



# **O PAPEL DO HIDROGÉNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DA UNIÃO EUROPEIA: ESTUDO DE CASOS**

**Paulo Alexandre Nogueira Vaz**

Dissertação submetida à Escola Superior de Tecnologia e Gestão para a obtenção de  
Grau de Mestrado em Energias Renováveis e Eficiência Energética

Orientador:

Professor Doutor Luís Manuel Frölen Ribeiro

Bragança, 2021



## **Agradecimentos**

Desejo expressar os mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Luís Manuel Frölen Ribeiro pela disponibilidade prestada para a orientação desta dissertação, pela sua dedicação demonstrada ao longo deste projeto e por todos os conhecimentos que me foram transmitidos.

A todos os professores com os quais, durante o meu percurso académico, tive a oportunidade de adquirir conhecimentos essenciais à minha formação e que hoje me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, obrigado por todo o esforço, dedicação, carinho, compreensão e paciência. À minha família que de uma forma ou de outra esteve sempre presente, obrigada pelo apoio e pelo carinho.

Aos meus amigos, que me acompanharam nesta aventura académica, pelo apoio, pelos momentos fantásticos e pelas memórias que ficam.

À Ana Gonçalves, pela paciência, pelo apoio, por aquela palavra de motivação e pela amizade.

## **Resumo**

Nesta dissertação é avaliado o papel do hidrogénio na transição energética da União Europeia (UE) fazendo uma análise a vários casos de estudo. São identificadas as características do hidrogénio, assim como os diferentes métodos de produção, armazenamento e distribuição, até chegar à utilização do mesmo. Foi analisada a estratégia da UE para o hidrogénio identificando os seus pontos essenciais e as metas a cumprir. Além disso, foram também abordadas as estratégias nacionais de diversos países da UE, incluindo a estratégia portuguesa para o hidrogénio, bem como identificados diversos projetos implementados, em desenvolvimento e em investigação.

A identificação de diversos projetos a nível europeu e nacional demonstram que existe um compromisso dos países numa implantação crescente do hidrogénio. Dos diferentes métodos de produção, os que apresentam eficiências mais altas são os que utilizam combustíveis fósseis, no entanto, para se produzir hidrogénio limpo, o processo que mais se enquadra na estratégia europeia é a eletrólise. Apesar de diversos países possuírem estratégias nacionais para o hidrogénio, estas divergem de acordo com a visão de cada um dos países. Assim, as abordagens variam a nível dos setores prioritários e dos objetivos principais, pois apesar de todos eles terem os mesmos objetivos, estes variam ao nível da prioridade em cada país. Contudo, é claro que o hidrogénio assume um papel de destaque na transição energética e possui ainda um enorme potencial de expansão e implementação.

**Palavras-chave:** Transição energética, descarbonização, União Europeia, hidrogénio



## **Abstract**

In this dissertation the role of hydrogen in the energy transition of the European Union (EU) is evaluated by analyzing several case studies.. The characteristics of hydrogen are identified, as well as the different methods of production, storage, and distribution, until reaching it is use. The EU hydrogen strategy was analyzed, identifying it is essential points and the targets to achieve. In addition, the national strategies of several EU countries were also addressed, including the Portuguese strategy for hydrogen, as well as identified several implemented projects, under development and research.

The identification of several projects at European and national level demonstrates that there is a commitment of countries to an increasing deployment of hydrogen. Of the different production methods, those with the highest efficiencies are those using fossil fuels, however, to produce clean hydrogen, the process that best fits the European strategy is electrolysis. Although several countries have national hydrogen strategies, these differ according to each country's vision. Thus, approaches vary at the level of priority sectors and main objectives, as although they all have the same objectives, these vary at the level of priority in each country. However, hydrogen plays a prominent role in the energy transition and still has enormous potential for expansion and implementation.

**Keywords:** Energy transition, decarbonization, European Union, hydrogen



# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento teórico e estado da arte .....	1
1.2. Objetivos e motivações.....	6
1.3. Organização da dissertação .....	6
2. Fundamentos teóricos.....	8
2.1. O Hidrogénio.....	8
2.2. O Hidrogénio – Comparação com outros combustíveis.....	8
2.2.1. Características físicas .....	9
2.3. Tipos de Hidrogénio .....	13
2.4. Fontes de Hidrogénio.....	14
2.5. Produção, armazenamento, distribuição e aplicações de hidrogénio.....	17
2.5.1. Métodos de Produção de Hidrogénio.....	17
2.5.2. Armazenamento de Hidrogénio.....	34
2.5.3. Distribuição do hidrogénio .....	39
2.5.4. Aplicações do Hidrogénio .....	41
3. Materiais e Métodos .....	50
3.1. Estratégia europeia para o Hidrogénio .....	50
3.1.1. Denominação do Hidrogénio.....	53
3.1.2. Metas e prazos .....	54
3.1.3. Investimento .....	57
3.1.4. Setor dos transportes .....	58
3.2. Estratégia portuguesa para o Hidrogénio .....	62
3.2.1. Enquadramento.....	62
3.2.2. Iniciativas.....	63
3.2.3. Fases, Metas e Objetivos.....	65
3.2.4. Cadeia de valor de hidrogénio em Portugal.....	68
3.3. Estratégias Nacionais para o Hidrogénio de diversos membros da UE .....	72
3.3.1. Alemanha.....	72
3.3.2. Países Baixos .....	75
3.3.3. Hungria.....	77
3.3.4. França.....	79

3.3.5. Espanha.....	82
3.4. Projetos de Hidrogénio em Portugal.....	83
3.5. Projetos de Hidrogénio em países da UE.....	93
4. Resultados e Discussão .....	101
5. Conclusão.....	109
Referências bibliográficas .....	112

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Projeção do consumo de energia global de 1980-230. Fonte: (Pareek et al.,2020).....	1
Figura 1.2 Cota de energia de fontes renováveis na UE no consumo final de energia. Fonte: (Eurostat, 2020). .....	2
Figura 1.3 Quota de energias renováveis na produção de eletricidade na UE,2005-2017. Fonte:(Tribunal de Contas Europeu, 2019) .....	3
Figura 1.4 Evolução da Potência instalada em Portugal continental. Fonte:(APREN, 2020) .....	4
Figura 2.1 Fontes de hidrogénio. Adaptada: (Acar and Dincer, 2014). .....	15
Figura 2.2 Caminhos para produção de energia através de fontes primarias de energia verde. Fonte:(Dincer, 2012).....	16
Figura 2.3 Múltiplos estágios do processo de reforma a vapor para produção de hidrogénio. Fonte: (Kumar et al., 2020) .....	19
Figura 2.4 Múltiplos estágios do processo de reforma autotérmica para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	21
Figura 2.5 Múltiplo estágio do processo pirolise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).....	24
Figura 2.6 Múltiplos estágios do processo gaseificação de biomassa para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	25
Figura 2.7 Múltiplos estágios do processo bio-fotólise direta para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	27
Figura 2.8 Múltiplos estágios do processo bio-fotólise indireta para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	27
Figura 2.9 Múltiplos estágios do processo Foto Fermentação para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	28
Figura 2.10 Múltiplos estágios do processo Fermentação Escura para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	29
Figura 2.11 Estágios do eletrólise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	30
Figura 2.12 Esquema simplificado de um eletrolisador. Fonte: (DGEG, 2018). .....	31
Figura 2.13 Comparação entre os eletrolisadores do tipo AEC, PEM, SOEC. Fonte: (Arnemann, 2019). .....	32
Figura 2.14 Estágios do processo de termólise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	32
Figura 2.15 Estágios do processo de foto eletrolisem para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). .....	33
Figura 2.16 Formações cavernosas salinas. Fonte:(Chatzimarkakis,2020) .....	36
Figura 2.17 Potencial de armazenamento de hidrogénio em cavernas Salinas. Fonte: (Chatzimarkakis, 2020). .....	36
Figura 2.18 Modelo simplificado de um hidreto metálico. Fonte: (Abe et al, 2019). .....	38
Figura 2.19 Métodos de transporte de hidrogénio. Fonte: (USDOE, 2020). .....	39
Figura 2.20 Aplicações do hidrogénio. Adaptada: (Yilanci et al, 2008). .....	41
Figura 2.21 Diagrama de uma célula de combustível. Fonte: (Almeida and Moura, 2006). .....	43
Figura 2.22 Sistema de propulsão em veículos a motor. Fonte: (Deloitte, 2020) .....	47
Figura 2.23 Princípio de operação de um FCEV. Fonte: (Deloitte, 2020). .....	48
Figura 2.24 Eficiência energética de um FCEV. Fonte: (Deloitte, 2020) .....	48

Figura 3.1 Diferentes formas de utilizar o hidrogénio para o processo de descarbonização. Fonte: (Chatzimarkakis, 2020) .....	51
Figura 3.2 A utilização atual do hidrogénio. Fonte:( FCH, 2019).....	51
Figura 3.3 Infraestrutura de transporte gás natural na Europa (linhas azuis e vermelhas) e novas infraestruturas de transporte de hidrogénio (linhas laranjas). Fonte:( Chatzimarkakis, 2020) ....	55
Figura 3.4 Desenvolvimento do hidrogénio na UE. Fonte:( FCH, 2019). .....	57
Figura 3.5 Comparação de diversos sistemas de armazenamento para uma autonomia de 500km. Fonte: (DGEG, 2018).....	59
Figura 3.6 Velocidade de abastecimento, requisitos de espaço e abastecimento. Fonte:(FCH, 2019).....	60
Figura 3.7 Futuros postos de abastecimento de hidrogénio. Fonte: (FCH, 2019).....	61
Figura 3.8 Representação da evolução do PCS do gás face à incorporação de hidrogénio. Fonte: (República Portuguesa, 2020).....	63
Figura 3.9 Fases de implementação do EN-H2. Fonte: (Diário da República, 2020).....	66
Figura 3.10 Esquema da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção à utilização final. Fonte: (Diário da República, 2020).....	68
Figura 3.11 Esquema da cadeia de valor P2G. Fonte: (República Portuguesa, 2020) .....	69
Figura 3.12 Esquema da cadeia de valor P2M. Fonte: (República Portuguesa, 2020). .....	70
Figura 3.13 Esquema da cadeia de valor P2I. Fonte: (República Portuguesa, 2020).....	70
Figura 3.14 Esquema da cadeia de valor P2P. Fonte: (República Portuguesa, 2020).....	71
Figura 3.15 Esquema da cadeia de valor P2F. Fonte: (República Portuguesa, 2020).....	72
Figura 3.16 Hydrogen Valleys na Hungria. Fonte: (Hungary’s national hydrogen strategy, 2021) .....	78
Figura 3.17 Localização estratégica de Sines. Fonte: (República Portuguesa, 2020). .....	85
Figura 3.18 Composição do projeto de produção de hidrogénio verde á escala industrial em Sines. Fonte: (República Portuguesa, 2020).....	85
Figura 3.19 Primeira estação de abastecimento de hidrogénio em Portugal. Fonte: (PRF, 2021). .....	90
Figura 3.20 Central termoelétrica da Tapada do Outeiro. Fonte: (SAPO, 2020d).....	92
Figura 3.21 Regiões /cidade envolvidas na iniciativa “FCH 2JU. Fonte: (Cebolla and Navas, 2019).....	93

