislação, constitui um fator fundamental para transmitir conforto aos investidores, e daí nascerem mais projetos desta natureza.

Atendendo à inevitável evolução da tecnologia que envolve o setor de produção, transporte e armazenamento do hidrogénio verde, e com base nas lições aprendidas através de casos de estudo de projetos piloto em operação, é expectável que num futuro próximo seja criada uma primeira versão de um conjunto de diretrizes regulatórias que incidam especificamente no tema do hidrogénio verde.

Nelas devem ser atendidos aspetos fundamentais de segurança, como a definição dos patamares de “blending” do hidrogénio, autorizados para cada tipo de aplicação, os aspetos de segurança que deverão ser respeitados para cada um desses casos de forma garantir a segurança das operações, distâncias de segurança que devem ser acauteladas em relação a vias de acesso, vias rodoviárias, fontes de ignição, etc.

Também para garantir os aspetos de segurança em termos de armazenamento, verifica-se que é fundamental estipular as regras e procedimentos para essas operações, e quais as condições de armazenamento permitidas e consideradas seguras, estabelecendo limites regulamentares de pressão, concentração de hidrogénio e requisitos dos locais de armazenamento, entre outras variáveis.

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

Acerca do tema dos materiais, pode-se concluir que representa um tema sensível, no qual a certificação do tipo de materiais permitido utilizar nas redes de distribuição e armazenamento, é também um fator de grande preocupação, que deve ser tomado em consideração no projeto desta natureza, pois os fenómenos de degradação descritos, representam efetivamente um sério risco para a ocorrência de acidentes, caso não sejam tomadas as devidas precauções.

Neste campo estão a ser desenvolvidos estudos para criar novos tipos de reservatórios, com novos desenhos e materiais mais adequados para suportar pressões mais elevadas, e ao mesmo tempo conferir-lhe a necessária resistência mecânica a pressões, vibrações, e resistência à degradação e fragilização dos materiais por contacto com o hidrogénio, contribuindo decisivamente para elevar os patamares de segurança atuais.

### **Metodologia**

Verificou-se que através da adoção de uma abordagem qualitativa, combinando a pesquisa bibliográfica, com entrevistas a intervenientes no processo e investigação em campo em instalações de produção de hidrogénio verde, foi possível recolher informações de diferentes naturezas, a nível teórico e a nível mais prático.

Comprovou-se que esta triangulação de métodos permitiu não apenas validar a informação teórica, mas também confrontá-la com a realidade operacional, prestando uma visão completa dos aspetos de segurança.

A informação recolhida através da pesquisa bibliográfica, está alinhada com os resultados das entrevistas conduzidas com os elementos do grupo de investigação e desenvolvimento que colaboraram neste estudo, de gestão de topo e com os intervenientes no processo operacional que incorporam perspetivas reais de profissionais do setor.

As entrevistas e a investigação em campo permitiram uma aproximação entre a teoria e a prática, cujo alinhamento comprova o rigor e a validade teórica das informações recolhidas, ao demonstrar a coerência entre os conceitos e aspetos teóricos e a realidade operacional, comprovando-se também a eficácia do método adotado.

### **Segurança na implementação da tecnologia**

Através dos relatos e evidências demonstradas pelos intervenientes que colaboraram no estudo, conclui-se ainda que a nossa rede atual de distribuição de gás tem efetivamente capacidade em termos técnicos de receber uma mistura de até 20% de hidrogénio com gás

natural, sem comprometer a segurança global do sistema, nem ter necessidade de introduzir alterações significativas nessa mesma infraestrutura.

Sobre este tema, comprovou-se que o projeto piloto da Floene no Seixal, foi particularmente importante, pois foi possível avaliar e testar soluções em ambiente controlado, durante um período significativo para avaliar o seu comportamento e comprovar em condições reais a adequabilidade e segurança do sistema com a presença de hidrogénio verde.

Estes dados e conclusões retiradas, constituem lições aprendidas, que são fundamentais para a implementação em larga escala noutros projetos, servindo de referência para a consolidação de um setor seguro e competitivo.

Através de diversa literatura, suportada pelas entrevistas realizadas, pode-se retirar ainda a conclusão de que, para uma integração do hidrogénio verde como um vetor do sistema energético global, e para uma implementação bem-sucedida destes projetos nas sociedades, devem ser promovidos meios de comunicação transparentes com os habitantes, trabalhadores e com o próprio setor, partilhando conhecimento, e sobretudo práticas de segurança.

Assim, pode concluir-se que a segurança em operações com hidrogénio verde não deve ser vista apenas como uma obrigação legal, mas como um fator crítico de viabilidade e aceitação social desta tecnologia. Garantir a confiança da sociedade, dos investidores e dos decisores políticos exige transparência, padronização e monitorização contínua dos riscos.

### **Métodos de prevenção de acidentes**

Foi evidenciado que apesar das propriedades do hidrogénio que potenciam os riscos associados às suas operações e manuseamento, existem diversos métodos possíveis para a prevenção de acidentes com o hidrogénio verde, incluindo combinações de mecanismos, métodos, procedimentos, e determinados equipamentos e materiais, que têm a capacidade de os controlar eficazmente, se implementados adequadamente e atempadamente.

Um dos mais eficazes e que representa um baixo investimento financeiro, será garantir a diminuição da concentração de hidrogénio e implementar sistemas de ventilação eficazes privilegiando o escoamento natural do hidrogénio para a atmosfera, para evitar acumulações potencialmente explosivas, assim como eliminar possíveis fontes de ignição na sua proximidade.

Atendendo a que a produção de hidrogénio em Portugal ainda é muito residual, torna-se evidente que os sistemas de segurança existentes implementados neste tipo de instalações carecem também de uma evolução tecnológica expressiva, sendo ainda considerados em alguns casos bastante rudimentares, conforme relatos de operacionais.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O estudo realizado permite concluir ainda que o hidrogénio verde representa simultaneamente uma oportunidade estratégica para a transição energética em Portugal, assim como um desafio complexo em matéria de segurança operacional, atendendo à previsão de crescimento desta tecnologia para uma produção em grande escala.

Com a transição para uma produção em grande escala, estes sistemas de segurança não serão suficientes para gerir uma maior e substancial quantidade de dados e incapazes de em tempo real, tomar decisões autonomamente e de uma forma inteligente.

De acordo com a visão partilhada pelos intervenientes no processo e envolvidos na investigação sobre o tema, existe, pois, a necessidade destes sistemas de segurança se transformarem em redes digitais complexas, interligadas e dotadas de algoritmos sofisticados dotados de inteligência artificial, sensores e equipamentos de monitorização em número suficiente, para a recolha de dados com uma grande resolução e detalhe, retratando o mais fielmente possível e em tempo real, o estado de todo o sistema.

Portugal encontra-se efetivamente numa posição privilegiada para se afirmar como um líder na transição energética através da adoção do hidrogénio verde como um dos vetores energéticos em destaque.

Os desafios em termos de segurança em toda a sua cadeia de valor, desde a produção, armazenamento e distribuição até ao seu consumo final, serão crescentes ao longo da curva de aumento na sua produção em escala.

Esta necessidade crescente de novas técnicas, materiais e métodos para contrariar os riscos crescentes neste setor, implicará um grande investimento por parte das organizações e um reforço sistemático e intensivo das práticas de segurança, do surgimento de legislação adequada e detalhada, de uma fiscalização e certificação das instalações, e de uma forte componente de investigação científica capaz de dar resposta às rápidas solicitações do mercado.

Fica ainda evidenciado que será fundamental uma articulação mais estreita entre as diversas entidades reguladoras, operadores industriais e instituições de investigação e desenvolvimento, através da criação de redes colaborativas e plataformas de partilha de conhecimento e informação, contribuindo também para a uniformização de procedimentos e partilha de boas práticas operacionais.

Pelo exposto, conclui-se que o futuro do hidrogénio verde em Portugal e a sua consolidação como vetor energético, embora promissor, estará dependente não apenas da viabilidade técnica e económica da tecnologia propriamente dita, mas também da capacidade de garantir operações seguras, reguladas e confiáveis.

### **Trabalhos no futuro**

Após a conclusão deste estudo, é possível identificar, no entanto, que surgem novas questões que devem ser estudadas, com vista a aprofundar o detalhe do conhecimento acerca dos temas de segurança, relacionados com o manuseamento de hidrogénio verde, e o acompanhamento próximo da expectável evolução tecnológica que trará novos desafios de diversas naturezas.

### 6. Propostas de melhoria e projetos futuros

#### 6.1 Propostas de melhoria

Com a perspetiva de um crescimento em escala das instalações de produção e armazenamento de hidrogénio verde, torna-se necessário otimizar os processos existentes e recorrer à evolução tecnológica, à inteligência artificial e a sistemas de controlo e monitorização avançados, com vista a reforçar a segurança na cadeia de valor do hidrogénio verde.

A evolução contínua destas tecnologias permite o desenvolvimento de novos materiais, mais adequados à utilização com hidrogénio, que aumentem o grau de segurança e longevidade das suas infraestruturas, e contribuir também para o reforço da segurança de pessoas e bens.

O recurso à Inteligência Artificial na cadeia de valor do hidrogénio verde, poderá otimizar cada etapa do processo de produção e armazenagem do hidrogénio verde, pois através da análise simultânea de diversas variáveis recolhidas em tempo real, será possível otimizar não só parâmetros operacionais, mas também ajudar a antecipar eventuais problemas que possam originar falhas no sistema, assim como potenciais acidentes.

Por outro lado, o desenvolvimento de sistemas de monitorização cada vez mais precisos e dotados de sensores mais avançados, complementados com plataformas de recolhas de dados em tempo real, permitem um acompanhamento contínuo e preciso do processo produtivo.

Através de um conjunto de dados reais e fidedignos, é possível recorrer a algoritmos de análise preditiva para garantir decisões mais rápidas, informadas e eficazes, à semelhança do que se está a implementar na rede elétrica nacional.

Estes sistemas de monitorização avançados são fundamentais para detetar precocemente qualquer defeito na instalação, assim como prever falhas no sistema antecipadamente, e disponibilizar todos os dados e informação recolhida de uma forma segura e fiável para algoritmos que definem os procedimentos a tomar mediante a interpretação de todas estas variáveis.

Atendendo à pesquisa bibliográfica e à partilha de soluções por parte dos intervenientes nas áreas operacionais, de gestão de topo e também na área de investigação e desenvolvimento no setor da produção de hidrogénio verde, procurou-se apresentar uma compilação de um conjunto de oportunidades de melhoria, relacionando ainda algumas soluções implementadas noutros setores ou campos de aplicação, que possam ser aplicáveis neste contexto.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

O objetivo destas oportunidades de melhoria será apresentar um conjunto de possíveis soluções que procuram otimizar determinados processos, nomeadamente nos seus aspetos de segurança, para minimizar eventuais falhas ou áreas que apresentem riscos.

A adoção de algumas destas medidas terá de ser avaliada pelos órgãos decisores atendendo a diversos fatores, que contrapõem os benefícios e os custos da sua implementação.

No caso das infraestruturas de produção e armazenamento de hidrogénio verde, é essencial uma melhoria contínua e exaustiva das condições de segurança ao longo da sua cadeia de valor, garantindo a sua viabilidade e aceitação em larga escala.

As propostas de melhoria abaixo indicadas, referem-se a uma compilação de métodos, procedimentos e estratégias que algumas empresas de diferentes setores já praticam, ou em fase de investigação e desenvolvimento, ou ainda adaptadas de outras aplicações, que poderão servir de base para uma investigação e desenvolvimento mais detalhados.

As oportunidades de melhoria estão agrupadas por tema, nomeadamente as que se referem a propostas orientadas para a componente técnica e operacional, para a componente legislativa e recomendações na seleção de materiais e determinados tipos de equipamentos e pormenores a ter em atenção em fase de projeto das instalações.

Complementarmente ainda são apresentadas conjuntos de oportunidades de melhoria acerca dos temas relacionados com formações, métodos e estratégias para auxiliar uma operação segura por parte dos operacionais.

### 6.2 Oportunidades de melhoria nos processos operacionais

- Implementação de sistemas de monitorização inteligentes e deteção de fugas através da adoção e desenvolvimento de sensores interligados, respondendo em tempo real, com capacidade de identificar fugas de hidrogénio, e sensíveis a variações de pressão, temperatura, atendendo às suas propriedades de ser incolor e inodoro;
- Integração de sistemas de controlo e alerta automáticos e remotos, recorrendo a algoritmos baseados em inteligência artificial, permitindo diagnóstico automático e prevenção proativa de falhas;
- Instalação de sensores distribuídos por zonas para a deteção precoce de fugas de hidrogénio;
- Adoção de metodologias de segurança preditivas, analisando padrões históricos e dados em tempo real, para antecipar possíveis falhas e propor ações corretivas automáticas,

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

tais como ativação da ventilação, alarmes, atuação de válvulas de segurança, entre outras;

- Adoção de novas tecnologias e sistemas automáticos de monitorização contínua, controlo e alerta para prevenção e intervenção no caso de ocorrência de acidentes ou de emergência;
- Instalação de barreiras físicas ou zonas de contenção monitorizadas, que despoletam ações e alertas automáticos, mediante parâmetros de risco identificados pelos sensores;
- Instalação de válvulas de segurança inteligentes em pontos estratégicos da rede de gasodutos, para seccionar defeitos, sem comprometer a segurança ou o abastecimento da restante instalação;
- Identificação no local de todos os componentes de segurança com corte remoto;
- Reservatórios e válvulas equipados com sistemas de alívio de pressão integrados e dotados de sensores de monitorização e medidas em tempo real;
- Manutenção preditiva e preventiva, baseada em registos históricos de padrões de temperatura, pressão e outras variáveis, registados por sensores específicos para o efeito;
- Recurso a plataformas informáticas que recolhem e avaliam variáveis operacionais, para recomendar ações preventivas em tempo real, mediante os dados recebidos;
- Equipamentos com redundância de segurança e tolerância a falhas;
- Realização periódica de testes de compatibilidade de equipamentos de segurança em ambientes simulados, para garantir a boa operação de todo o sistema como um todo;
- Recurso a drones equipados com câmaras termográficas e sensores de deteção de hidrogénio, para deteção de pontos de fuga ou potenciais incêndios, realizando vigilância remota de toda a rede de gasodutos em locais de difícil acesso ou que envolvam risco para as equipas de intervenção;
- Implementação de sistemas de combate a incêndios específicos para hidrogénio, recorrendo a agentes gasosos inertes e sensores de chama;
- Instalação de sistemas automáticos inteligentes de ventilação e contenção, no caso de fugas, interligados com sensores de deteção específicos para a presença de hidrogénio;
- Recurso a materiais auto-selantes para utilização em tubagens e reservatórios de armazenamento (já em investigação e desenvolvimento);
- Implementação de sistemas de monitorização contínua da qualidade do ar em zonas confinadas;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Implementação de sinais luminosos e sonoros inteligentes, facilmente identificáveis no caso de ocorrência de acidentes ou fugas;
- Em determinados locais, deverá ser equacionada a instalação de barreiras térmicas automáticas, acionadas no caso de ocorrência de incêndios, que possibilitem a contenção e propagação de chamas ou explosões;
- Realização de testes de resiliência cibernética nos sistemas de controlo e monitorização do hidrogénio para prevenir ataques informáticos capazes de interferir com o normal funcionamento da instalação;
- Desenvolvimento de plataformas informáticas que registam, analisam e reportam lições aprendidas de incidentes, para uma rede partilhada com outras empresas do setor;
- Desenvolvimento de algoritmos que identifiquem autonomamente repetição de procedimentos errados e despoletam alertas, no sentido de evitar repetição de falhas;
- Estabelecimento de canais de comunicação em tempo real com as operadoras das redes elétricas para coordenarem os sistemas de hidrogénio e redes elétricas para evitar sobrecargas e falhas de sincronização;
- Implementação de algoritmos de segurança para ajustar a produção de hidrogénio às flutuações de energia da rede;
- Recurso a aplicações informáticas com acesso à localização GPS em tempo real, para criar zonas de segurança virtuais que alertam operadores ao entrarem em áreas críticas;
- Recurso a materiais que mudam de cor ao contacto com hidrogénio ou variações de temperatura, facilitando a deteção visual de fugas;
- Implementação de estratégias para a redução da exposição humana em tarefas de risco elevado;
- Recurso a modelos 3D interativos das instalações, para visualizar zonas de risco e rotas de evacuação;
- Atribuição de passaportes digitais de segurança para cada equipamento presente, onde rapidamente se pode aceder ao seu histórico completo de inspeções, falhas e atualizações;
- Identificação de todos os espaços confinados, através de sinalética visual e luminosa, advertindo para os potenciais perigos envolvidos;
- Recurso a técnicas avançadas de inspeção, com ultrassons, termografia, raios-x, para monitorizar a integridade de tanques e tubagens;
- Dotação da instalação e das equipas de segurança com câmaras termográficas específicas para o hidrogénio, que deverão estar instaladas em diversos pontos que

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

abranjam a totalidade da instalação, assim como meios portáteis para poderem ser utilizadas pelos operadores;

- Implementação de algoritmos de análise automática de imagens com reconhecimento automático de uma situação de perigo;
- Colocação de cartazes ilustrativos de recomendações e procedimentos de segurança próximos de zonas de operação ou consideradas mais sensíveis;
- Afixação de pictogramas e símbolos gráficos de uso internacional que ilustram as características e riscos da operação com hidrogénio verde;
- Criação de fichas de informações contendo as características físico-químicas do produto e principais cuidados no seu manuseio;
- Identificação através de sinalética ou marcas, das distâncias mínimas de segurança a serem respeitadas pelos operacionais, assim como zonas de passagem de acordo com o nível de risco da zona envolvente;
- Identificação de todas as possíveis fontes de ignição com sinalética apropriada;
- Recurso a equipamentos dotados de invólucros à prova de explosão, projetados para conter eventuais explosões internas sem propagação para o exterior de fragmentos perigosos;
- Minimização de pontos elétricos perigosos, evitando a instalação de tomadas e interruptores dentro da área de risco ou posicionando-os em locais mais seguros;
- Recorrer a policarbonatos ao invés do vidro, devido à sua maior flexibilidade e com menor risco de quebra;
- Posicionamento das condutas em zonas elevadas próximas do teto, aumentando o distanciamento aos equipamentos elétricos;
- Utilização de para-raios ionizantes nas proximidades das instalações a proteger, conferindo proteção máxima contra descargas atmosféricas;
- Promoção de intercâmbios de formações e estratégias de ensinamento entre empresas e entidades formadoras;
- Efetuar simulações e modelização do sistema de produção e respetivas redes de distribuição, no sentido de analisar quais os pontos mais críticos da instalação e criar simulações de possíveis incidentes, com vista a antever esses possíveis cenários e estabelecer medidas preventivas para atenuar os seus efeitos;
- Estabelecimento de diretrizes mais precisas sobre misturas de hidrogénio em condutas e requisitos de testes de compatibilidade do hidrogénio com estes materiais;

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Desenvolvimento de ferramentas preditivas e de design de materiais, capazes de mitigar a degradação causada pelo hidrogénio;

### 6.3 Oportunidades de melhoria na componente legislativa e normativa

- Criação de uma estrutura de certificação sólida, essencial para definir normas claras sobre produção, armazenamento e utilização, garantindo segurança nas operações com o hidrogénio verde;
- As operações com o hidrogénio deverão ser restritas a aplicações meramente profissionais, reforçando protocolos de segurança;
- Imposição de procedimentos de licenciamento claros e objetivos que conduzam à desburocratização e aceleração dos processos, assegurando o cumprimento das legislações nacionais e europeias, sem comprometer a segurança e sustentabilidade ambiental;
- Criação de organismos de certificação e quantificação dos efeitos da presença do hidrogénio na degradação nas infraestruturas;
- Estabelecimento de regulamentação acerca dos critérios de integração do hidrogénio com o gás natural, com diretivas detalhadas, baseando-se em resultados de instalações e projetos piloto para viabilizar sua escalabilidade (Caso de estudo da Floene);
- Normalização das diretivas nacionais com as diretivas da União Europeia para hidrogénio verde e respetivas misturas com outros gases, incluindo requisitos para a infraestrutura de gasodutos;
- Definição de legislação com regras para os layouts das infraestruturas e respetivas distâncias mínimas de segurança;
- Diretivas para a obrigatoriedade do fornecimento aos Estados-Membros e organizações, de relatórios detalhados e completos acerca de incidentes ocorridos, não só os relatórios preliminares emitidos imediatamente a seguir às ocorrências, mas também um relatório completo emitido posteriormente, incluindo as respetivas causas e medidas implementadas após o acidente;
- Desenvolvimento de normas internacionais específicas para cada etapa da cadeia (produção, compressão, transporte, abastecimento);

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Implementação de mecanismos de controlo e apoio à construção de unidades de produção e armazenamento longe de zonas densamente povoadas e em zonas que não apresentam riscos acrescidos para a população;
- Harmonização de sinalética de segurança, formações e procedimentos de emergência;
- Estabelecimento de certificações obrigatórias com programas de qualificação reconhecidos internacionalmente para operadores e técnicos que lidam com hidrogénio;

### 6.4 Oportunidades de melhoria no projeto e seleção de equipamentos

- Incorporação de princípios de segurança já comprovados e regulamentares desde a fase inicial de projeto de conceção de equipamentos e instalações;
- Avaliação de riscos integrada no desenho dos processos, reduzindo a necessidade de correções posteriores;
- Seleção de materiais adequados e resilientes, como ligas metálicas resistentes à fragilização por hidrogénio, para assegurar a integridade dos equipamentos;
- Recurso a novos materiais compósitos resistentes à fragilização por hidrogénio e com um grau de impermeabilidade elevado à passagem das moléculas de hidrogénio;
- Implementação de reforços e tratamentos dos revestimentos internos dos reservatórios e das condutas, evitando o surgimento de corrosão e falhas estruturais;
- Planeamento para questões relacionadas com o fim de vida útil para instalações e equipamentos de hidrogénio, e reciclagem de materiais;
- Criação de zonas industriais seguras com infraestruturas dedicadas ao hidrogénio;
- Definição das zonas de implantação das instalações atendendo aos sistemas de classificação de risco urbano e industrial;
- Recurso a simulações informáticas para prever comportamentos em caso de incêndio, explosão ou falha de contenção dos sistemas de segurança;
- Implementação de tecnologias de rastreabilidade digital, para garantir a integridade dos dados de segurança em toda a cadeia de valor;
- Registo digital de inspeções, manutenções e incidentes com salvaguarda de informação;

### 6.5 Oportunidades de melhoria nas políticas internas das organizações

- Promoção de formações técnicas especializadas que garantirão a existência de profissionais qualificados, para lidar com os desafios técnicos e de segurança dos projetos de hidrogénio;
- Adoção de programas de formação contínua para os operacionais e técnicos de segurança, particularmente nas técnicas e procedimentos a adotar na resposta a emergências e operações seguras com o hidrogénio;
- Recurso a simulações de cenários de risco para treino prático;
- Introdução de metodologias para enriquecimento dos Sistemas de Gestão de Segurança globais, criando redes de partilha de boas práticas e lições aprendidas entre instalações e os Estados-Membros, facilitando o intercâmbio de informações e estratégias eficazes;
- Implementação de instrumentos para introduzir revisões contínuas de riscos, suportada por softwares ou na utilização de tecnologias avançadas e métodos de avaliação de riscos, recorrendo a inteligência artificial e modelização de cenários de acidentes mais complexos e detalhados;
- Promoção de formações rigorosas e cuidadas dos operadores, para garantir um manuseio seguro, reduzindo falhas humanas e melhorando a eficiência operacional;
- Criação de mecanismos automáticos e de controlo de manutenção de base de dados, sobre acidentes industriais graves, garantindo a sua permanentemente atualização, desenvolvendo as existentes atualmente, que incluem informações ainda limitadas;
- Implementação de bases de dados interoperáveis que centralizam informação de diferentes etapas da cadeia e facilitam auditorias de segurança;
- Aplicação de modelos preditivos de risco com base em dados operacionais, não só da própria empresa, mas recorrendo a bases de dados internacionais, que contêm diversas informações acerca das causas, consequências e dados estatísticos. A criação destes modelos, permite uma avaliação de risco mais ajustada e detalhada;
- Avaliações de risco deverão ser mais detalhadas, incluindo análise aos impactos socioeconómicos e ambientais dos acidentes, para atenuar as consequências a longo prazo dos acidentes industriais;
- Recurso a informações resultantes dos relatórios de segurança emitidos após incidentes ocorridos, criando uma fonte comum para retirar informação partilhada pelas organizações, melhorando ainda a partilha e comunicação de incidentes, dos quais nenhuma propriedade foi danificada e nenhum ferimento pessoal ocorreu, mas onde

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

danos ou ferimentos poderiam ter ocorrido, cujas informações resultantes são de grande importância para partilhar em termos de lições aprendidas em toda a União Europeia;

- Relativamente aos relatórios propriamente ditos, estes também poderão ser alvo de melhorias, nomeadamente quanto ao seu detalhe, objetividade e de uma homogeneização facilitando a sua interpretação, sobretudo com a referida partilha entre organizações;
- Criação de plataformas partilhadas entre trabalhadores, engenheiros e gestores, com o objetivo de partilhar opiniões, sugestões e perceções de risco em tempo real;
- Reforço de auditorias internas ou externas por parte de entidades independentes, a fim de obter uma visão imparcial e abrangente.
- Estabelecimento de planos de certificação de equipamentos e processos segundo normas internacionais, garantindo a sua adequabilidade e conformidade com as mais recentes e principais diretrizes de segurança;
- Promoção de certificações reconhecidas internacionalmente para o Sistema de Gestão da Segurança, com vista a elevar os padrões de eficácia e solidificar a sua confiança nos mercados;
- Automação de processos críticos para minimizar a exposição humana a locais ou operações de risco;
- Realização de simulações de treino e formação das equipas de intervenção recorrendo a modelos de realidade virtual;
- Realização de simulações de fugas, explosões e evacuação integrados com planos de emergência municipais e industriais, com o envolvimento de populações vizinhas em exercícios de emergência;
- Promoção de campanhas de sensibilização pública sobre o uso seguro do hidrogénio.
- Implementação de uma cultura de transparência na comunicação de incidentes e boas práticas entre empresas e autoridades;
- Criação de protocolos conjuntos entre empresas, bombeiros, autoridades locais e hospitais para resposta rápida a incidentes;
- Avaliações de risco dinâmicas com base em condições operacionais variáveis;
- Desenvolvimento de sinergias conjuntas com outras organizações para a adoção conjunta de procedimentos de segurança, com infraestruturas críticas como portos marítimos, ferrovias e “hubs” energéticos;

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

- Desenvolvimento de procedimentos operacionais dinâmicos, que se ajustem automaticamente com base em condições ambientais e operacionais (temperatura, pressão, humidade);
- Promoção de programas de sensibilização da segurança, para reduzir comportamentos de risco e promover atitudes proativas;

### 7. Referências bibliográficas

#### 7.1 Bibliografia

Bardin, Laurence – *Análise de Conteúdo*, 1977 – Lisboa Edições 70.