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Densidade de várias substâncias no estado de vapor e líquido. Adaptado: (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001). .....	10
Tabela 2.2 Volume específico do hidrogénio. Adaptado: (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001). .....	10
Tabela 2.3 Poder calorífico para vários combustíveis. Adaptado: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017) .....	11
Tabela 2.4 Comparação entre as propriedades do hidrogénio, metano e gasolina.....	12
Tabela 2.5 Resumo das tecnologias de reforma de combustíveis fósseis. Adaptada: (Dincer and Acar, 2014).....	22
Tabela 2.6 Comparação dos processos de Bio-Fotólise, foto fermentação e fermentação escura. Adaptado: (Dincer and Acar, 2014).....	29
Tabela 2.7 Comparação dos métodos de armazenamento de hidrogénio. Adaptado: Nikolaidis and Poullikkas, 2017. ....	39
Tabela 3.1 Fontes potenciais de água para eletrolise e opções de tratamento necessárias. Fonte: (República Portuguesa, 2020).....	65
Tabela 3.2 Proposta de metas e objetivos de incorporação, em volume, de hidrogénio nos vários setores. Fonte: (República Portuguesa, 2020). ....	67
Tabela 3.3 Quadro geral da estratégia alemã para o hidrogénio. Fonte: (Mitsui & Co, 2020). ...	75
Tabela 3.4 Estrutura preliminar para a execução do projeto de Sines. Fonte: (República Portuguesa, 2020). ....	86
Tabela 4.1 Quadro comparativo de métodos de produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis.....	101
Tabela 4.2 Quadro comparativo de métodos termoquímicos de produção de hidrogénio através da biomassa. ....	102
Tabela 4.3 Quadro comparativo de métodos biológicos de produção de hidrogénio. ....	103
Tabela 4.4 Quadro comparativo de métodos de produção de hidrogénio através da dissociação da água. ....	103
Tabela 4.5 Utilização do hidrogénio nos diversos setores. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020).....	105
Tabela 4.6 Principais objetivos dos países europeus. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020). ....	105
Tabela 4.7 Estratégias dos países europeus. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020). ....	105
Tabela 4.8 Metas dos países europeus. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020). ....	106
Tabela 4.9 Metas a atingir a nível de potência eletrolítica instalada. ....	108

## **Lista de acrónimos e abreviaturas**

AEC - Eletrolisador Alcalino

ATR - Reforma Autotérmica

BEV - Veículo elétrico movido a baterias Battery Electric Vehicle

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – Etano

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – Propano

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – Butano

CH<sub>4</sub> – Metano

CO – Monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

FCEV - Veículo elétrico movido a células de combustível (Fuel cell electric vehicle)

H<sub>2</sub> – Hidrogénio

H<sub>2</sub>O – Água

IPCEI – Projecto Importante de Interesse Europeu Comum (Important Project Common European Interest)

Nox – Óxidos de Azoto

PCU – Unidade de Controlo de Potência Power Control Unit

PEM - Eletrolisador com membrana de troca de protões

PNEC2030 – Plano Nacional Energia Clima 2030

POX - Oxidação Parcial

PSA – Pressure Swing Adsorption

RNC2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbonica 2050

SOEC - Eletrolisador de óxido sólido

SR - Reforma a vapor

TRL – Níveis de maturidade da tecnologia (Technology readiness levels)

UE – União Europeia

WGS – Water Gas Shift



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento teórico e estado da arte

A energia tem um papel crucial no crescimento e no desenvolvimento das sociedades, sendo vital a nível do desenvolvimento socioeconómico (Pareek *et al.*, 2020). O mundo encontra-se num processo de transição baseado num desenvolvimento sustentável a nível energético. Atualmente, o sistema energético não é visto apenas pela sua capacidade de impulsionar o crescimento económico, mas sim pela sua capacidade de impulsionamento de modo sustentável (Opeymy, 2021). O desenvolvimento das sociedades no último século está associado à utilização de combustíveis fósseis quer para a produção de eletricidade quer para utilização como combustível, levando conseqüentemente a uma dependência entre estes dois campos (Pareek *et al.*, 2020). Assim, a utilização de combustíveis fósseis como principal fonte de energia levou irrefutavelmente a um grande desenvolvimento tecnológico num espaço temporal relativamente curto e conseqüentemente a um aumento dos gases com efeito de estufa (Kovac *et al.*, 2021). A Figura 1.1 apresenta as projeções para o consumo mundial de energia para o espaço temporal de 1980 até 2030. Desde 1980 até 2010, o consumo de energia tem vindo a aumentar, sendo que até 2030 prevê-se que continue a aumentar, atingindo valores de cerca de 37% mais em relação a 2010.

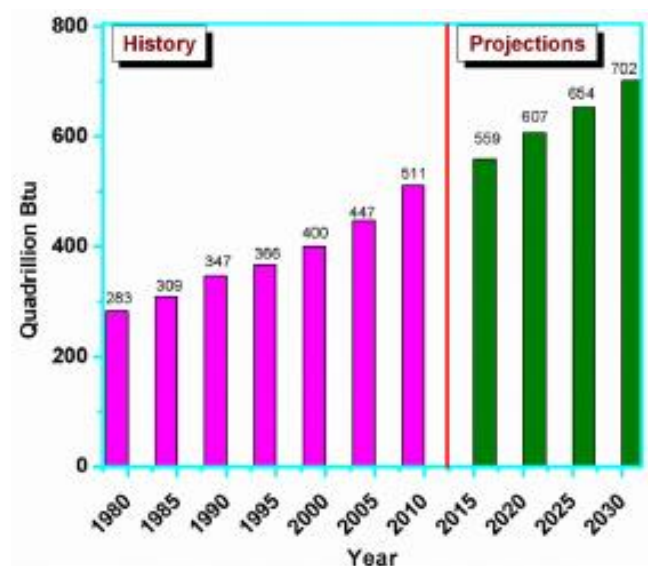


Figura 1.1 Projeção do consumo de energia global de 1980-230. Fonte: (Pareek *et al.*, 2020)

Desde a revolução industrial que as concentrações de gases com efeito de estufa têm vindo a aumentar tendo atingido valores considerados preocupantes. A pressão exercida sobre o planeta tem aumentado nos últimos 50 anos e os modelos adotados de produção, bem como a utilização dos recursos naturais e o consumo de bens tem contribuído para o aumento dessa mesma pressão. O crescimento da população mundial, muito dependente dos combustíveis fósseis, resultou num aumento da pressão sobre o Planeta. Deste modo, houve a necessidade de desenvolver, promover e implementar soluções alternativas economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis no setor energético e no setor dos transportes, com vista à substituição do sistema energético com base em carbonetos por um mais sustentável (Martin *et al.*,2020; Reddy *et al.*,2020).

Os países europeus, enquadrados numa política europeia, têm adotado políticas energéticas com o intuito de aumentar a utilização de energias renováveis para contribuir com a descarbonização dos estados-membros da UE. A UE propõe-se a atingir a neutralidade carbónica até ao ano de 2050, e essa meta só será atingida com um investimento na cota de energias renováveis, de modo a diminuir a dependência de combustíveis fósseis (Kakoulaki *et al.*, 2021).

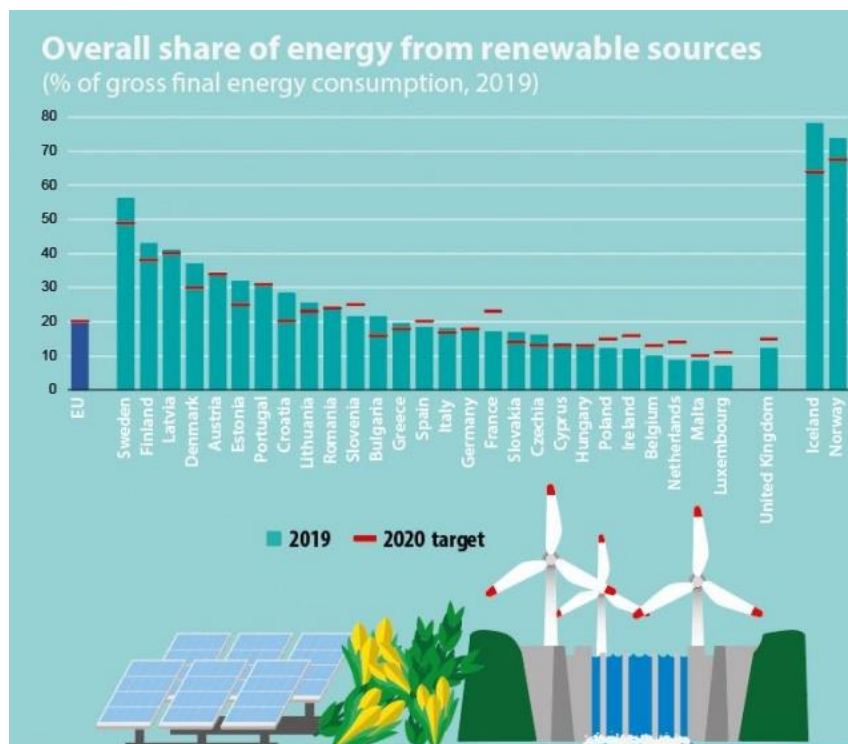


Figura 1.2 Cota de energia de fontes renováveis na UE no consumo final de energia. Fonte: (Eurostat, 2020).