Bauer, M. & Gaskell, G. - *Entrevistas individuais e grupais*. In *Pesquisa Qualitativa com Texto, Imagem e Som. Um manual prático*, 2003 - Petrópolis: Editora Vozes.

Bauer, Martin W. & Gaskell - George. *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som*. Tradução de Pedrinho A. Guareschi., 2002. Petrópolis: Editora Vozes.

Bazeley, P. - *Qualitative Data Analysis: Practical Strategies*. 2013. Sage Publications.

Becker, Howard S. - *Métodos de pesquisa em Ciências Sociais*. Tradução de Marco Estevão. 3a edição. São Paulo: Editora Hucitec, 1994.

Bogdan, R. C., & Biklen, S. K. - *Investigação qualitativa em educação: Uma introdução à teoria e aos métodos*. 1994. Porto Editora.

Carmo, H., & Ferreira, M. M. - *Metodologia da Investigação: Guia para autoaprendizagem*, 1998. Universidade Aberta.

Carvalho, Mónica, *Intertextualidade na lei para o controlo de acidentes graves envolvendo substâncias perigosas em Portugal*, *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Open Edition Journals, Editora Centro de Estudos Sociais da Univ. de Coimbra, 2019.

Comissão das Comunidades Europeias – *Comunicação da comissão relativa ao guia de boa prática de carácter não obrigatório para a aplicação da Diretiva 1999/92/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa às prescrições mínimas destinadas a promover a melhoria da proteção da segurança e da saúde dos trabalhadores suscetíveis de serem expostos a riscos derivados de atmosferas explosivas*, Bruxelas, 2023.

Bunge, Mario - *Teoria y realidad*. Barcelona: Ariel, 1972.

Cabrini, M.; Lorenzi, S.; Pastore, T.; Pellegrini, S. - *Hydrogen embrittlement of metals: a review*. *Materials Science and Engineering*, 2018.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. - *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*, (5th ed.), 2018. SAGE Publications, Inc.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Denzin, N. K.; Lincoln, Y. S. (Eds.) - The Sage Handbook of Qualitative Research (5th ed.), 2017, Sage Publications, Inc.

Flick, U. - Métodos Qualitativos na Investigação Científica, 2005. 2.<sup>a</sup> ed., Ed. Monitor.

Flick, U., An Introduction to Qualitative Research (6th ed.), 2018. Sage Publications.

Flick, U., E. V. Kardorff, I. Steinke (eds.) - Triangulation in Qualitative Research, A Companion to Qualitative Research, 2005., Sage.

Gangloff, R. P., & Somerday, B. P. - Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, ISBN: 978-1-84569-677-1. 2012.

Gil, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed., 2008 São Paulo: Atlas

Gil, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 5. ed. 1999. São Paulo: Atlas,

Goldenberg, Mirian. A arte de pesquisar - como fazer pesquisa qualitativa em Ciências Sociais. 1997. Rio de Janeiro/São Paulo: Editora Record,

Gómez, Gregorio R; Flores, Javier; Jimenez, Eduardo (1996). Metodologia de la Investigacion Cualitativa. Malaga: Ediciones Aljibe.

Haguette, Teresa Maria Frota. Metodologias qualitativas na Sociologia. 5a edição. 1997 Petrópolis.

IGAMAOT – Inspeção-Geral de Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território (2016), Guia de Apoio à Realização de Inspeções Seveso, Lisboa.

IGAMAOT – Inspeção-Geral de Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território (2022), Projeto de Enforcement da Diretiva SEVESO III.

ISO Standards - ISO 45001:2018 - Occupational health and safety management systems - A practical guide for small organizations, ISO Standards, 1<sup>a</sup> Edição 2018.

ISO Standards - ISO TR 15916:2015 - Basic consideration for the safety of hydrogen systems, 2<sup>a</sup> Edição, 2015.

Lakatos, Eva Maria & Marconi, Marina de Andrade - Técnicas de pesquisa. 3a edição, São Paulo: Editora Atlas, 1996.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Lewis, Bernard; Von Elbe, Guenther - Combustion, flames and explosions of gases, Academic Press, Orlando, 3rd ed., 1987. ISBN 0-12-446751-2.

Luna, Sérgio Vasconcelos - Planejamento de pesquisa: uma introdução, 2a edição. São Paulo: EDUC, 1999.

Marconi, Marina de Andrade; Lakatos, Eva Maria. Técnicas de pesquisa. 4. ed., São Paulo: Atlas, 1999.

Martinelli, M. L.- Pesquisa qualitativa: Um instigante desafio, 1999.

Minayo, Maria Cecília de Souza. O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde. São Paulo: Hucitec-Abrasco, 2014.

Minayo, Maria Cecília de Souza. Pesquisa Social: Teoria, Método e Criatividade. 6ª. Edição. Petrópolis: Editora Vozes, 1996.

Monteiro, Leonardo - Tecnologias de Produção de Hidrogénio Verde - Estudo Energético e Viabilidade Económica, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2021.

Neto, Rui - Operações seguras com Hidrogénio - Formação, ISQ – Instituto da Soldadura e Qualidade, Lisboa, janeiro 2025.

Neves Jr., Newton, et al. – Princípios Básicos de Segurança do Hidrogénio Volume 6, Brasília, ISBN 978-65-84854-28-4, 2023

Patton, M. Q. - Qualitative Research and Evaluation Methods (4th ed.), Sage Publications, 2015.

Revinova, S.[et al.], Forecasting Development of Green Hydrogen Production Technologies Using Component-Based Learning Curves. Energies, 2023.

Rigas, Fotis; Amyotte, Paul - Hydrogen Safety, Elsevier, ISBN 9780429108150, 2015

Rivkin, C., [et al.] - Hydrogen Technologies Safety Guide. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015.

Schneider, Paulo, et al. - Energias renováveis e sua integração no H2 Verde – vol. 3, Coleção Conceitos do H2 Power-to-X, 2023, ISBN 978-684854-26-0.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Selltiz, Claire et al. - Métodos de pesquisa nas relações sociais, 1967.

Silverman, D., Qualitative Research (5th ed.), Sage Publications, 2020.

Sousa, G. V.; Metodologia da Investigação, redação e apresentação de trabalhos científicos, Livraria Civilização, 1998.

Stake, R. E. - Multiple Case Study Analysis, Guilford Press, 2006.

Strauss, A., Corbin, J. - Basics of Qualitative Research: Grounded Theory Procedures and Techniques, Sage Publications 1990.

Swain, Michael R. - Fuel leak simulation and detection. International Journal of Hydrogen Energy, 1998

Valente A, Iribarren D, Dufour J - Life cycle assessment of hydrogen energy systems: a review of methodological choices. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017.

Yin, R. K.-Estudo de caso: Planejamento e métodos (3ª ed.), Bookman, 2005.

Zikmund, W. G. - Business Research Methods (5th Ed.), The Dryden Press, 2000.

### 7.2 Webgrafia

A. Patonia e R. Poudineh - Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolysers?, 2022. [Consult. 23 março 2025] Disponível em WWW:<URL: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/01/Cost-competitive-green-hydrogen-how-to-lower-the-cost-of-electrolysers-EL47.pdf> .

ACT- Trabalho em espaços confinados, Autoridade para as Condições do Trabalho, 2012 [Consult. 22 abril 2025] Disponível em WWW:<URL: <https://portal.act.gov.pt/Pages/campanha-trabalho-espacos-confinados.aspx>>.

Aerospace Manufacturing and Design - Toray Advanced Composites, consortium to develop LH2 tanks, 2021 [Consult. 18 abril 2025] Disponível em WWW:<URL:

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

<https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/news/toray-advanced-composites-consortium-develop-lh2-tanks/> >.

Agência Portuguesa do Ambiente - Plano nacional energia e clima 2021-2030 (PNEC 2030), 2024, [Consult. 16 janeiro 2025] Disponível em WWW:<URL: [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/Planeamento/20241030\\_pnec2030\\_maen.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Planeamento/20241030_pnec2030_maen.pdf) >.

AIP - Associação Industrial Portuguesa – Negócios e Empresas, 2022. [Consult. 17 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: [https://www.aip.pt/uploads/Comunicacao/Revista/Revista\\_NE\\_04.pdf](https://www.aip.pt/uploads/Comunicacao/Revista/Revista_NE_04.pdf)>.

Air Liquide - Encyclopedia Air Liquide, 2025, [Consult. 19 março 2025] Disponível em WWW:<URL: <https://encyclopedia.airliquide.com/>>.

Ali, Maka; Mehmood, Mubbashar - Green hydrogen energy production: current status and potential - Clean Energy, Volume 8, Issue 2, Pages 1–7, Oxford Academic, April 2024, [Consult. 16 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://doi.org/10.1093/ce/zkae012> >.

Alves, Gilson - Tetraedro do Fogo, 2023, [Consult. 19 março 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.getwet.com.br/tetraedro-do-fogo/>>.

Andersson, Joakim; Grönkvist, Stefan - Large-scale storage of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, Volume nº 23, pp. 11901-11919, 3 5 2019. [Consult. 20 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919310195> >.

Anouti Y, Elborai S, Kombargi R, Hage R. - The Dawn of Green Hydrogen: Maintaining the GCC's Edge in a Decarbonized World, 2020, [Consult. 3 junho 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen/the-dawn-of-green-hydrogen.pdf> >.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

AP2H2 – Sobre o Hidrogénio, Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio, [Consult. 19 fevereiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.ap2h2.pt/sobre-h2.php>>.

APA – Agência Portuguesa do Ambiente, Requisitos do Sistema de Gestão de Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves (SGSPAG), [Consult. 7 junho 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_SNIAMB\\_Prevencao\\_gestao\\_riscos/PAG/Requisitos\\_SGSPAG.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Prevencao_gestao_riscos/PAG/Requisitos_SGSPAG.pdf)>.

APA, Revisão da Diretiva Seveso II Enquadramento - Gabinete de Emergências e Riscos Ambientais, Agência Portuguesa do Ambiente, 2011, [Consult. 19 junho 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://www.apipe.org/docs/gabinete\\_tecnico/Revisao\\_sevesoII\\_Enquadramento\\_Jan11.pdf](https://www.apipe.org/docs/gabinete_tecnico/Revisao_sevesoII_Enquadramento_Jan11.pdf)>

APEG - A Cadeia de Valor do H2 Verde – Associação Portuguesa de Gás, (2025), [Consult. 3 junho 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.apeg.pt/gases-renovaveis/hidrogenio/cadeia-de-valor-h2-verde/76>>.

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis - Eletricidade Renovável no Sistema Energético Português até 2050. Associação Portuguesa de Energias Renováveis, Lisboa, 2018 [Consult. 22 dezembro 2024] Disponível em WWW:<URL: <https://www.apren.pt/publicacoes/apren/eletricidade-renovavel-no-sistema-energetico-portugues-ate-2050>>.

APREN -, 2021 Mitos sobre o hidrogénio - Associação Portuguesa de Energias Renováveis, 2021, [Consult. 7 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.apren.pt/contents/communicationpressrelease/mitos-sobre-o-hidrogenio.pdf>>.