A Figura 1.2 apresenta a cota de energias de fontes renováveis no consumo bruto de energia, em 2019, na UE. É possível observar que, em 2019, diversos países já tinham atingidas as suas metas para 2020. Destes países destacam-se Islândia, Noruega, Suécia, Dinamarca e Croácia sendo que, Portugal também atingiu as metas propostas para 2020 em 2019. A contribuição de fontes de energia renovável para o mix energético tem aumentado na última década, como apresentado na Figura 1.3, tornando-se na primeira fonte de obtenção de eletricidade (Zivar *et al.*, 2020).

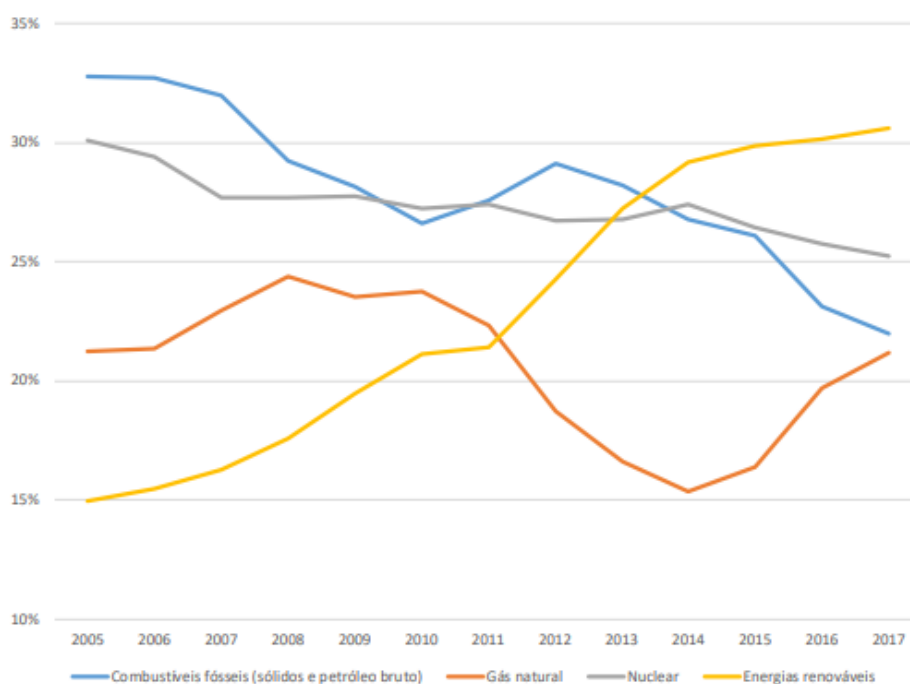


Figura 1.3 Quota de energias renováveis na produção de eletricidade na UE,2005-2017. Fonte:(Tribunal de Contas Europeu, 2019)

Na sociedade atual, é perceptível uma preocupação crescente em relação à influência do nosso sistema energético com o meio ambiente. Nos últimos anos, é possível verificar que existiu um forte investimento na produção de energia a partir de fontes de origem renovável na UE e consequentemente em Portugal, como podemos ver nas Figuras 1.2, 1.3 e 1.4.

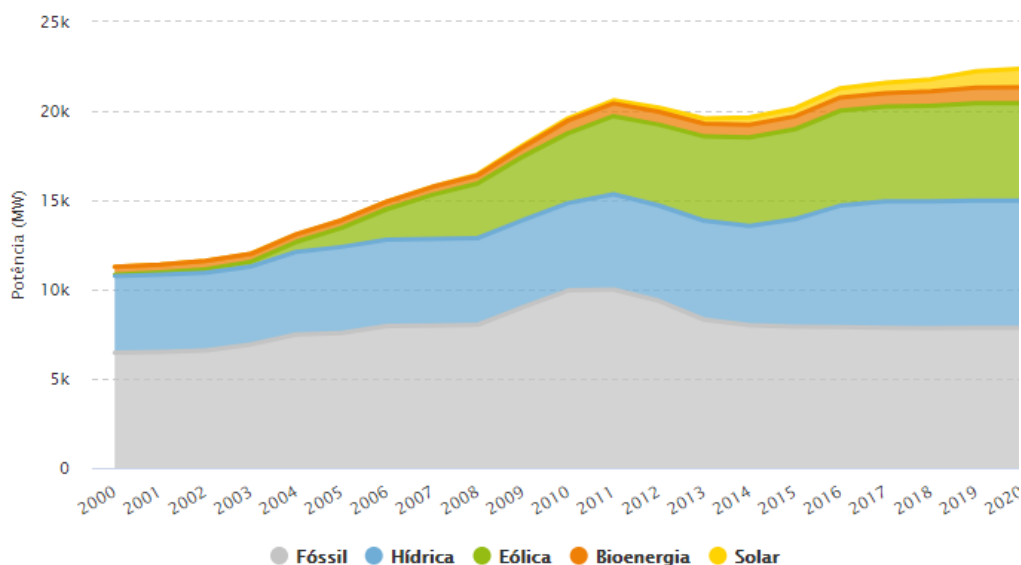


Figura 1.4 Evolução da Potência instalada em Portugal continental. Fonte:(APREN, 2020)

A UE fixou como objetivo a obtenção da neutralidade carbónica até ao ano de 2050, uma política extremamente ambiciosa, mas que os países europeus estão empenhados em cumprir. No âmbito do Pacto Ecológico Europeu, pretende-se tornar o continente europeu o primeiro a eliminar as emissões de gases com efeito de estufa na mesma proporção das que produz. Assim, os estados-membros enquadrados nesta política deverão individualmente implementar estruturas de modo a cumprir as metas acordadas.

O hidrogénio é visto como uma ferramenta fundamental a ser utilizada no setor energético e dos transportes de modo que a neutralidade carbónica seja atingida devido às suas características. O hidrogénio verde é um caminho a ser explorado para atingir a neutralidade carbónica pois é extraído de fontes de energia renováveis e é obtido através de métodos de produção que não emitem gases com efeito de estufa. Também é considerado como uma forma de aproveitar a energia elétrica produzida em excesso por fontes de energia renovável que são intermitentes, portanto, quando existem grandes quantidades de produção de eletricidade e não existe consumo suficiente, essa energia elétrica pode ser utilizada na produção de hidrogénio que pode ser armazenado e utilizado posteriormente. Deste modo, o hidrogénio assume um papel relevante na descarbonização e na estratégia europeia para atingir a neutralidade carbónica até 2050.

A energia obtida através do hidrogénio foi identificada como um fator chave para a transição energética, pois oferece conteúdo energético elevado (1kg de hidrogénio

contem 120MJ = 33,33kWh de energia), capacidade de armazenamento e flexibilidade, tornando-o assim um combustível para o transporte bem como para a produção de calor e eletricidade (Martin *et al.*, 2020) (Singh *et al.*, 2020) (Reddy *et al.*, 2020) (Abe *et al.*, 2019).

O hidrogénio é uma das matérias-primas principais para a produção de diversos químicos, em que por exemplo a produção de fertilizantes como o amoníaco representam mais de 50% da procura a nível global (Reddy *et al.*, 2020). No ano de 2019, o hidrogénio foi utilizado maioritariamente como um produto químico, com 80% do seu consumo global a ser atribuído a refinarias e à produção de amoníaco (Tlili *et al.*, 2019). Este elemento é utilizado em diversas aplicações tais como a síntese de amoníaco, a produção de metanol, na indústria do aço, em transportes sendo também utilizado nas células de combustível e em aplicações residenciais para aquecimento, arrefecimento e produção de eletricidade (Reddy *et al.*, 2020). Além disso, o hidrogénio é também um componente do Syngas, assim como o monóxido de carbono, sendo sintetizados de modo a produzir gasóleo verde, álcoois e ceras (Reddy *et al.*, 2020).

A UE classifica o hidrogénio limpo como uma área prioritária para atingir a neutralidade carbónica até ao ano de 2050. Este elemento é considerado um fator chave neste futuro sistema energético, pois é um vetor energético flexível, com aplicação na área dos transportes e da indústria que levará a uma redução nas emissões de partículas e de gases com efeito de estufa. No Espaço Económico Europeu a capacidade total de produção de hidrogénio em 2018 foi de 11,5 milhões de toneladas e apenas 1 a 4% da capacidade total foi corresponde ao hidrogénio obtido através de eletrólise (Parlamento Europeu, 2021). Segundo o Pacto Ecológico Europeu, a contínua descarbonização é um ponto essencial para atingir as metas climáticas de 2030 e 2050. O hidrogénio é visto como uma prioridade para a descarbonização das economias e do sistema energético daí ter sido criada uma estratégia europeia para o hidrogénio. Esta estratégia está dividida em duas fases, uma primeira fase até ao ano de 2030 e uma segunda até 2050. De acordo com a estratégia europeia para o hidrogénio, pelo menos 6 GW (através de eletrolisadores movidos a energias renováveis) deverão ser instalados entre os anos de 2020 e 2024, produzindo até 0,8 milhões de toneladas anuais de hidrogénio limpo. Até ao ano de 2030, espera-se que este valor suba até 40 GW. Na segunda fase desta estratégia, a procura de hidrogénio renovável irá aumentar ainda mais, diminuindo gradualmente a procura de produtos refinados. As refinarias, atualmente, consomem 30% da produção europeia de

hidrogénio para o processamento de derivados do petróleo. Com a implementação desta estratégia, espera-se que a procura por petróleo diminuirá, associada assim a um aumento da procura por hidrogénio limpo (FCH, 2019; Kakoulaki *et al.*, 2021; Parlamento Europeu, 2021) Com base com cumprimento do Pacto Ecológico Europeu, diversos países europeus estão a desenvolver estratégias nacionais para introduzir o hidrogénio nos seus sistemas energéticos (Sgobbi *et al.*, 2016).

Deste modo, este trabalho tem como principal foco analisar o hidrogénio como vetor energético no objetivo da UE de atingir a neutralidade carbónica até ao ano de 2050.

## **1.2.Objetivos e motivações**

A dissertação tem como principal objetivo analisar o papel do hidrogénio na transição energética da EU fazendo uma análise a vários casos de estudo. Assim, este trabalho passa por identificar e compreender quais os seus métodos de produção e de armazenamento, fazendo um comparativo entre eles, bem como a sua distribuição e utilização.

Pretende-se analisar a estratégia da UE para o hidrogénio identificando as suas metas, verificar quais estados-membros possuem a sua própria estratégia nacional e o papel do hidrogénio em Portugal. Pretende-se ainda identificar os projetos de hidrogénio verde, a nível europeu e nacional, que mostrem a implementação da estratégia europeia.

## **1.3.Organização da dissertação**

A dissertação está organizada em 5 capítulos.

No primeiro capítulo é efetuado um enquadramento geral do sistema energético europeu e nacional, a importância das energias renováveis e o papel do hidrogénio como vetor energético no processo de descarbonização do sistema energético.

O segundo capítulo contempla os fundamentos teóricos onde é abordado o hidrogénio, as suas características, as suas fontes e a sua classificação em cores. São identificados e caracterizados os diversos processos de produção, armazenamento, distribuição e aplicações do hidrogénio, com foco nas células de combustível.

O terceiro capítulo engloba os materiais e métodos onde é realizado um enquadramento do hidrogénio no panorama europeu atual, sendo feita uma análise à estratégia europeia para o hidrogénio identificando as suas metas, investimentos e o seu papel no sector dos transportes. Além disso, é também analisada a estratégia portuguesa e as estratégias de outros estados-membros da UE para o hidrogénio, identificando as metas a atingir, as iniciativas a implementar e caracterizar as cadeias de valor do hidrogénio.

Neste capítulo, engloba também a identificação dos projetos planeados ou já implementados de produção de hidrogénio verde, a nível europeu e nacional.

O quarto capítulo aborda os resultados e discussão dos mesmos, onde é feita uma análise comparativa entre os métodos de produção de hidrogénio e das diversas estratégias nacionais para o hidrogénio.

No quinto capítulo, o das conclusões, é feita uma síntese global do estudo realizado onde são expostas as principais conclusões do trabalho.

## **2. Fundamentos teóricos**

### **2.1.O Hidrogénio**

O hidrogénio é o elemento mais simples que podemos encontrar, correspondendo ao primeiro elemento da tabela periódica de Mendeliev, tem a menor massa atómica (1,008) e o menor número atómico. Na tabela periódica, este elemento está localizado no primeiro período e na família dos metais alcalinos, mas não faz parte da mesma pois não apresenta características físicas e químicas semelhantes às dos elementos dessa família. O átomo de hidrogénio possui a forma mais simples, sendo constituído por um eletrão que gravita em torno de um próton. A sua densidade é de 0,0899g/l, ou seja, cerca de 14,4 vezes mais leve que o ar a condições de temperatura e pressão normais (20°C e 1 atm).

O hidrogénio é um elemento químico gasoso, inodoro, insípido, incolor e não possui toxicidade. Além disso, tem grande capacidade de armazenar energia e é inflamável sendo que a sua forma mais estável é H<sub>2</sub> (dois átomos de hidrogénio ligados que formam uma molécula de gás de hidrogénio). Apenas o podemos encontrar em estado líquido se for sujeito a um ambiente criogénico, ou seja, sujeitos a temperaturas de aproximadamente -253°C.

Este elemento é considerado um dos elementos mais abundantes no Universo, mas praticamente não existe em estado livre na Natureza estando sempre associado a outros elementos. O hidrogénio é parte integrante de diversos tipos de substâncias orgânicas e inorgânicas, ou seja, quase todas as coisas que nos rodeiam, água, combustíveis, plantas, animais entre mais. Este elemento não é encontrado de forma livre na Natureza, mas sim na sua forma combinada, permitindo assim a sua obtenção por diversas fontes (eCycle, 2021; AP2H2, 2021; Wang *et al.*,2019; Abe *et al.*, 2019; Acar and Dincer, 2014).

### **2.2.O Hidrogénio – Comparação com outros combustíveis**

O hidrogénio é, normalmente, comparado com outros combustíveis à base de hidrocarbonetos que são mais utilizados. Os combustíveis à base de hidrocarbonetos possuem combinações de carbono e hidrogénio na sua estrutura molecular, formando geometrias únicas. O hidrocarboneto mais simples é o metano (CH<sub>4</sub>, cada molécula 4 átomos de hidrogénio e 1 átomo de carbono), em que também é um dos elementos

principais da constituição do gás natural (mais de 70%) (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001). Outros hidrocarbonetos conhecidos são o etano ( $C_2H_6$ ), o propano ( $C_3H_8$ ) e o butano ( $C_4H_{10}$ ). Estes hidrocarbonetos são considerados leves pois possuem menos de 5 átomos de carbono por molécula, uma vez que um átomo de carbono pesa cerca de 12 vezes mais que um átomo de hidrogénio. Por outro lado, a gasolina, gasóleo e outros derivados são considerados hidrocarbonetos pesados pois possuem vários átomos de carbono por molécula, o que conseqüentemente faz aumentar a massa molecular.

O hidrogénio puro não possui odor, cor ou sabor o que torna uma fuga praticamente impercebível. No entanto, em outros hidrocarbonetos, como o gás natural, são acrescentados alguns compostos com enxofre de modo que estes não sejam inodoros, e assim detetados mais rapidamente. O hidrogénio obtido através de reformação de outros combustíveis fósseis possui elementos como nitrogénio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, e entre outros. Outra causa que impossibilita a adição de compostos odoríferos deve-se ao facto de estes contaminarem as células de combustível, sendo estas uma das aplicações do hidrogénio (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001; Hydrogen Tools, 2021). O hidrogénio não é tóxico, mas pode atuar como um asfixiante, em caso de uma grande fuga em áreas fechadas este difunde-se rapidamente para preencher o volume. Em áreas abertas, o risco de asfixia é praticamente desprezível devido à alta taxa de difusão do hidrogénio. A elevada taxa de dispersão, provocada pela sua densidade em relação ao ar, faz com que o hidrogénio seja apontado como um combustível seguro, visto que em caso de fuga ele irá dispersar-se reduzindo o risco de explosão (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001; Hydrogen Tools, 2021).

### **2.2.1. Características físicas**

#### **Massa Volúmica**

A massa volúmica é dada pela quantidade de massa por unidade de volume, este valor só possui significado a uma temperatura e pressão específica, pois estas têm interferência na disposição molecular. Na Tabela 2.1 podemos ver a massa volúmica no estado líquido e

vapor de algumas substâncias (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

Tabela 2.1 Densidade de várias substâncias no estado de vapor e líquido. Adaptado: (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

<b>Substância</b>	<b>Massa Volúmica de Vapor (20°C, 1atm) kg/ m3</b>	<b>Massa Volúmica Líquida (no ponto de ebulição, 1atm) kg/ m3</b>
Hidrogénio	0,08376	70,8
Metano	0,65	422,8
Gasolina	4,4	700

### **Volume Específico**

O volume específico é o inverso da densidade e exprime o volume por unidade de massa. O hidrogénio no estado gasoso possui um volume específico de 11,9 m<sup>3</sup>/kg a uma temperatura de 20°C e 1 atm, já o volume específico do hidrogénio no estado líquido é de 0,014m<sup>3</sup>/kg a -253°C e 1 atm. Na Tabela 2.2 podemos ver o volume específico do hidrogénio no estado gasoso e líquido (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

Tabela 2.2 Volume específico do hidrogénio. Adaptado: (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

<b>Substância</b>	<b>Volume específico</b>	
	<b>Hidrogénio gasoso m3/kg</b>	<b>Hidrogénio líquido m3/kg</b>
Hidrogénio	11,9	0,014

### **Razão de Expansão**

A diferença de volume entre o hidrogénio no estado gasoso e o estado líquido pode ser estimado tendo em conta a razão de expansão. Assim, a expansão é dada pela razão entre o volume em que o gás ou o líquido são armazenados, comparados com o volume do gás ou líquido, à pressão atmosférica e a uma dada temperatura. Quando o hidrogénio é armazenado no estado líquido, ele vaporiza após a expansão nas condições atmosféricas resultando num conseqüente aumento de volume. A razão de expansão do hidrogénio é de 1:848, isto significa que no seu estado gasoso, às condições atmosféricas, este ocupa 848 vezes mais volume do que ocuparia no estado líquido. Quando o hidrogénio é

armazenado como um gás a alta pressão (3600 psi ou 250 bar) e a uma temperatura atmosférica (20°C), a sua razão de expansão para essa pressão atmosférica é de 1:240 (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

### **Poder calorífico**

Todos os combustíveis libertam uma determinada quantidade de energia quando reagem completamente com o oxigénio. O poder calorífico superior (PCS) representa a quantidade de calor produzida por um combustível quando este entra em combustão, em excesso de ar, em que os gases de escape são arrefecidos, e de modo que o vapor de água neles presente seja condensado. O poder calorífico inferior (PCI) representa o calor produzido por um combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar, sendo que a água presente nos gases de escape estão no estado gasoso.