APREN –Dados de Produção de Portugal Continental em 2025, Associação Portuguesa de Energias Renováveis, 2025, [Consult. 22 maio 2025] Disponível em WWW:<URL: <https://www.apren.pt/energias-renovaveis/producao>>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Assembleia da República - Diário da República n.º 123/2019, Série I de 2019-07-01 RNC 2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbónica. Caminho de Futuro. Ministério do Ambiente e Transição Energética, Sessão Pública 4-12-2018, Lisboa. [Consult. 11 janeiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/107-2019-122777644>>.

Atlas Copco – 10 Steps to ensure your hydrogen plant safety, Atlas Copco, 2023, [Consult. 22 Maio 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/Hydrogen%20plant%20safety%20takeaway.pdf>>.

Azkarate, Inaki - Materials compatibility with hydrogen, 2014, [Consult. 7 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.researchgate.net/publication/260792512\\_Materials\\_compatibility\\_with\\_hydrogen](https://www.researchgate.net/publication/260792512_Materials_compatibility_with_hydrogen)>.

Barthelemy, H., Weber, M., & Barbier, F. - Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. International Journal of Hydrogen Energy, 42(11), 7254-7262. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.178, 2017, [Consult. 14 Abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919310195>>.

Bloomenergy - Eletrolisadores de Óxidos Sólidos da marca Bloom Energy, 2025, [Consult. 26 abril 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.bloomenergy.com/bloomelectrolyzer/>>.

Boal, Bernardo - Estudo de Viabilidade do Hidrogénio Verde em Portugal, 2022. ISCTE [Consult. 14 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: [https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/25021/1/master\\_bernardo\\_silva\\_boal.pdf](https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/25021/1/master_bernardo_silva_boal.pdf)>.

Bohm, Hans et al. - Estimating future costs of power-to-gas – a component-based approach for technological learning, International Journal of Hydrogen Energy, 2019 [Consult. 6 maio 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://www.researchgate.net/publication/337045854\\_Estimating\\_future\\_costs\\_of\\_power-to-gas\\_-\\_a\\_component-based\\_approach\\_for\\_technological\\_learning](https://www.researchgate.net/publication/337045854_Estimating_future_costs_of_power-to-gas_-_a_component-based_approach_for_technological_learning)>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Bondalti – Bondalti – História, 2023, [Consult. 5 junho 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.bondalti.com/bondalti/history> >.

Boni, Valdete; Quaresma, Sílvia - Aprendendo a entrevistar: como fazer entrevistas em Ciências Sociais - Revista Eletrônica dos Pós-Graduandos em Sociologia Política da UFSC Vol. 2 nº 1 (3), 2005. [Consult. 6 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.researchgate.net/publication/288882472\\_Aprendendo\\_a\\_entrevistar\\_Como\\_fazer\\_entrevistas\\_em\\_Ciencias\\_Sociais](https://www.researchgate.net/publication/288882472_Aprendendo_a_entrevistar_Como_fazer_entrevistas_em_Ciencias_Sociais) >

Brandão, Joana; Pinto, Rui – Estratégia nacional para o hidrogénio, 2020, [Consult. 04 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.plmj.com/xms/files/00\\_Trending\\_Topics/NI\\_Estrategia\\_nacional\\_para\\_o\\_hidrogenio.pdf](https://www.plmj.com/xms/files/00_Trending_Topics/NI_Estrategia_nacional_para_o_hidrogenio.pdf)>.

Burton N, Padilla R, Rose A, et al. - Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. Renew Sustain Energy Rev, 2021, [Consult. 13 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212030544X> >.

Buttner, William et al. - Detection and Quantitation of Hydrogen Emissions - Role and Status of Detection Technology, Hydrogen Safety Research and Development Program - National Renewable Energy Laboratory, 2024, [Consult. 8 fevereiro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/91742.pdf> >.

Buttner, William et al. – NREL Hydrogen Sensor Safety Research and Development, Advances in the NREL Sensor Laboratory, 2022, [Consult. 8 fevereiro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/82757.pdf> >.

Cardoso, André – Projeto de Sistema Municipal de Hidrogénio Verde – Relatório de Projeto de Mestrado em Engenharia e Gestão de Energia na Indústria de Edifício, 2022 - [Consult. 22 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: [https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/40154/1/PM\\_Andr%C3%A9\\_Cardoso\\_Final.pdf](https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/40154/1/PM_Andr%C3%A9_Cardoso_Final.pdf) >.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Cate, Andreas, et al. - Safety Aspects of Green Hydrogen Production on Industrial Scale – Hydrohub Innovation Program, 2023, [Consult. 28 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: [https://www.h2-mobile.fr/uploads/doc\\_20231114192000.pdf](https://www.h2-mobile.fr/uploads/doc_20231114192000.pdf)>.

CATF - Regulatory Framework for Hydrogen in the U.S., CATF - Clean Air Task Force, 2025, [Consult. 15 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.catf.us/resource/regulatory-framework-hydrogen-us/>>.

Columbia University - Compressed gas safety manual for research operations, Columbia University, 2020, [Consult. 9 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://research.columbia.edu/sites/default/files/content/EHS/Lab%20Safety/CompressedGas/CompressedGasManual.pdf>>.

Comissão Europeia - European Clean Hydrogen Alliance – declaration, 2020, [Consult. 16 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/43526>>.

Comissão Europeia - European Clean Hydrogen Alliance members, 2023, [Consult. 10 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/63494>>.

Comissão Europeia - Report on hydrogen-readiness of gaseous fuels distribution infrastructure and heating technologies in Europe, 2022, [Consult. 19 fevereiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/d/d/workspace/SpacesStore/8bd695fb-9d50-4256-8d99-b9a43a6cfe27/download>>.

Comissão Europeia - REPowerEU Plan - Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions Brussels, 2022, [Consult. 19 fevereiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230>>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Comissão Europeia, (2020a) - A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, 2020, [Consult. 12 março 2025], Disponível em WWW: <URL:

[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_20\\_1257](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_1257) >.

Comissão Europeia, (2023) - Comunicado de imprensa - Comissão estabelece regras para o hidrogénio renovável - Brussels, 13 de fevereiro de 2023 [Consult. 15 março 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip\\_23\\_594](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_23_594) >.

Comissão Europeia, (2023a) - HIAD 2.1 - The Hydrogen Incident and Accidents Database, 2023, [Consult. 12 março 2025], Disponível em WWW: <URL:

<https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt> >.

Conselho da União Europeia - Regulamento de Gases e Hidrogénio (Pacote Fit for 55), março de 2025, [Consult. 29 maio 2025] Disponível em WWW: <URL:

<https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/fit-for-55/>>.

De Blasio et al. - Green Hydrogen Industrial Value Chains: Geopolitical and Market Implications, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, 2023, [Consult. 29 março 2025], Disponível em WWW: <URL:

<https://dash.harvard.edu/server/api/core/bitstreams/226279ba-4a90-4915-b273-cc6475bce2c4/content> >.

De Blasio et al. - The Colors of Hydrogen, Harvard Kennedy School – Belfer Center, 2024 [Consult. 29 março 2025], Disponível em WWW: <URL:

<https://www.belfercenter.org/sites/default/files/2024-07/De%20Blasio%20Colors%20of%20Hydrogen%20Handout.pdf>>.

DGEG (2018b) - O Hidrogénio no Sistema Energético Português Desafios de Integração, Direção Geral de Energia e Geologia, 2018, [Consult. 22 novembro 2024], Disponível em WWW: < URL:

<https://www.dgeg.gov.pt/media/3eshwqnl/p1-o-hidrog%C3%A9nio-no-sistema-energ%C3%A9tico-portugu%C3%AAs.pdf> >.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

DGEG, (2018) – O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios de integração, Direção Geral de Energia e Geologia, 2018, [Consult. 20 dezembro 2024], Disponível em WWW: <URL:

[https://www.apeg.pt/folder/documento/ficheiro/472\\_O%20Hidrog%C3%A9nio%20no%20Sistema%20Energ%C3%A9tico%20Portugu%C3%AAs\\_Desafios%20de%20integra%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://www.apeg.pt/folder/documento/ficheiro/472_O%20Hidrog%C3%A9nio%20no%20Sistema%20Energ%C3%A9tico%20Portugu%C3%AAs_Desafios%20de%20integra%C3%A7%C3%A3o.pdf)>.

DGEG, (2019) - Integração do H2 nas cadeias de valor – Sistemas energéticos integrados, mais limpos e inteligentes. 1ª Ed. [Consult. 10 dezembro 2024], Disponível em WWW: <URL: <https://www.dgeg.gov.pt/media/1snnvdag/p2-integra%C3%A7%C3%A3o-do-hidrog%C3%A9nio-nas-cadeias-de-valor-sistemas-energ%C3%A9ticos-integrados-mais-limpos-e-inteligentes.pdf> >.

DGEG, (2019a) - Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal, Direção-Geral de Energia e Geologia, 2019, [Consult. 22 novembro 2024], Disponível em WWW: <URL: <https://www.dgeg.gov.pt/media/d14dduhz/p3-roteiro-e-plano-de-a%C3%A7%C3%A3o-para-o-hidrog%C3%A9nio-em-portugal.pdf> >.

DGEG, (2019b) - Integração do H2 nas cadeias de valor - Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade, 2019 Edição: Direção-Geral de Energia e Geologia [Consult. 22 novembro 2024], Disponível em WWW: <URL: <https://www.dgeg.gov.pt/media/1snnvdag/p2-integra%C3%A7%C3%A3o-do-0hidrog%C3%A9nio-nas-cadeias-de-valor-sistemas-energ%C3%A9ticos-integrados-mais-limpos-e-inteligentes.pdf>>.

DGEG, (2020) - Energy Scenarios in support of the Portuguese Strategy for Hydrogen. DEIR Studies on the Portuguese Energy System, Lisbon, Portugal. 1st edition June 2020, rev. 2021. 54 pp. ISBN 978-972-8268-53-4. [Consult. 16 janeiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.dgeg.gov.pt/media/3aijhpag/en-h2-scenarios-deir-studies-002-2020.pdf> >.

DGEG, (2021) - Guia do promotor - Legislação e regulação para a Economia do Hidrogénio, Direção Geral de Energia e Geologia, 2021 [Consult. 27 janeiro 2025], Disponível em WWW: <URL:

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

[https://www.dgeg.gov.pt/media/jjqfozrv/apa-dgeg-guia-promotor\\_hidrogenio\\_final24052021.pdf](https://www.dgeg.gov.pt/media/jjqfozrv/apa-dgeg-guia-promotor_hidrogenio_final24052021.pdf) >.

Diário da República - Acordo de Paris, União Europeia, 2016, [Consult. 17 janeiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A22016A1019%2801%29> >.

Diário da República - Plano Nacional de Energia e Clima 2030, redigido na Resolução da Assembleia da República, nº127/2025, Diário da República, 2025 [Consult. 18 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-assembleia-republica/127-2025-914597185> >.

Diário da República - Plano Nacional do Hidrogénio, 1.ª série, Presidência do conselho de ministros, Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, 14 08 2020. (Diário da República, 2020, [Consult. 17 janeiro 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.dgeg.gov.pt/media/5eac1vcd/resolu%C3%A7%C3%A3o-do-conselho-de-ministros-n-%C2%BA-632020.pdf> >.

Diário da República, (2025a) - Despacho n.º 2791/2025, de 28 de fevereiro 2025 - Aprova o Regulamento da Rede Nacional de Distribuição de Gás, 2025, [Consult. 23 abril 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/2791-2025-909334370>>.

Diário da República, Decreto-Lei n.º 150/2015, de 5 de agosto, 2015 [Consult. 11 maio 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/150-2015-69951097> >.

DNV - Hydrogen in the Electricity Value Chain., DNV – Det Norske Veritas, 2019. [Consult. 26 novembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://www.dnv.com/publications/hydrogen-in-the-electricity-value-chain-225850/> >.

DOE, H2@ Scale, 2017, [Consult. 14 março 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/h2scale-handout?nrg\\_redirect=366782](https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/h2scale-handout?nrg_redirect=366782) >.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Duarte, Teresa – A possibilidade da investigação a 3: reflexão sobre triangulação (metodológica) CIES – Centro de Investigação e Estudos de Sociologia [Consult. 26 novembro 2024] Disponível em WWW: <URL:

[https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/1319/3/CIES-WP60%20\\_Duarte.pdf](https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/1319/3/CIES-WP60%20_Duarte.pdf)>.

EDP (2021) - Hidrogénio: O elemento transformador da economia e do planeta, março 2021, [Consult. 27 Abril 2025] Disponível em WWW: <URL: [Hidrogénio: O elemento transformador da economia e do planeta | edp](#)>.

EDP (2024a) - Hidrogénio Verde: O combustível do futuro sustentável, 2024, [Consult. 15 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://www.edp.com/pt/media/historias-edp/hidrogenio-verde-o-combustivel-do-futuro-sustentavel> >.