A energia química dos combustíveis é dada em unidades de energia (MJ ou kcal) por quantidade de matéria (kg). Na Tabela 2.3 podemos ver o poder calorífico superior e inferior de diversos combustíveis (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

Tabela 2.3 Poder calorífico para vários combustíveis. Adaptado: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017)

<b>Combustível</b>	<b>Estado (à Temperatura e Pressão Ambiente)</b>	<b>PCS (MJ/kg)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>
Hidrogénio	Gasoso	141,9	119,9
Metano	Gasoso	55,5	50
Etano	Gasoso	51,9	47,8
Gasolina	Líquido	47,5	44,5
Gasóleo	Líquido	44,8	42,5
Metanol	Líquido	20	18,1

O hidrogénio possui a energia mais elevada por unidade de massa em comparação com outro combustível, visto que o hidrogénio é o elemento mais leve devido a não possuir átomos de carbono. A quantidade de energia libertada durante a reação do hidrogénio é cerca de duas vezes e meia do poder de combustão de um hidrocarboneto, isto implica que para a mesma massa, as explosões deste gás são mais destrutivas e rápidas. A duração da combustão tende a ser inversamente proporcional à energia de combustão, fazendo

com que os fogos de hidrogénio diminuam mais rapidamente do que o dos hidrocarbonetos (Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, 2001).

Na Tabela 2.4 é apresentado um resumo das diversas características de alguns combustíveis, nomeadamente o hidrogénio, o metano, que é o principal constituinte do gás natural, e a gasolina. Em condições normais de temperatura e pressão (1 atm e 20°C), a densidade do hidrogénio é 14 vezes mais baixa que a do ar (1,205Kg/m<sup>3</sup>) tal como o metano, que também possui uma densidade inferior à do ar, neste caso cerca de 2 vezes. Já a gasolina possui uma densidade 3,6 vezes superior à do ar. O hidrogénio é o elemento mais leve, visto que não possui átomos de carbono, daí possuir uma elevada energia por unidade de peso em relação aos outros combustíveis. A quantidade de energia libertada durante a reação do hidrogénio é cerca de 2,5 vezes superior à do metano, e cerca de 3 vezes superior à da quantidade de energia da gasolina.

Tabela 2.4 Comparação entre as propriedades do hidrogénio, metano e gasolina.

<b>Propriedades dos combustíveis</b>	<b>Hidrogénio</b>	<b>Metano</b>	<b>Gasolina</b>
<b>Densidade Vapor (20°C 1 atm) Kg/m<sup>3</sup></b>	0,08376	0,65	4,4
<b>Densidade Líquida (Ponto Ebulição 1 atm) Kg/m<sup>3</sup></b>	70,8	422,8	700
<b>PCS (MJ/Kg)</b>	141,9	55,5	47,5
<b>PCI (MJ/Kg)</b>	119,9	50	44,5
<b>Estado (25°C 1 atm)</b>	Gasoso	Gasoso	Líquido

### **Hidrogénio Líquido**

O hidrogénio no seu estado líquido possui diferentes características e riscos, em comparação ao seu estado gasoso, o que implica que as formas de manuseamento e controlo sejam também diferentes. O hidrogénio no estado líquido não possui cor e é não corrosivo.

No estado líquido, é armazenado num estado criogénico, ou seja, temperaturas inferiores a -252,78°C, temperaturas estas que podem causar queimaduras criogénicas e danos pulmonares. Para o seu manuseio, ou em caso de fuga ou derrame, é necessário utilizar equipamentos de proteção individual, para que não existam lesões para os intervenientes (Hydrogen Tools, 2021; Hydrogen Tools, 2021a).

Devido à sua temperatura extremamente baixa, os equipamentos (tubagens, depósitos, condutas) a serem utilizados têm que ser projetados e produzidos para suportarem essa pressão e temperatura (Hydrogen Tools, 2021b; Hydrogen Tools, 2021c).

Além disso, a razão de volume do hidrogénio líquido para o gasoso é de 1:848 sem compressão. O hidrogénio muda rapidamente da fase líquida para a fase gasosa, sendo necessário equipamentos de ventilação e alívio de pressão nos sistemas, para garantir a sua segurança (Hydrogen Tools, 2021; Hydrogen Tools, 2021a).

### **2.3. Tipos de Hidrogénio**

O hidrogénio pode ser classificado em diversos grupos tendo em conta a forma como é obtido. Assim, o hidrogénio obtido através de combustíveis fósseis é classificado como hidrogénio cinzento ou azul, e o que possui baixo teor de carbono é classificado como hidrogénio verde. O hidrogénio cinzento é obtido através da produção utilizando combustíveis fósseis, sendo que as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são libertadas diretamente na atmosfera. O hidrogénio azul é também obtido através de combustíveis fósseis, mas as emissões de carbono não são libertadas na atmosfera, estas são capturadas e armazenadas, normalmente no subsolo.

O hidrogénio com baixo teor de carbono é chamado de verde pois é obtido com eletricidade produzida através de fontes renováveis, como a solar ou eólica, por exemplo, sendo que existe também o hidrogénio rosa, branco e turquesa (Petrofac, 2021; SAPO, 2021; Yu *et al.*, 2021).

O hidrogénio azul é economicamente mais vantajoso quando comparado com o hidrogénio verde, e sendo um método viável pode ser implementado na indústria, apesar de ser obtido através de combustíveis fósseis, as emissões de CO<sub>2</sub> são reduzidas. Este tipo de hidrogénio pode ser visto como sustentável, especialmente para países produtores de petróleo ou grandes consumidores, podendo assim utilizar as estruturas já existentes.

No momento, as tecnologias mais desenvolvidas para produção de hidrogénio através de energias renováveis são a eletrólise da água e a reformação a gás do biogás.

A produção de hidrogénio através do eletrólise da água é mais económica que a produção de gás natural sintético produzido utilizando carvão, biomassa, derivados do petróleo ou

resíduos sólidos. Este gás rico em carbono quando gaseificado dá origem ao Syngas (Yu *et al.*, 2021).

O hidrogénio turquesa está associado a uma tecnologia experimental que passa por transformar o CO<sub>2</sub> em sólido. A matéria-prima utilizada neste processo é o gás natural ou o biogás no processo de pirólise de hidrocarbonetos em que o produto é o CO<sub>2</sub> que seria convertido em carbono sólido e não emitido para a atmosfera (EDP, 2018). O hidrogénio branco resulta de uma ocorrência rara, apesar deste elemento ser constituinte da água, plantas e até animais, é complicado encontrá-lo livre no estado gasoso. Esta situação é extremamente rara visto que o elemento é inodoro e incolor, no entanto pode acontecer em depósitos subterrâneos, sendo que são extremamente difíceis de detetar e não existem técnicas eficientes e viáveis do ponto de vista económico para que haja extração. O hidrogénio rosa é assim classificado quando o hidrogénio é obtido através de energia nuclear para o processo de eletrólise e divisão termoquímica. Apesar destes métodos terem baixas emissões de carbono estão sempre associados a riscos relacionados com os desperdícios radioativos, a obtenção de urânio e o risco de acidentes (EDP, 2018).

#### **2.4. Fontes de Hidrogénio**

Como visto anteriormente, o hidrogénio é um dos elementos mais abundantes no Universo, no entanto não é possível encontrá-lo no seu estado livre na Natureza visto que este está sempre ligado a outros elementos. O hidrogénio é parte constituinte de diversas substâncias orgânicas e inorgânicas, tornando estas substâncias em diversas fontes de obtenção do mesmo. Entre estas fontes encontramos substâncias como a água, biomassa, biogás, biodiesel, amónia, algas, hidretos químicos, gás natural e outros hidrocarbonetos como podemos ver na Figura 2.1 (Acar and Dincer, 2014). Todas estas substâncias possuem hidrogénio como um dos seus elementos constituintes, sendo que existem vários métodos capazes de separar este elemento dos demais, tornando-o assim possível de utilizar como combustível.

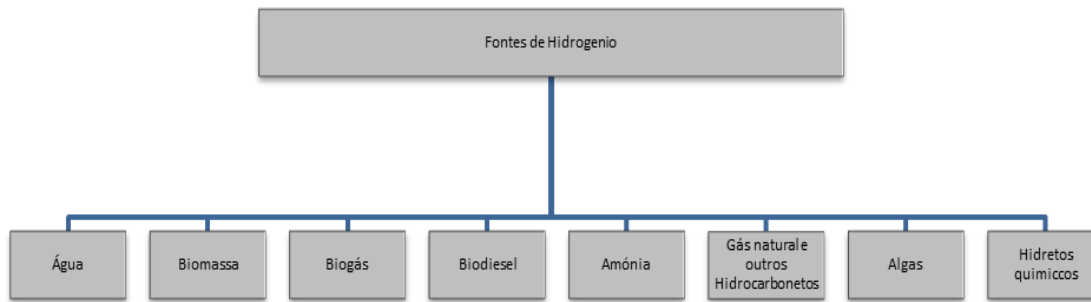


Figura 2.1 Fontes de hidrogénio. Adaptada: (Acar and Dincer, 2014).

Existem diversas formas de obtenção de hidrogénio que utilizam diversas fontes de energia, sendo estas de origem renovável ou não renovável.

O hidrogénio não é uma fonte primária de energia, mas sim um vetor energético quando separado de outros elementos através de uma fonte de energia (Acar and Dincer, 2014).

As formas de energia necessárias para a extração do hidrogénio de recursos naturais podem ser classificadas em quatro categorias:

- Térmica
- Elétrica
- Fotónica
- Bioquímica

Estas formas de energia são obtidas através de fontes de energia verdes, e incluem a energia de fontes renováveis, nuclear e recuperada como gases de aterro, calor industrial ou resíduos que possam ser incinerados (Dincer, 2012).