EDP, (2020) - Conheça os poderes do hidrogénio, julho 2020, [Consult. 9 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.edp.com/pt/europa/portugal/media/historias-edp/conheca-os-poderes-do-hidrogenio> >.

EDP, (2021a) - Hidrogénio: Peça fundamental para a neutralidade carbónica, março 2021, [Consult. 12 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.edp.com/pt/media/historias-edp/hidrogenio-peca-fundamental-para-neutralidade-carbonica> >.

EDP, (2021b) - As cores do hidrogénio: verde é a cor do futuro, EDP, 2021 [Consult. 19 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.edp.com/pt/media/historias-edp/cores-do-hidrogenio-verde-e-cor-do-futuro> >.

EDP, (2021c) - Hidrogénio inspira ideais à escala global, 2021, [Consult. 20 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.edp.com/pt/media/historias-edp/hidrogenio-inspira-ideais-escala-global> >.

EGIG, (2024) Fonte: 12º Relatório do European Gas Pipeline Incident Data Group, 2024 [Consult. 20 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.egig.eu/reports>>

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

EIA - U.S. Energy Information Administration - Hydrogen explained - Production of hydrogen, 2023, [Consult. 16 maio 2025] Disponível em WWW:

<URL:<https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php>>.

Estevão, T. - O hidrogénio como combustível. 2008. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008, [Consult. 21 março 2025] Disponível em WWW:

<URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf> >.

European Clean Hydrogen Alliance - Roadmap on hydrogen standardisation, 2023 [Consult. 16 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.cenelec.eu/media/CENELEC/News/Press%20Releases/2023/20230301\\_ech2a\\_roadmaphydrogenstandardisation.pdf](https://www.cenelec.eu/media/CENELEC/News/Press%20Releases/2023/20230301_ech2a_roadmaphydrogenstandardisation.pdf) >.

European Commission - European Clean Hydrogen Alliance, Maio 2025, [Consult. 9 junho 2025] Disponível em WWW: <URL:

<https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/d/d/workspace/SpacesStore/8bd695fb-9d50-4256-8d99-b9a43a6cfe27/download> >.

European Union - EU rules for renewable hydrogen - Delegated regulations on a methodology for renewable fuels of non-biological origin, 2023, [Consult. 21 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL:

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS\\_BRI%282023%29747085\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI%282023%29747085_EN.pdf) >.

Faye, Omar; Szpunar, Jerzy; Eduok, Ubong - A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, pp. 0360-3199, 2022, [Consult. 2 Junho 2025] Disponível em WWW:

<URL:[https://www.researchgate.net/publication/359157000\\_A\\_critical\\_review\\_on\\_the\\_current\\_technologies\\_for\\_the\\_generation\\_storage\\_and\\_transportation\\_of\\_hydrogen](https://www.researchgate.net/publication/359157000_A_critical_review_on_the_current_technologies_for_the_generation_storage_and_transportation_of_hydrogen) >.

Floene - Projeto piloto no seixal de Hidrogénio verde, 2025 [Consult. 2 junho 2025] Disponível em WWW: <URL: [www.floene.pt](http://www.floene.pt) >.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Forman, A. Williams - Detailed and reduced chemistry for hydrogen autoignition, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 21, nº 2, pp. 131-135, 3 2008. [Consult. 19 maio 2025] Disponível em WWW: <URL:

[https://www.researchgate.net/publication/239713210\\_Detailed\\_and\\_reduced\\_chemistry\\_for\\_hydrogen\\_autoignition](https://www.researchgate.net/publication/239713210_Detailed_and_reduced_chemistry_for_hydrogen_autoignition) >.

GH2 Green Hydrogen Organisation - Green Hydrogen Standard 2.0. The Global Standard for Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivatives, 2023 [Consult. 11 março 2025] Disponível em WWW: <URL:

[https://gh2.org/sites/default/files/2023-12/GH2\\_Standard\\_2.0\\_Dec%202023.pdf](https://gh2.org/sites/default/files/2023-12/GH2_Standard_2.0_Dec%202023.pdf)>.

Green H2 Atlantic – Projeto H2 Atlantic, 2025, [Consult. 5 junho 2025], Disponível em WWW: <URL: [www.greenh2atlantic.com](http://www.greenh2atlantic.com)>.

Hecht, E., Panda, P. - Failure mechanisms of hydrogen storage tanks. International Journal of Hydrogen Energy, SNL, Materials Compatibility, Sandia National Laboratories, 2015 [Consult. 4 maio 2025] Disponível em WWW: <URL:

<https://energy.sandia.gov/programs/sustainable-transportation/hydrogen/materials-compatibility/>>.

Hydrogen Europe – A Clean Industrial Deal for the European hydrogen industry, Janeiro 2025, [Consult. 11 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2025/01/HE-paper\\_CleanIndustrialDeal\\_final.pdf](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2025/01/HE-paper_CleanIndustrialDeal_final.pdf) >.

Hydrogen Europe (2017) - Hydrogen Basics, 2017, [Consult. 4 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL:

[https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Tech-Overview\\_Hydrogen-Basics.pdf](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Tech-Overview_Hydrogen-Basics.pdf) >.

Hydrogen Europe (2017a) - Hydrogen Storage, 2017, [Consult. 4 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL:<https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-storage>>.

Hydrogen Europe (2017b) - Research & Innovation Agenda, 2017, [Consult. 6 dezembro 2024], Disponível em WWW: URL:

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

<[https://static1.squarespace.com/static/5dd2c9552f6495669955303c/t/5de0efef5043fe7cebf9f6c/1575022616407/Hydrogen+Europe\\_SRIA\\_final\\_clean.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5dd2c9552f6495669955303c/t/5de0efef5043fe7cebf9f6c/1575022616407/Hydrogen+Europe_SRIA_final_clean.pdf)>.

Hydrogen Tools - Basic Hydrogen Properties Chart, 2025 [Consult. 23 março 2025], Disponível em WWW: URL: <https://h2tools.org/basic-hydrogen-properties-chart> >.

HySafe – International Association for Hydrogen Safety, 2025, [Consult. 14 fevereiro 2025], Disponível em WWW: URL: <https://hysafe.info> >.

Iberdrola - O hidrogénio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta, 2025 [Consult. 18 março 2025], Disponível em WWW: URL: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde> . >.

IEA - International Energy Agency - Global Hydrogen Review 2021, 2021, [Consult. 03 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>>.

IEA – International Energy Agency - Global Hydrogen Review 2024, 2024, [Consult. 15 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/table-overview-of-existing-and-planned-certification-systems-and-regulatory-frameworks> >.

IEA - International Energy Agency - Outlook Projects 25-Percent Increase in Energy Demand by 2040, International Energy Agency, 2018, [Consult. 20 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.instituteforenergyresearch.org/international-issues/iea-outlook-projects-25-percent-increase-in-energy-demand-by-2040/>>.

IEA - International Energy Agency - The Future of Hydrogen – Seizing today’s opportunities – IEA International Energy Agency, 2019, [Consult. 21 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>.

IEA - International Energy Agency, 2024, Global Hydrogen Review 2024 IEA – International Energy Agency, 2024 [Consult. 22 março 2024] Disponível em WWW: <URL:

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/table-overview-of-existing-and-planned-certification-systems-and-regulatory-frameworks> >.

IEA International Energy Agency - Global Hydrogen Review 2024, outubro 2024, [Consult. 11 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf> >.

IEA International Energy Agency - World Energy Outlook 2024, 2024, [Consult. 22 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>>.

INEGI - Estudo e teste da viabilidade da injeção de hidrogénio na rede de distribuição de gás natural, março 2022, [Consult. 22 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://inegi.pt/pt/noticias/portgas-h2/>>.

INEGI – Sobre o INEGI, INEGI, 2025 [Consult. 2 junho 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.inegi.pt/pt/sobre-o-inegi/o-inegi/> >.

IPHE International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy - Comparison of Hydrogen Certification Schemes – Methodology and results – Hydrogen Certification Mechanisms Task Force – dezembro 2024, [Consult. 16 abril 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://www.iphe.net/\\_files/ugd/45185a\\_e097bcac08984a3a87201790b30b145c.pdf](https://www.iphe.net/_files/ugd/45185a_e097bcac08984a3a87201790b30b145c.pdf)>.

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável - Renewable Hydrogen: A Sustainable Future. IRENA Report, 2023 [Consult. 22 março 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA\\_Quality\\_infrastructure\\_roadmap\\_green\\_hydrogen\\_2024.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_Quality_infrastructure_roadmap_green_hydrogen_2024.pdf) >.

IRENA - Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. Abu Dhabi, UAE: International Renewable Energy Agency, 2019, [Consult. 7 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Macroeconomic-benefits/IRENA\\_Global\\_Energy\\_Transformation\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Macroeconomic-benefits/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf) >.

IRENA - Green hydrogen: A guide to policy making” – IEA (International Energy Agency), Abu Dhabi, ISBN: 978-92-9260-286-4, 2020, [Consult. 5 junho 2025], Disponível em WWW: <URL:

[https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2021/05/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_policy\\_2020-1-7.pdf](https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2021/05/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020-1-7.pdf)>.

IRENA - Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2018, [Consult. 14 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL:<https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>>.

IRENA – International Renewable Energy Agency – International Cooperation to Accelerate Green Hydrogen Deployment - IRENA Collaborative Framework on Green Hydrogen, 2024 [Consult. 19 março 2025] Disponível em WWW:

<URL:[https://www.apeg.pt/folder/documento/ficheiro/870\\_IRENA\\_CF\\_Green\\_hydrogen\\_deployment\\_2024.pdf](https://www.apeg.pt/folder/documento/ficheiro/870_IRENA_CF_Green_hydrogen_deployment_2024.pdf)>.

IRENA - International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy, IRENA International Renewable Energy Agency, 2023, [Consult. 16 abril 2025], Disponível em WWW: <URL:

[https://www.wto.org/english/res\\_e/booksp\\_e/green\\_hydrogen\\_e.pdf](https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/green_hydrogen_e.pdf)

IRENA, (2020a) - Green hydrogen cost reduction scaling up electrolysers to meet the 1.5°C climate goal, International Renewable Energy Agency, 2020, [Consult. 14 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL:

[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/%202020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/%202020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf)>.

IRENA. Geopolitics of the Energy Transformation: the Hydrogen Factor. Abu Dhabi, UAE: International Renewable Energy Agency, 2022. [Consult. 17 janeiro 2024] Disponível em WWW: <URL:

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA\\_Geopolitics\\_Hydrogen\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf)  
>.

IRENA. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part I—Trade Outlook for 2050 and Way Forward. Abu Dhabi, UAE: International Renewable Energy Agency, 2022, [Consult. 14 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Global\\_hydrogen\\_trade\\_part\\_1\\_2022\\_.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf)>.

IRENA. Hydrogen: A Renewable Energy Perspective. Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan. Abu Dhabi, UAE: International Renewable Energy Agency, 2019. [Consult. 5 março 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.h2it.it/wp-content/uploads/2019/11/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.h2it.it/wp-content/uploads/2019/11/IRENA_Hydrogen_2019.pdf)>.

Jornal Negócios - Voltalia investe 26 milhões em dois projetos de hidrogénio verde no Carregado e Covilhã, Jornal de Negócios, 2024, [Consult. 7 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://eco.sapo.pt/2024/10/08/votalia-investe-26-milhoes-em-dois-projetos-de-hidrogenio-verde-no-carregado-e-covilha/>>.

Keller, J. et al. - Research Priorities Workshop 2022 - HySafe Research Committee, 2022. [Consult. 18 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: [hysafe.info/wp-content/uploads/2023/09/RPW\\_2022\\_Final\\_Report.pdf](https://hysafe.info/wp-content/uploads/2023/09/RPW_2022_Final_Report.pdf)>.

Lightsource - Lightsource bp e Dourogas criam parceria para a produção de hidrogénio verde em Portugal – 2021, [Consult. 13 Abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://lightsourcebp.com/pt/news/lightsource-bp-e-dourogas-criam-parceria-para-a-producao-de-hidrogenio-verde-em-portugal/>>.

Malkov, V.; Saffers, J.B. - Introduction to hydrogen safety engineering, Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HySAFER), University of Ulster, [Consult. 9 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.h2tools.org/sites/default/files/ICHS\\_import/paper\\_85.pdf](https://www.h2tools.org/sites/default/files/ICHS_import/paper_85.pdf)>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Marcon, Lucas - A nova face do hidrogénio: uma alternativa eficiente e económica para descarbonizar a indústria portuguesa, INEGI, abril 2021 [Consult. 28 Abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.inegi.pt/pt/noticias/a-nova-face-do-hidrogenio-uma-alternativa-eficiente-e-economica-para-descarbonizar-a-industria-portuguesa/>>.