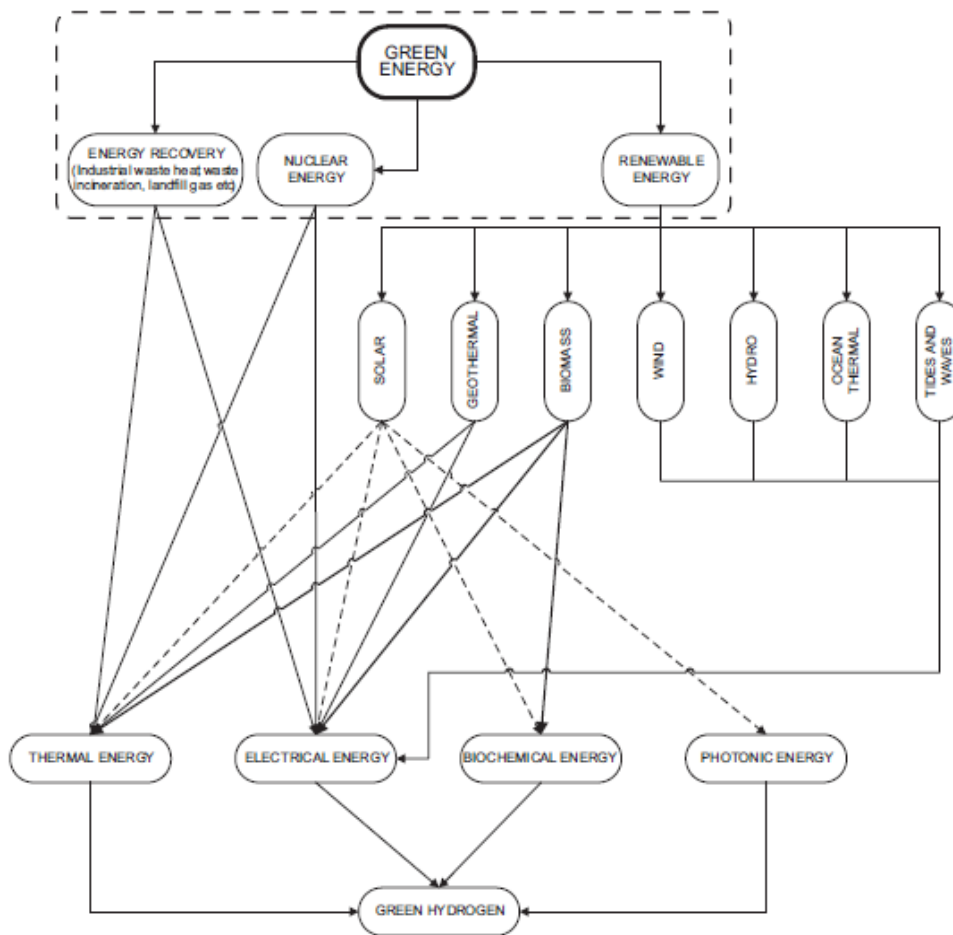


Figura 2.2 Caminhos para produção de energia através de fontes primarias de energia verde.  
 Fonte:(Dincer, 2012)

Na Figura 2.2 podemos ver diversas opções pelas quais os quatro tipos de energia, proveniente de fontes de energia verde, levam à produção de hidrogénio. As energias elétrica e térmica podem ser obtidas através de fontes de energia renováveis, energia nuclear ou de energia recuperada. A energia fotónica é obtida através da radiação solar exclusivamente. A energia bioquímica está armazenada na matéria orgânica e pode ser manipulada através de micro-organismos que conseguem extrair o hidrogénio de vários compostos ou que possam ser quimicamente convertidos em energia térmica (Dincer, 2012).

## **2.5. Produção, armazenamento, distribuição e aplicações de hidrogénio**

Um dos principais desafios assumidos pela comunidade internacional é a transição energética que se baseia numa redução das emissões de gases com efeito de estufa no sistema energético. (Kakoulaki *et al.*, 2021)

O hidrogénio pode ser eficientemente convertido em energia para transporte ou utilização industrial sem emissões de CO<sub>2</sub>, sendo considerado, portanto uma energia limpa e que pode ser vastamente utilizada. É visto como um vetor energético limpo e uma peça chave para o mix energético numa economia livre de carbono (Kumar *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021).

Na indústria energética do hidrogénio podemos diferenciar várias fases:

- produção
- armazenamento
- distribuição
- as aplicações.

A nível internacional têm sido criados compromissos para uma aposta na produção de hidrogénio com baixo teor de carbono, pois este é visto como um agente principal para a transição energética e para um futuro mais sustentável. O processo para a transição energética através desta energia tem, atualmente, um custo elevado. Contudo, é necessário um investimento nas tecnologias de produção de hidrogénio de modo a torná-la mais barata e acessível, e assim permitir que se dissemine no mercado sendo economicamente viável (Yu *et al.*, 2021).

### **2.5.1. Métodos de Produção de Hidrogénio**

Para se obter o hidrogénio na sua forma isolada é necessário utilizar diversos processos de modo a obtê-lo (Acar and Dincer, 2014). O hidrogénio pode ser também obtido através de fontes de energia não renováveis, ou seja, diretamente através de combustíveis fósseis entre os quais gás natural, carvão, etanol, propano e outros hidrocarbonetos utilizando diversos processos. Os métodos mais estabelecidos e desenvolvidos englobam (Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Kumar *et al.*, 2020; Acar and Dincer, 2014):

- Reforma a vapor (SR);
- Oxidação Parcial (POX);
- Reforma Autotérmica (ATR);
- Gaseificação de carvão;
- Pirólise de hidrocarbonetos.

Existem outras formas de obtenção do hidrogénio a partir de biomassa utilizando diferentes processos tais como (Nikolaidis and Poullikkas, 2017):

- Termoquímicos;
- Biológicos.

Os processos que permitem obter hidrogénio a partir da dissociação da água são:

- Eletrólise;
- Termólise;
- Foto eletrólise;
- Energia nuclear.

Estes métodos que utilizam a água como matéria-prima têm tendência a crescer e a ser mais implementados pois enquadram-se na estratégia europeia, em que o hidrogénio verde tem um papel importante para a descarbonização. Estes métodos permitem utilizar outras fontes de energia renováveis como a energia elétrica ou solar para os seus processos. A função destas fontes é produzir energia elétrica para ser utilizada no processo de eletrólise surgindo assim o hidrogénio verde, ou seja, o hidrogénio obtido sem emissões de carbono.

#### **2.5.1.1. Produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis**

- **Reforma a Vapor**

A reforma de hidrocarbonetos é um processo em que o hidrocarboneto é convertido em hidrogénio através de processos de reforma, para além do hidrocarboneto o outro reagente para o processo de reforma é o vapor de água. A reforma a vapor envolve uma conversão catalítica dos hidrocarbonetos e do vapor em hidrogénio e óxidos e de carbono. Esta tecnologia permite produzir hidrogénio em diversas etapas do processo como podemos

verificar na Figura 2.3. A reforma de metano a vapor (SMR) do gás natural é o processo mais implementado, o gás natural na sua constituição é maioritariamente constituído por metano (90% aproximadamente) (Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Kumar *et al.*, 2020).

Primeiramente são retiradas as impurezas do hidrocarboneto que normalmente são compostos orgânicos de enxofre através de dessulfurização, para não envenenar o catalisador à base de níquel. De seguida, existe a mistura com o vapor de água e depois a entrada num reformador onde é gerado o hidrogénio (H<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO). A reforma é dada a temperaturas elevadas (850 a 900°C), a pressões até 3.5MPa e com um rácio de vapor para carbono de 3.5. (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). Após o reformador, a mistura de gás passa pelo processo de recuperação de calor antes de entrar no reator WGS (Water-Gas Shift). Aqui o monóxido de carbono reage com o vapor de água para produzir hidrogénio adicional e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por fim, dessa mistura é retirado o dióxido de carbono através de um removedor de CO<sub>2</sub> ou através de um PSA (Pressure Swing Adsorption), que permite obter Hidrogénio com elevado grau de pureza, a rondar os 100% (Acar and Dincer, 2014; Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

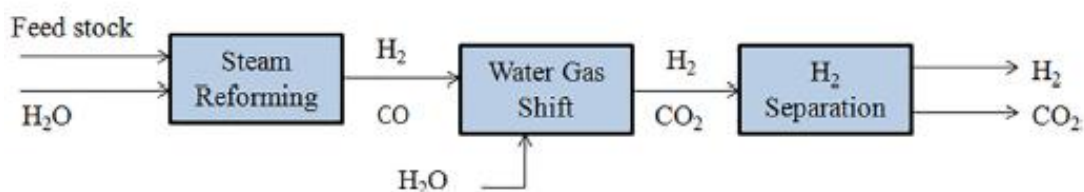
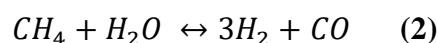
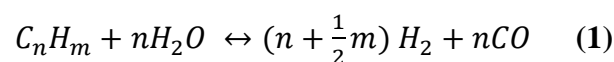


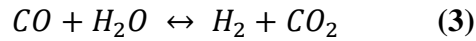
Figura 2.3 Múltiplos estágios do processo de reforma a vapor para produção de hidrogénio. Fonte: (Kumar *et al.*, 2020)

**Equação química no Reformador** (Nikolaidis and Poullikkas, 2017):



$$\Delta H = \frac{206.2KJ}{mol} \text{ at } 298K$$

**Reação WGS** (Kumar *et al.*, 2020):



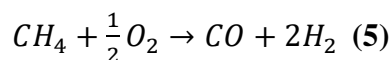
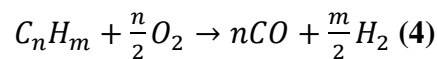
$$\Delta H = \frac{41.1KJ}{mol} \text{ at } 298K$$

A reforma de metano a vapor apresenta eficiência de conversão entre os 74-85% (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). Atualmente, este método é o que possui menores custos e é o mais utilizado para a produção de hidrogénio utilizando combustíveis fósseis (Acar and Dincer, 2014; Pareek *et al.*, 2020).

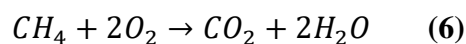
- **Oxidação Parcial (POX)**

A oxidação parcial é outro caminho para a produção de hidrogénio, este método envolve a conversão de vapor, oxigénio e hidrocarbonetos em hidrogénio e óxidos de carbono. Durante oxidação parcial são formados alguns produtos como o syngas ( $H_2+CO$ ), uma mistura de  $CO_2$ ,  $N_2$  e  $H_2O$  (água) e uma pequena porção de  $CH_4$ . A oxidação parcial do metano consiste numa reação e duas etapas. Na primeira etapa da reação o oxigénio é utilizado para a oxidação parcial do hidrocarboneto formando syngas ( $H_2+CO$ ). Na segunda etapa o syngas é tratado da mesma forma do gás resultante do processo de reforma a vapor (Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Kumar *et al.*, 2020).