Martins, Pedro – Avaliação do Efeito da Utilização do Hidrogénio na Co-Combustão do Gás Natural – Universidade de Coimbra, setembro 2022 [Consult. 22 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/103078/1/DM%20Pedro%20Miguel%20Ferreira%20Martins%202017246487.pdf>>

Minayo, Maria Cecília de Souza - Análise Quantitativa: teoria, passos e fidedignidade. Ciência & Saúde Coletiva, Petrópolis: Editora Vozes, 2011, [Consult. 7 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.scielo.br/j/csc/a/39YW8sMQhNzG5NmpGBtNMFf/?format=pdf&lang=pt>>.

Moki Sistemas - Como aplicar a matriz de risco, 2021, [Consult. 20 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://site.moki.com.br/pt-br/blog/post/matriz-de-risco>>.

Molkov, V., et al. - Hydrogen safety engineering: Overview of recent progress and unresolved issues, Ulster University, 2010, [Consult. 17 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://pure.ulster.ac.uk/ws/portalfiles/portal/11267616/Molkov\\_et\\_al\\_Santander.pdf](https://pure.ulster.ac.uk/ws/portalfiles/portal/11267616/Molkov_et_al_Santander.pdf)>.

Mondril, Nuno, Guia da Informação para a Elaboração do Plano de Emergência Externo (Diretiva Seveso III), Autoridade Nacional de Proteção Civil, 2016, [Consult. 7 Junho 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://prociv.gov.pt/media/lrdjo110/ct\\_2-guia-da-informa%C3%A7%C3%A3o-para-a-elabora%C3%A7%C3%A3o-do-plano-de-emerg%C3%Aancia-externo.pdf](https://prociv.gov.pt/media/lrdjo110/ct_2-guia-da-informa%C3%A7%C3%A3o-para-a-elabora%C3%A7%C3%A3o-do-plano-de-emerg%C3%Aancia-externo.pdf)>.

Morganho, Ricardo - Hidrogénio como agente ativo na transição energética no contexto da REN, novembro 2020, [Consult. 21 março 2025] Disponível em WWW: <URL: [Repositório da Universidade de Lisboa: Hidrogénio como agente ativo na transição energética no contexto da REN](#)>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

MWCOG - Hydrogen Fact Sheet, History of Hydrogen Timeline – Metropolitan Washington Council of Governments, [Consult. 9 fevereiro 2025], Disponível em WWW: URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj0MOr1\\_mNAxV3QvEDHWYyMr4QFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mwcog.org%2Ffile.aspx%3F%26A%3Dzkpv0NhZDZWLpQp7LLLTPZMIgxuq1QGhT8%252BMkINPbo%253D&usg=AOvVaw3juYMUDuXpv7g8WOjSgRoL&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj0MOr1_mNAxV3QvEDHWYyMr4QFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mwcog.org%2Ffile.aspx%3F%26A%3Dzkpv0NhZDZWLpQp7LLLTPZMIgxuq1QGhT8%252BMkINPbo%253D&usg=AOvVaw3juYMUDuXpv7g8WOjSgRoL&opi=89978449)>.

Najjar, Y. S., Hydrogen safety: The road toward green technology, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, pp. 10716-10728, Agosto 2013. [Consult. 21 abril 2025] Disponível em WWW: URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991301358X>>.

Napoleão, Bianca - Matriz de Riscos (Matriz de Probabilidade e Impacto), 26 de junho de 2019. [Consult. 15 abril 2025] Disponível em WWW: URL:

<<https://ferramentasdaqualidade.org/matriz-de-riscos-matriz-de-probabilidade-e-impacto/>>.

National Grid, The hydrogen colour spectrum – National Grid, 2023 [Consult. 15 março 2025] Disponível em WWW: <URL:

<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>>.

NEL - Eletrolisador industrial do tipo “PEM” da marca “NEL” em solução contentorizada, 2025, [Consult. 7 abril 2025] Disponível em WWW:

<URL:<https://nelhydrogen.com/product/psm-series-electrolyser/#3d-model>>.

NLM - Hydrogen - National Library of Medicine 2025 [Consult. 12 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Hydrogen>

O’Leary, Z. - The essential guide to doing your research project (3rd ed., SAGE Publications Ltd, 2017. [Consult. 21 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <http://ael.cbnu.ac.kr/lectures/graduate/%EC%97%B0%EA%B5%AC%EC%9C%A4%EB%A6%AC%EB%B0%8F%EC%97%B0%EA%B5%AC%EA%B3%BC%EC%A0%9C2/essentia1%20guide%20to%20doing%20your%20research.pdf>>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

OECD - Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen, Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico, OECD, 2023, ISBN 978-92-64-62880-9, [Consult. 12 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-10/Final%20Report-21NL05.pdf>>.

OECD - Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen, ISBN 978-92-64-62880-9, OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico, 2023, [Consult. 23 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-10/Final%20Report-21NL05.pdf>>.

ONU – Organização das Nações Unidas – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Transformando nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, 2015. [Consult. 20 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL:<https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>>.

Parlamento Europeu - Diretiva 1999/92/CE – ATEX - Parlamento Europeu e do Conselho, 16 de dezembro de 1999, [Consult. 18 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:01999L0092-20070627>>.

Parlamento Europeu - Diretiva 2014/34/CE ATEX – Jornal Oficial da União Europeia, 2014, [Consult. 18 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0034&from=HR>>.

Parlamento Europeu, Diretiva 2012/18/EU do Conselho (Seveso III), 2012, [Consult. 12 junho 2025], Disponível em WWW: <URL:

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0001:0037:PT:PDF>

Pathak, Pawan; Yadav Anil, Padmanaban, S. - Transition toward emission-free energy systems by 2050: potential role of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, [Consult. 26 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL:

[https://www.researchgate.net/publication/366016700\\_Transition\\_Toward\\_Emission-Free\\_Energy\\_Systems\\_by\\_2050\\_Potential\\_Role\\_of\\_Hydrogen](https://www.researchgate.net/publication/366016700_Transition_Toward_Emission-Free_Energy_Systems_by_2050_Potential_Role_of_Hydrogen)>.

Pepe, Jacopo; Ansari Dawud, Gehrung, Rosa - The Geopolitics of Hydrogen Technologies, Actors, and Scenarios until 2040, SWP Research Paper, German Institute for International and

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Security Affairs, novembro 2023, [Consult. 24 março 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.swp-berlin.org/publications/products/research\\_papers/2023RP13\\_GeopoliticsHydrogen.pdf](https://www.swp-berlin.org/publications/products/research_papers/2023RP13_GeopoliticsHydrogen.pdf)>.

Proteção Civil e Bombeiros dos Açores – Fenomologia da Combustão, Secretaria Regional da Saúde, Região Autónoma dos Açores, 2016, [Consult. 24 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.prociv.azores.gov.pt/fotos/documentos/1466610589.pdf>>.

Reda, Bassma et al. - Green hydrogen as a source of renewable energy: a step towards sustainability, an overview, 2023 [Consult. 21 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04892-z>>.

Reis, Pedro - Hidrogénio: Tudo sobre e Vantagens vs. Desvantagens, Portal Energia, 2019, [Consult. 6 março 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-hidrogenio-147348/>>.

República Portuguesa - Ambiente e Ação Climática - Estratégia Nacional para o Hidrogénio (Versão Draft). República Portuguesa, 2020, [Consult. 18 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://participa.pt/pt/consulta/en-h2-estrategia-nacional-para-o-hidrogenio>>.

República Portuguesa - Hidrogénio e Renováveis - Recuperar Portugal – Plano de Recuperação e Resiliência, 2024, [Consult. 20 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://recuperarportugal.gov.pt/wp-content/uploads/2024/07/14\\_ComponenteHidrogeno%CC%81nioeRenova%CC%81veis\\_Final.pdf](https://recuperarportugal.gov.pt/wp-content/uploads/2024/07/14_ComponenteHidrogeno%CC%81nioeRenova%CC%81veis_Final.pdf)>.

Rivard, Etienne; Trudeau, Michel; Zaghbi, Karim. - Hydrogen storage for mobility: a review. Materials Today, 47, 36-59, 2019, [Consult. 14 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1973>>.

Ronevich, Joe [et al.] - Current Status of Hydrogen Materials Compatibility Research in the U.S., San Marchi Sandia National Laboratories, Livermore CA, H2 Tools, Evaluating Metals - Assessing Metal Performance by Testing, 2025, [Consult. 4 junho 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://h2tools.org/bestpractices/material-compatibility/evaluating-metals>>.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Saito, Guilherme Keiji et al. Método para análise de riscos e especificação de requisitos de segurança em processos industriais com múltiplos modos de operação. 2019. [Consult. 7 Maio 2025] Disponível em WWW: <URL:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/214610/PEAS0329-D.pdf;jsessionid=98397EA1C4CE239CE57DB54C5E28CC4F?sequence=-1>

Silva, João – Adsorção - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, [Consult. 19 maio 2025], Disponível em WWW: <URL:

<https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jpsilva/quersaber.htm> >.

Stargate hydrogen - Eletrolisador alcalino industrial da marca Stargate Hydrogen, 2024, [Consult. 29 maio 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://stargatehydrogen.com/wp-content/uploads/2024/10/Spec\\_sheet\\_Electrolyser\\_stargate\\_hydrogen-Q4-2024-1.pdf](https://stargatehydrogen.com/wp-content/uploads/2024/10/Spec_sheet_Electrolyser_stargate_hydrogen-Q4-2024-1.pdf)>.

Tchouvelev, Andrei; Oliveira, Sergio; Neves, Newton - Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies, Chapter 6, Academic Press, 2019, Pages 303-356, ISBN 9780128142516, [Consult. 26 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814251-6.00006-X>>.

Tromp, T. K., [et al.] - Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere. Science, [Consult. 12 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.researchgate.net/publication/10708531\\_Potential\\_Environmental\\_Impact\\_of\\_a\\_Hydrogen\\_Economy\\_on\\_the\\_Stratosphere](https://www.researchgate.net/publication/10708531_Potential_Environmental_Impact_of_a_Hydrogen_Economy_on_the_Stratosphere)>.

U.S. Department of Energy - Clean Hydrogen Production Standard (CHPS) Guidance, Junho 2023 [Consult. 30 março 2025] Disponível em WWW: <URL: [https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/clean-hydrogen-production-standard-guidance.pdf?sfvrsn=173e9756\\_1](https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/clean-hydrogen-production-standard-guidance.pdf?sfvrsn=173e9756_1)>.

U.S. Department of Energy - Physical Hydrogen Storage, U.S. Department of Energy, 2020, [Consult. 19 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

U.S. Energy Information Administration - Hydrogen explained - Production of hydrogen, U.S. Department of Energy, Hydrogen Program Plan, novembro de 2020 [Consult. 21 abril 2025], Disponível em WWW: URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php>>.

Valle et al. Análise de Conteúdo na Perspetiva de Bardin: Contribuições e Limitações para a Pesquisa Qualitativa em Educação, 2023, [Consult. 5 janeiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.7697>>.

Veiga, Leandro - Hidrogénio Verde e sua Implementação no Sistema Elétrico Nacional - Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2022 [Consult. 12 dezembro 2024] Disponível em WWW: <URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/144576/2/587806.pdf>>.

Weg - Guia para atmosferas explosivas – Weg, 2020, [Consult. 17 julho 25] Disponível em WWW: <URL: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/he5/h77/WEG-guia-para-atmosferas-explosivas-50076428-brochure-portuguese-web.pdf>>.

Wen, Jennifer, et al. - Clean Hydrogen - Statistics, lessons learnt and recommendations from the analysis of HIAD 2.0 database, Clean Hydrogen Partnership - Advancing European Research and Innovation on Hydrogen Technologies, 2022 [Consult. 26 fevereiro 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2022-06/Analysis%20of%20hydrogen%20incidents%20and%20accidents%20database%20HIAD%202.0%20%28ID%2013831425%29.pdf>>

Zhang, Ming, A literature review of failure prediction and analysis methods for composite high-pressure hydrogen storage tanks, Elsevier, 2019, [Consult. 22 abril 2025] Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919329106>>.

Züttel, Andreas et al. - Hydrogen as a Future Energy Carrier, Wiley-VCH, 2010, [Consult. 17 fevereiro 2025], Disponível em WWW: <URL: [https://www.researchgate.net/publication/44691023\\_Hydrogen\\_The\\_future\\_energy\\_carrier](https://www.researchgate.net/publication/44691023_Hydrogen_The_future_energy_carrier)>.

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

Zuttel, Andreas et al. - Materials for hydrogen storage. *Materials Today*, 2023, [Consult. 23 março 2025], Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702103009222>>.

### 8. Glossário de termos

**Adsorção** - A adsorção é um processo espontâneo que ocorre sempre que uma superfície de um sólido é exposta a um gás ou a um líquido usado em processos de secagem, na separação e purificação de gases e líquidos.

**Blending** – Refere-se ao termo inglês que representa o processo de misturar o hidrogénio verde com outros gases, nomeadamente ao gás natural, com o objetivo da diminuição da sua pegada de carbono, utilizando o hidrogénio verde como um combustível mais limpo.

**Eletrolisadores** – O eletrolisador é um dispositivo que permite produzir hidrogênio através de um processo químico (eletrólise), capaz de separar as moléculas da água em hidrogênio e oxigênio através da eletricidade.

**Embrittlement** – Processo de fragilização dos metais por contacto com o hidrogénio

**En-H2 – Estratégia Nacional para o Hidrogénio** – Constitui um plano estratégico aprovado em 2020, que tem como objetivo promover o hidrogénio verde como uma solução para a descarbonização da economia, estabelecendo metas para a incorporação deste vetor energético em diferentes setores.

**Estação de Mistura (EMI)** - Estação de Mistura e Injeção, é a instalação onde a mistura de hidrogénio e gás natural é feita e controlada antes de ser distribuída através da rede.

**Estratégia de Hidrogénio da União Europeia** – Pretende explorar o potencial do hidrogénio, como contributo para o processo de descarbonização da União Europeia, em linha com o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica até 2050.

**Índice de Wobbe - (IW)** – É uma medida do conteúdo energético de um gás, medido com base no seu poder calorífico por unidade de volume à pressão e temperatura padrão, utilizada como indicador da interoperabilidade de equipamentos, face à mudança do gás combustível que os alimenta. É utilizado para comparar a energia produzida pela combustão de diferentes gases num determinado equipamento. Se dois combustíveis tiverem índices de Wobbe idênticos, para determinados valores de pressão e posição de abertura da válvula do queimador, o débito de energia também será idêntico. Normalmente, são permitidas variações de até 5%.

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

**Pacote Fit for 55** – Conjunto de leis destinadas a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa da União Europeia em, pelo menos, 55 % até 2030 e a colocar a UE numa trajetória para alcançar a neutralidade climática até 2050.

**PRR** - Plano de Recuperação e Resiliência – Trata-se de um programa de âmbito nacional, com um período de execução estimado até 2026, que tem o propósito de implementar um conjunto de reformas e de investimentos destinados a impulsionar o país no caminho da retoma, do crescimento económico sustentado e da convergência com a Europa ao longo da próxima década, tendo como orientação um conceito de sustentabilidade inspirado nos objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas.

**RED II** – Renewable Energy Directive - Diretiva (UE) 2018/2001 – Refere-se a uma legislação da União Europeia que tem o objetivo de promover o uso de energias renováveis e garantir que pelo menos 32% do consumo total de energia da UE venha de fontes renováveis até 2030. Estabelece ainda metas para a participação de energias renováveis em setores como transporte e calor, além de definir critérios de sustentabilidade para a biomassa e outros biocombustíveis.

**RED III** – Esta diretiva reforça o compromisso dos Estados-Membros da União Europeia em aumentar a quota de consumo final bruto de energia proveniente de fontes renováveis de 32 % para 42,5 % até 2030. Esta incorpora novos desenvolvimentos nos setores das energias renováveis e dos combustíveis renováveis de origem não biológica, impactando o quadro legislativo em vigor, designadamente, o Decreto-Lei n.º 15/2022, de 14 de janeiro, na sua redação atual.

**Regulamento de Gases e Hidrogénio** - estabelece regras para o mercado europeu de hidrogénio, e o Regulamento Delegado da UE (2023/1184), que define critérios para considerar a produção de hidrogénio a partir de eletricidade totalmente renovável.

**REPowerEU** – Plano elaborado pela Comissão Europeia que tem o objetivo de acabar com a dependência dos combustíveis fósseis provenientes da Rússia, através da poupança de energia, o aumento da produção de energia limpa e a diversificação do fornecimento de energia fora da Rússia.

**SGI** - Sistema de Gestão Integrada - é um sistema único que combina os requisitos de vários sistemas de gestão, incluindo o Sistema de Gestão da Qualidade, meio ambiente, saúde e segurança e o Sistema de Gestão da Segurança da Informação, numa única estrutura

## **Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal**

organizada, criando sinergias entre todos os processos envolvidos, para obter benefícios na prestação global da organização.

**SGSPAG** - Sistema de Gestão da Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves – Consiste num sistema de gestão inserida na gestão geral de uma organização, focada na prevenção e controlo de acidentes graves, garantindo que a sua atividade seja segura e em conformidade com a legislação.



### 9. Anexos

Anexo A – Tabela Simplificada de Normas e Legislação Aplicáveis. (Compilado e adaptado pela autora)

Anexo B - Tabela: Visão geral dos sistemas de certificação e quadros regulamentares existentes e previstos

Anexo C – Folheto informativo de segurança disponibilizado pela Bondalti

Anexo D – Guião de Entrevista Semiestruturada



Código da Norma	Título	Versão/Ano	Aplicação
ISO 14687:2019	Hydrogen Fuel Quality	2019	Especifica as características de qualidade para o combustível hidrogénio, de modo a garantir a uniformidade do produto hidrogénio na produção distribuição.
ISO 19880:2020	Postos de Abastecimento	2020	Regulamenta infraestrutura de abastecimento de hidrogénio gasoso
IEC 62282-2-100	Fuel Cells Modules - Safety	2020	Padrões para células de combustível - Segurança
ISO/TC 197	Tecnologias de hidrogénio	1990	Define padrões internacionais para produção, armazenamento, transporte e uso do hidrogénio.
ISO 14687	Hydrogen Fuel Quality	2019	Especificações da qualidade do hidrogénio para aplicações industriais e em células de combustível.
ISO 19880-10	Hidrogénio Gasoso	2020	Gestão de risco de postos de abastecimento, fornecimento e operação com hidrogénio, equipamento e componentes.
ISO 22734	Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applicatio	2019	Define a construção, segurança e requisitos técnicos de eletrolisadores
ISO 16110-1	Hydrogen generators using fuel processing technologies — Part 1: Safety	2007	Segurança em Geradores de H2
ISO 11114-1:2020	Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents Part 1: Metallic materials	2020	Requisitos de segurança de cilindros metálicos
ISO 11119	Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes	2016 - 2020	Define os requisitos técnicos construtivos para reservatórios de gases
ISO 9809	Gas cylinders — Design, construction and testing of refillable seamless steel gas cylinders and tub	2019 - 2021	Define o desenho, construção e teste de cilindros e tubos de gás
ISO 20421-1:2019	Cryogenic vessels — Large transportable vacuum-insulated vessels	2017 - 2022	Requisitos para reservatórios para gases liquefeitos
ISO 21009	Cryogenic vessels — Static vacuum-insulated vessels	2022 - 2024	Requisitos para reservatórios para gases liquefeitos
ISO 21010:2017	Cryogenic vessels — Gas/material compatibility		Compatibilidade de materiais em reservatórios criogénicos
ISO 21013	Criogenic Vessels - Valves	2012 - 2025	Requisitos de válvulas para reservatórios criogénicos - Parte 1 - 4
ISO 21028	Cryogenic vessels — Toughness requirements for materials at cryogenic temperature	2016 - 2018	Requisitos para resistência de materiais a temperaturas criogénicas
ISO 21029	Cryogenic vessels — Transportable vacuum insulated vessels of not more than 1 000 litres volum	2015 - 2019	Requisitos para resistência de materiais a temperaturas criogénicas abaixo de 1000 l de volume
EN 1918:2016	Gas infrastructure - Underground gas storage - Part 1: Functional recommendations for storage in a	2016	Armazenamento subterrâneo de gases
IEC 62282-8-202	Fuel Cells Modules - Safety	-	Segurança de Sistemas "Power to Power" (Futura Norma)
IEC/TC 31	Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres		Equipamentos para ambientes explosivos - ATEX
ASME B 31.12	Hydrogen Piping and Pipelines	2023	Requisitos para gasodutos
API STD 1104	Standard for welding pipeline and related facilities	2001	Soldaduras em gasodutos
ISO 13623:2017	Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems	2017	Indústrias do Petróleo e do Gás Natural Sistemas de Transporte por Gasoduto
Diretiva ATEX 2014/34/CE	Aparelhos utilizados em atmosferas potencialmente explosivas (Diretiva ATEX)	2014	Relativa à aproximação das legislações dos estados-membros sobre aparelhos e sistemas de proteção destinados a ser utilizados em atmosferas potencialmente explosivas.
CEE 67	Tecnologias de hidrogénio		
IEA HIA	International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement	1977	Colaboração internacional de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias do hidrogénio. O objetivo é acelerar a implementação do hidrogénio como vetor energético limpo, seguro e sustentável. Aborda os temas da produção renovável de hidrogénio, armazenamento e conversão energética, segurança e regulamentação, hidrogénio offshore e nuclear, certificação e rastreabilidade, materiais para armazenamento e sistemas de hidrogénio.
IEC 60079 (série)	Atmosferas Explosivas	2025	Classificação de zonas e proteção de equipamentos em áreas explosivas
IEC 61508	Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems	2010	Segurança funcional de sistemas elétricos/eletrônicos/eletrônicos programáveis relacionados à segurança", é um padrão internacional que estabelece os requisitos para sistemas que empregam componentes eletrônicos para garantir a segurança funcional
IEC 61511 (todas as partes)	Segurança funcional - Sistemas instrumentados de segurança para o setor da indústria de processo	2025	Estabelece os requisitos para sistemas instrumentados de segurança (SIS) utilizados na indústria de processo para reduzir riscos.
ISO 31000:2018	Gestão de Risco	2018	Diretrizes para identificação, avaliação e mitigação de riscos
ISO 45001:2018	Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional	2018	Sistema de gestão de SST em instalações técnicas
EN 17124:2018	Hydrogen fuel - Product specification and quality assurance for hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen - Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for vehicles	2018	Requisitos mínimos para hidrogénio usado em células de combustível
Regulamento REACH CE 1907/2006	Registo, avaliação, autorização e restrição de substâncias químicas (REACH), que cria a Agência Europeia das Substâncias Químicas	2006	Avaliação, registo e autorização de substâncias — inclui gases
Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020	Plano Nacional do Hidrogénio	2020	Define objetivos, metas e prioridades para o hidrogénio verde em Portugal
Decreto-Lei n.º 62/2020	Organização e o funcionamento do Sistema Nacional de Gás	2020	Íntegra o hidrogénio e os gases renováveis no SN do gás natural
Portaria n.º 98-A/2022	Regulamento do Sistema de Incentivos de Apoio à Produção de Hidrogénio Renovável e Outros Gases Renováveis	2022	Financiamento e elegibilidade de projetos de hidrogénio renovável
Despacho n.º 806-C/2022 (DGEG)	Regulamento da Rede Nacional de Transporte de Gás	2022	Regras para admissão e transporte de H <sub>2</sub> na rede nacional
RTIEBT - Portaria n.º 949-A/2006	Regras técnicas para instalações elétricas BT — inclui terras e proteção contra incêndios	2006	Conjunto de normas essenciais que visam garantir que estas instalações sejam seguras, eficientes e em conformidade com as exigências legais. Neste artigo, abordaremos a importância das RTIEBT, os principais pontos das regras e como assegurar que a sua instalação está em conformidade.
DL n.º 79/2025	Funcionamento do Sistema Nacional de Gás	2025	Atualização do regime jurídico do SN do gás — inclui H <sub>2</sub> verde