O oxigénio oxida parcialmente o metano sendo necessário 0,5 mol de  $O_2$  para cada mol de metano produzindo uma mistura gasosa de  $H_2+CO$  (Syngas) na razão de 2:1 de  $H_2/CO$ . Também são produzidos produtos indesejados devido à combustão total do metano como o  $CO_2$  e  $H_2O$  (Pelegrin, 2017). Este processo produz menos quantidade de  $H_2$  a partir da mesma quantidade de matéria-prima (Kumar *et al.*, 2020).



$$\Delta H = -\frac{35 KJ}{mol} \text{ a } 298K$$



$$\Delta H = -\frac{802KJ}{mol}$$

- **Reforma Autotermica (ATR)**

A reforma autotérmica combina o processo de reforma a vapor e oxidação parcial em um reator adiabático (Kumar *et al.*, 2020). Este método providencia uma reação neutra pois, junta a oxidação parcial exotérmica que fornece o calor, com a reforma a vapor endotérmica que permite aumentar a produção de hidrogénio. Vapor e oxigénio ou ar são injetados no reformador provocando que a reformação e as reações de oxidação ocorram simultaneamente como se pode verificar na Figura 2.4.

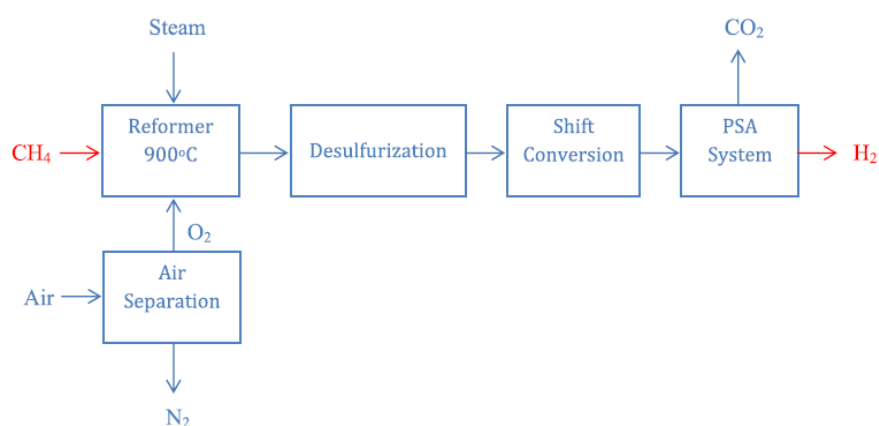
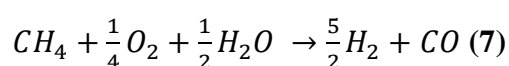
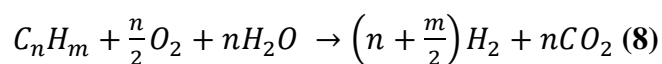


Figura 2.4 Múltiplos estágios do processo de reforma autotérmica para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

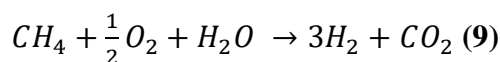
**Reformador** (Nikolaidis and Poullikkas, 2017):



**Equação Geral** (Kumar *et al.*, 2020):



**Equação Geral** (Kumar *et al.*, 2020):



O gás natural é convertido numa mistura de hidrogénio e monóxido de carbono, sendo posteriormente dióxido de carbono e hidrogénio no WGS onde o monóxido de carbono reage com a água. Na Tabela 2.5 podemos ver um comparativo entre as tecnologias de reforma de combustíveis fósseis.

Tabela 2.5 Resumo das tecnologias de reforma de combustíveis fósseis. Adaptada: (Dincer and Acar, 2014).

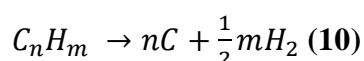
<b>Processo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Reforma a vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Processo mais desenvolvido</li> <li>○ Não utiliza oxigênio</li> <li>○ Temperatura de operação mais baixa</li> <li>○ Melhor Rácio H<sub>2</sub>/CO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Emissões elevadas</li> </ul>
Reforma autotermica	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ A temperatura do processo é inferior à da Oxidação Pacial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Uso de Oxigênio</li> <li>○ Comercialmente menos usada</li> </ul>
Oxidação parcial	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Não necessita de catalisadores</li> <li>○ Necessidade de dessulfurização reduzida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baixo racio H<sub>2</sub>/CO</li> <li>○ Altas temperturas de operação</li> </ul>

- **Gaseificação de carvão**

Existem diversas formas de utilizar o carvão como fonte de combustível sendo que uma delas é a gaseificação. O carvão é oxidado parcialmente com vapor e oxigênio num reator a altas pressões e temperaturas. Os produtos são maioritariamente monóxido de carbono e hidrogênio. Noutra etapa, o monóxido reage com o vapor de água, formando hidrogênio e dióxido de carbono, e assim sofrendo um processo de purificação do hidrogênio de modo a separá-lo do dióxido de carbono. Um dos aspetos negativos da utilização deste processo é a quantidade elevada de carbono no carvão, que leva a emissões de dióxido de carbono mais elevadas em comparação com outras matérias-primas (Acar and Dincer, 2014).

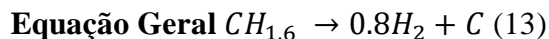
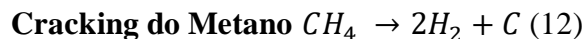
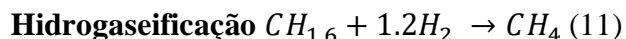
- **Pirólise de Hidrocarbonetos**

Este processo tem como única fonte de hidrogênio o hidrocarboneto em si, em que este é sujeito à decomposição térmica com a seguinte equação geral.



Decomposição termo catalítica de hidrocarbonetos líquidos leves que possuem ponto de ebulição compreendido entre os 50 e 200°C é feita, e tem como resultado a produção de hidrogênio e carbono simples. No caso de o ponto de ebulição for superior a 350°C o

hidrogénio é produzido em duas fases, hidrogaseificação e cracking do metano (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).



### 2.5.1.2. Produção de hidrogénio através Biomassa

A biomassa é uma fonte primária de energia renovável que está presente em plantas, resíduos de colheitas, madeira e resíduos florestais, resíduos municipais entre outros. Devido ao processo de fotossíntese, a energia solar é armazenada através de ligações químicas na biomassa vegetal. Quando a biomassa é utilizada para a produção de energia esta emite  $CO_2$ , mas as emissões são consideradas da mesma dimensão da absorção. Os processos de conversão de biomassa em hidrogénio podem ser separados em dois grupos: os processos biológicos e os processos termoquímicos (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). Os processos biológicos não têm tanto impacto a nível ambiental e não são tao energeticamente exigentes, mas possuem baixas taxas de rentabilidade, ou seja, o número de mol de hidrogénio por número de mol de matéria-prima, de hidrogénio dependendo da matéria-prima utilizada. Os processos termoquímicos são mais rápidos e permitem um maior rendimento estequiométrico na obtenção do hidrogénio (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

- **Processos termoquímicos**

Estes processos permitem transformar a biomassa em hidrogénio e em gases de síntese ricos em hidrogénio, através de pirólise e gaseificação. Estes dois processos permitem produzir  $CH_4$  e  $CO$ , que podem ser utilizados para produzir mais hidrogénio através da reformação a vapor e WGS. Existem outros processos tais como a combustão e a liquefação, mas estes são menos apetecíveis pois permitem uma produção baixa de hidrogénio, emissões de poluentes e a dificuldade de operar, na ausência de ar, a pressões de 5 a 20 MPa (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

## Pirólise

Este processo termoquímico permite obter óleos, carvão e compostos gasosos através do aquecimento da biomassa, a certas condições de temperatura (650-800K) e pressão (0.1-0.5MPa). Este processo ocorre na total ausência de oxigénio, exceto em casos em que existe combustão parcial. O metano e outros hidrocarbonetos podem sofrer reformação a vapor e WGS para produzir mais hidrogénio (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

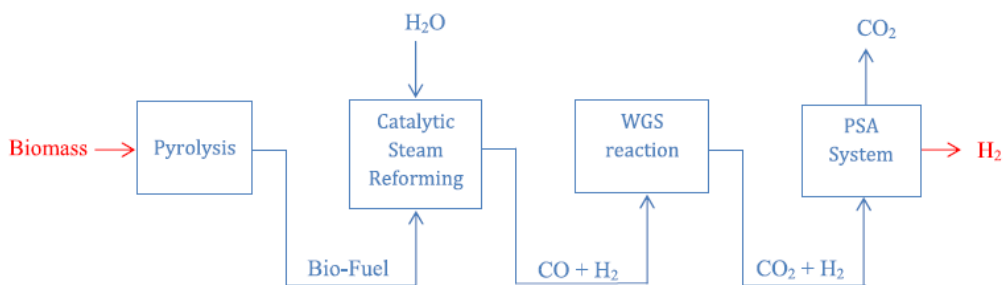
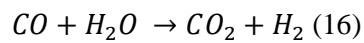
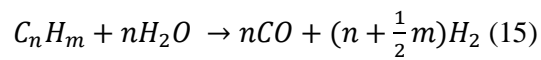
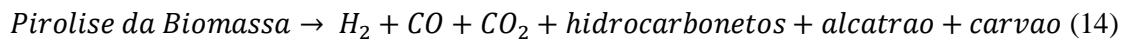
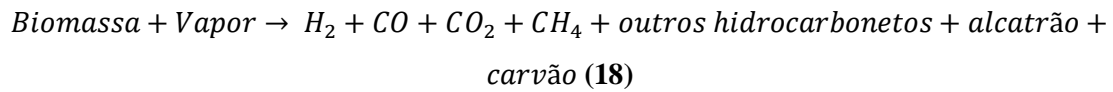
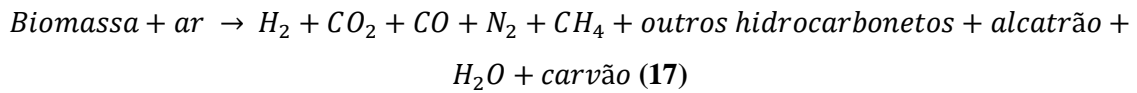


Figura 2.5 Múltiplo estágio do processo pirólise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017)

## Gaseificação

Este processo termoquímico converte a queima de biomassa num combustível gasoso denominado Syngas, num meio com a presença de ar, oxigénio e/ou vapor a altas temperaturas e pressões. Estas temperaturas variam entre os 500 e 1400°C<sub>2</sub> e as pressões entre a pressão atmosférica e 33 bar, estando estes valores dependentes da finalidade da aplicação final do syngas e do tipo de reator utilizado. Estas reações químicas ocorrem dentro de um gaseificador (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).