## Anexo A – Tabela simplificada de normas e legislação aplicáveis. (Compilado e adaptado pela autora)



## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

Market/jurisdiction	Name	Purpose	Linked to incentives	Product	Production pathways	Status	Emissions intensity
Australia	<a href="#">Hydrogen Production Tax Incentive (HPTI)</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Renewable electricity	Under development	0.6
Brazil	<a href="#">Brazilian System of Hydrogen Certification (SBCH2)</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	7
British Columbia (Canada)	<a href="#">Low Carbon Fuel Standard (LCFS)*</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	14.9 (default)
California (United States)	<a href="#">Low-carbon fuel standard (LCFS)*</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	1.3-19.7 depending on the pathway
Canada	<a href="#">Clean Hydrogen Investment Tax Credit</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Electrolysis, Natural gas with CCUS	Operational	0.2/abr 0.75-2 < 0.75
Canada	<a href="#">Clean Fuel Regulations*</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Electrolysis and gas reforming	Operational	3-18 depending on the pathway
China	<a href="#">Standard and Evaluation of Low-Carbon Hydrogen, Clean Hydrogen and Renewable Hydrogen (China)</a>	Voluntary		Hydrogen	All	Operational	Low-carbon hydrogen: 14.5 Renewable hydrogen, clean hydrogen: 4.9
European Union	<a href="#">CertifHy</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity	Operational	4.4 (renewable)
European Union	<a href="#">CertifHy</a>	Voluntary		Hydrogen	Nuclear electricity, Fossil fuels with CCUS	Operational	4.4 (low-carbon)
European Union	<a href="#">TÜV SÜD CMS 70</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity, Biomethane, Glycerine	Operational	2.8-3.4
European Union	<a href="#">TÜV SÜD CMS 70</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity, Biomethane, Glycerine	Operational	2.8-3.4
European Union	<a href="#">ISCC EU</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity	Operational	3.4
European Union	<a href="#">REDcert</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity	Operational	3.4
European Union	<a href="#">EU Taxonomy</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	3
European Union	<a href="#">Renewable Energy Directive</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Renewable electricity	Under development	3.4
European Union	<a href="#">Hydrogen and Decarbonised Gas Package</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Non-renewable pathways	Under development	3.4
European Union	<a href="#">TÜV Rheinland H2.21</a>	Voluntary		Hydrogen	All	Operational	2.9
France	<a href="#">France Ordinance No. 2021-167</a>	Regulatory		Hydrogen	All	Under development	High-carbon > 3.38 (all sources) Low-carbon ≤ 3.38 (all sources) Renewable ≤ 3.38 (renewable)
India	<a href="#">Green Hydrogen Standard</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Renewable energy including electrolysis and biomass	Under development	Green hydrogen: < 2 kg CO <sub>2</sub> -eq/kg H <sub>2</sub>
International	<a href="#">GH2 Green Hydrogen Standard</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity	Operational	1
International	<a href="#">Climate Bonds Standard &amp; Certification Scheme</a>	Voluntary		Hydrogen	Electrolysis, Natural gas, Waste biomass	Operational	2022: 3.0 2030: 1.5 2040: 0.6 2050: 0.0
International	<a href="#">World Business Council of Sustainable Development</a>	Voluntary		Hydrogen	All	Proposal	6 (reduced-carbon) 3 (low-carbon) 1 (ultra-low carbon)
International	<a href="#">Bureau Veritas</a>	Voluntary		Hydrogen	Renewable electricity	Operational	2
Japan	<a href="#">Hydrogen Society Promotion Act</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Under development	3.4
Korea	<a href="#">Clean Hydrogen Certification Scheme</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	Grade 1: 0-0.1 Grade 2: 0.1-1 Grade 3: 1-2 Grade 4: 2-4
Oregon (United States)	<a href="#">Clean Fuels Program*</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	1.6-24.6 depending on the pathway
United Kingdom	<a href="#">UK Low Carbon Hydrogen Standard; UK Low Carbon Hydrogen Certification Scheme</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Electrolysis, Natural gas with CCUS, Biomass and waste	Operational (certification scheme under development)	2.4
United Kingdom	<a href="#">Renewable Transport Fuel Obligation</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	Renewable energy excluding bioenergy	Operational	4
United States	<a href="#">Clean Hydrogen Production Tax Credit</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Under development	2.5-4 2.5-1.5 1.5-0.45 <0.45
United States	<a href="#">Clean Hydrogen Production Standard (CHPS)</a>	Regulatory		Hydrogen	All	Operational	4
Washington State (United States)	<a href="#">Clean Fuels Standard*</a>	Regulatory	✓	Hydrogen	All	Operational	0.8-13.5 depending on the pathway

### Anexo B - Visão geral dos sistemas de certificação e quadros regulamentares existentes e previstos (International Energy Agency, 2024)



**ATENÇÃO**

**RESPEITE INTEGRALMENTE AS INDICAÇÕES DE SEGURANÇA E A SINALIZAÇÃO RODOVIÁRIA**

**COMPORTAMENTOS PROIBIDOS**



**UTILIZE OS EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL INDICADOS PELA SINALIZAÇÃO DE SEGURANÇA E SAÚDE**

**EVITE O ACIDENTE**

**PROTEJA-SE E LEMBRE-SE...**

**A SEGURANÇA COMEÇA POR SI**

**OBRIGADO PELA SUA COLABORAÇÃO**

**EMERGENCIA**

**ALARME**

(Sons emitidos por sirene)

SINAIS		SIGNIFICADO	QUE FAZER?
Grau I	Sons Curtos e Espaçados .....	Situação de Alerta	Manter a calma e cumprir as indicações do seu acompanhante.
Grau II	Som Intermitente - - - - -	Situação Controlável	Se estiver a conduzir um veículo, estacione-o, desligue-o e deixe a chave na ignição.
Grau III	Som Contínuo —————	Situação Controlo Difícil	Tendo em atenção a direção do vento, afaste-se das instalações fabris e dirija-se para os LOCAIS DE REUNIÃO.
FIM	2 Sons Curtos ..	Fim de Emergência	Retomar as atividades interrompidas.

**Nº Telefone de emergência PAD: 234 810 462**

**Nº Telefone de emergência PCA: 234 810 333**

**Nº Telefone do Posto Médico: 234 810 489**

**Em situação de emergência só utilize estes números se for estritamente necessário**

**Esteja atento às informações difundidas pela instalação sonora**



**INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA**

A Bondalti Chemicals dedica-se à produção química tendo por base rigorosa padrões de segurança

Este folheto faz parte de um programa de prevenção que visa proporcionar a informação necessária à SUA SEGURANÇA

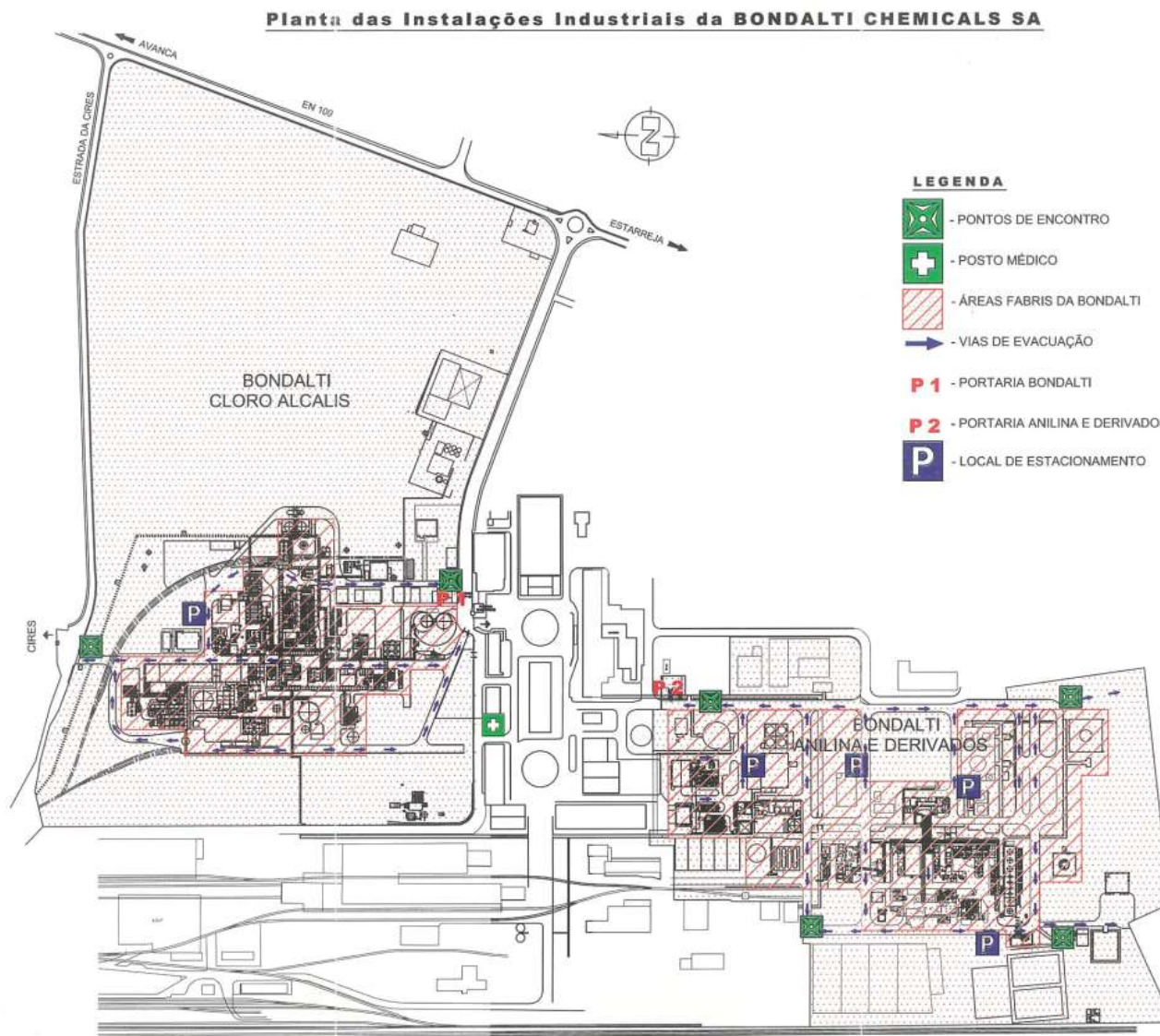


Actuação Responsável

No final da sua visita, caso não tenha interesse neste folheto, pedimos-lhe que o devolva juntamente com o seu cartão de identificação  
O Ambiente agradece

**AMBIENTE E SEGURANÇA**





Anexo C – Folheto informativo de segurança disponibilizado pela Bondalti



## Guião de entrevista – Hidrogénio verde

- Qual o histórico e que projetos relacionados com o hidrogénio verde têm em curso? Têm alguma previsão para futuros investimentos de maior dimensão nesta área?
- Comparativamente a outras fontes de energia, como classifica a importância e potencial do hidrogénio verde, atendendo ao contexto atual e à transição energética?
- Quais os principais desafios técnicos e económicos para a implementação do hidrogénio verde em Portugal?
- Que políticas e regulamentações são mais relevantes no setor?
- A legislação portuguesa (ou europeia) adota uma abordagem mais preventiva (cautelosa) ou mais adaptativa (inovadora)?
- Entende que a legislação atual existente em Portugal, nomeadamente a que define os critérios específicos a adotar em termos de segurança, é adequada e suficiente? O que deveria ser incluído ou aprofundado numa próxima versão, ou até numa diretiva específica para instalações que operam com hidrogénio verde? Existem barreiras legais ou regulamentares ao desenvolvimento do setor do hidrogénio?
- Que papel deve o Estado assumir na promoção do hidrogénio verde e que tipo de incentivos deverá promover para tornar esta tecnologia competitiva e atrativa para os investidores?
- Comparativamente com outras tecnologias de fontes de energia, que tiveram uma evolução muito grande nos últimos anos, por exemplo a solar fotovoltaica, como classifica a maturidade desta tecnologia em termos de potencial de evolução? Quais são os principais desafios tecnológicos na produção de hidrogénio verde atualmente?
- Quais as maiores dificuldades que prevê na implementação de projetos de hidrogénio verde em grande escala? Que tipo de infraestruturas e qual a evolução que a tecnologia do hidrogénio verde terá de sofrer para se tornar competitiva?
- As infraestruturas atuais estão preparadas para lidar com grandes concentrações de hidrogénio?
- No caso de uma fuga de hidrogénio, ou de uma emergência, quais os procedimentos imediatos a adotar?

## Segurança nas Operações com Hidrogénio Verde em Portugal

- Existe algum histórico de acidentes na operação com H<sub>2</sub> nesta empresa?
- A questão da segurança nas operações de produção, transporte, armazenamento e utilização final de hidrogénio verde tem um grande caminho de evolução pela frente, ou pode-se considerar que já se atingiu um patamar bastante confortável para considerarmos as nossas instalações seguras?
- Quais são as ferramentas/equipamentos de segurança preventivas e corretivas que a instalações atualmente dispõem? (sistemas automáticos de controlo, sistemas de extinção e deteção autónomos, ventilação, ...).
- A nível de monitorização do sistema, existe um sistema de comando e controlo que opera em tempo real, monitorizando as principais medidas, alarmes, estados dos dispositivos, e que permite uma rápida paragem e atuação dos dispositivos de segurança para prevenção de acidentes?
- São promovidas reuniões onde é solicitada a participação conjunta dos operadores, responsáveis de segurança e de outros departamentos relevantes, onde todos os intervenientes têm oportunidade de expor e debater temas relacionados com segurança ou colaborar com sugestões de melhorias a implementar?
- Os procedimentos de segurança implementados, envolvem contactos com meios externos de emergência, tais como bombeiros, meios de emergência externa, que participam em simulacros frequentes para testar a eficácia e a capacidade de reação das equipas em termos de emergência?
- Em termos de segurança, têm algumas “*lessons learned*” dos projetos em curso que possam ser aplicáveis a projetos futuros? (riscos identificados, oportunidades de melhoria, falhas recorrentes, ...).
- É promovido algum tipo de intercâmbio de informação relacionada com segurança entre parceiros ou outras empresas do setor?
- Do ponto de vista da segurança, quais as oportunidades de melhoria e medidas que entendem ser importantes implementar em projetos futuros? Sem estar a considerar os custos, quais as medidas que no seu entender poderiam ser consideradas para melhorar ou otimizar a segurança das instalações?

### Anexo D – Guião de entrevista semiestruturada