Após a obtenção do syngas, esta mistura é tratada da mesma forma que no processo de pirólise. A produção de Hidrogénio está dependente do tipo de biomassa utilizada, o tamanho, a temperatura e o rácio de vapor para biomassa. Se for utilizado vapor no processo de gaseificação, a produção de hidrogénio é muito superior ao processo de pirólise (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). O processo de gaseificação da biomassa não é tão simples como o do carvão, e também tem como ponto negativo a produção de hidrocarbonetos indesejáveis como subprodutos da reação (Pareek *et al.*, 2020).

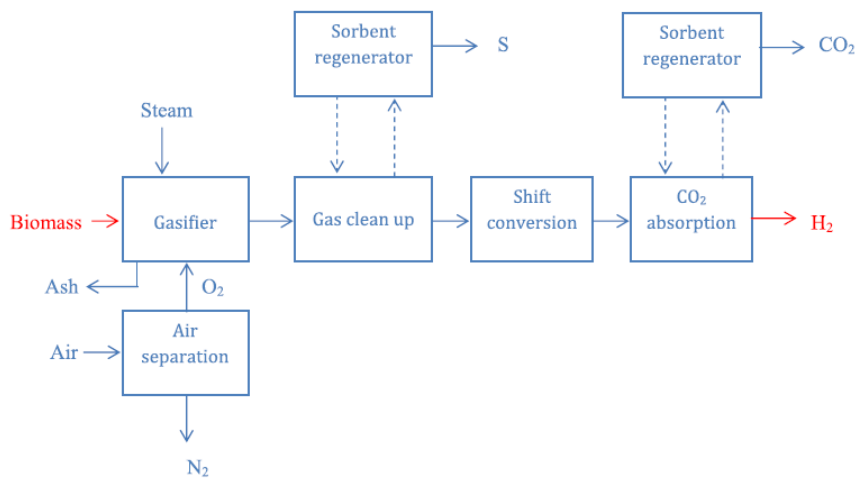


Figura 2.6 Múltiplos estágios do processo gaseificação de biomassa para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

- **Processos Biológicos**

Os processos biológicos de obtenção de hidrogénio surgem como solução para o aproveitamento da produção excessiva de resíduos industriais e agrícolas. Estes processos baseiam-se na produção de hidrogénio a partir de matéria orgânica utilizando

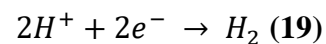
microrganismos como catalisadores na presença ou ausência de luz sob condições de temperatura e pressão próximas das condições ambiente.

Os processos biológicos mais utilizados para a produção de hidrogénio são a fermentação escura, foto-fermentação e bio fotólise. A matéria-prima utilizada na fotólise é a água onde o hidrogénio é produzido por bactérias ou algas através de enzimas Hidrogenase ou Nitrogenase, e para os processos fermentativos é utilizada a biomassa onde as matérias que contêm carboidratos são convertidas em ácidos orgânicos e posteriormente em hidrogénio por tecnologias de bio processamento (Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Pareek *et al*, 2020).

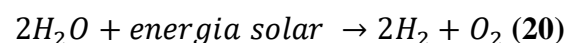
### **Bio-Fotólise**

A Bio-Fotólise é um processo que utiliza o princípio fotossintético presente em algas para a produção de hidrogénio. As algas possuem enzimas que permitem produzir hidrogénio em determinadas condições. Estas algas permitem dissociar as moléculas de água em iões de hidrogénio e oxigénio utilizando bio fotólise direta e indireta (Kumar *et al.*, 2020; Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

Na Bio-Fotólise direta são utilizadas microalgas (algas verdes e cianobactérias) na presença de energia solar para dissociar a água em hidrogénio e oxigénio através do processo fotossintético como podemos verificar na Figura 2.7. Os iões de hidrogénio são convertidos em hidrogénio gasoso devido à ação de enzimas Hidrogenase (Nunes, 2015; Kumar *et al.*, 2020).



A conversão da água em hidrogénio utilizando este processo é dada pela seguinte reação:



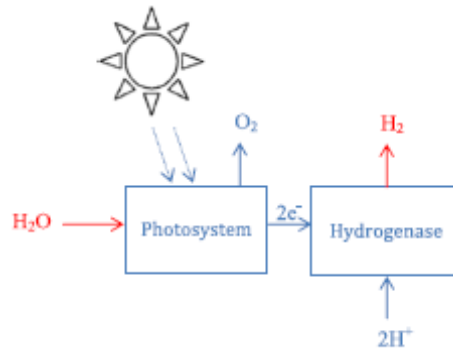
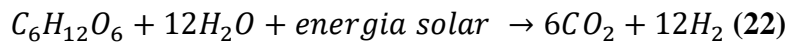
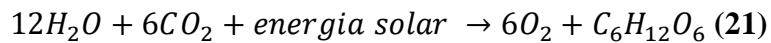


Figura 2.7 Múltiplos estágios do processo bio-fotólise direta para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

Na bio-fotólise indireta o processo é feito em duas etapas: na primeira, ocorre o processo fotossintético que vai produzir glicose com oxigénio; na segunda, o dióxido de carbono e o hidrogénio são produzidos através da glicose juntamente com água (Kumar et al, 2020).



A hidrogenase e a nitrogenase são as enzimas responsáveis pela produção de hidrogénio sendo que o ritmo de produção das enzimas de hidrogenase em algas verdes é superior (Pareek *et al.*, 2020).

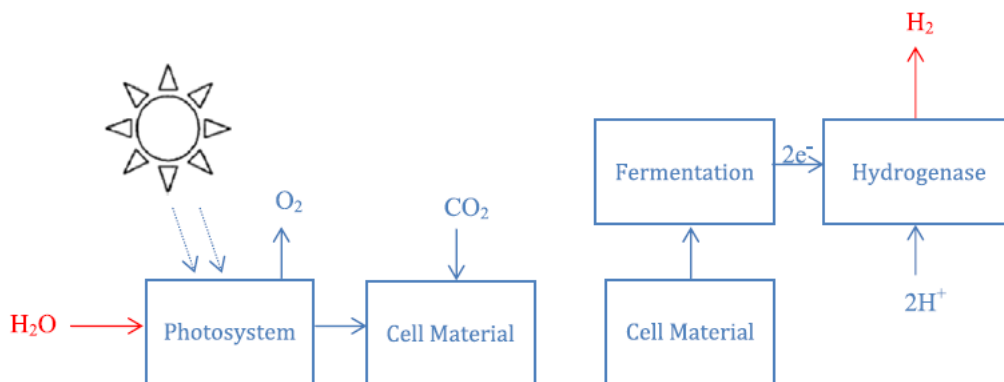


Figura 2.8 Múltiplos estágios do processo bio-fotólise indireta para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

## Foto Fermentação

A foto fermentação ocorre num ambiente com condições deficientes de nitrogénio utilizando ácidos orgânicos e energia solar (Kumar *et al.*, 2020). Devido à presença de enzimas nitrogenase, bactérias fotossintéticas são capazes de converter ácidos orgânicos como acético ou láctico em hidrogénio e dióxido de carbono. A conversão e hidrogénio é dada pela seguinte fórmula utilizando ácido acético como reagente (Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Pareek *et al.*, 2020):

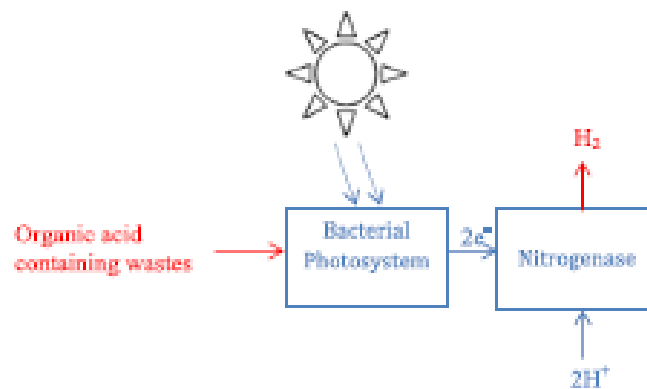
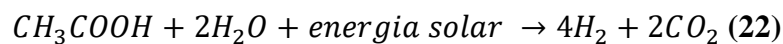


Figura 2.9 Múltiplos estágios do processo Foto Fermentação para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

## Fermentação Escura

Este processo de fermentação é realizado por bactérias anaeróbias em substratos ricos em carboidratos e algas verdes num ambiente sem presença de energia solar (Kumar *et al.*, 2020). As fontes de carbono para o processo de fermentação preferencial é a glicose que dão origem a ácido acético e butírico (Pareek *et al.*, 2020). Este processo pode ocorrer com presença ou ausência de oxigénio com a formação de dióxido de carbono, hidrogénio acetona e outros álcoois (Kumar *et al.*, 2020). De acordo com as reações, 1 mol de glicose produz 4 mol de hidrogénio, quando o ácido acético é produto final da fermentação. Por outro lado, 2 mol de hidrogénio são obtidas a partir de 1 mol de glicose, quando o ácido butanoico é o produto final (Pareek *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2020).

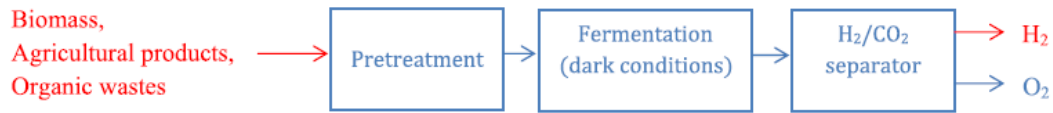
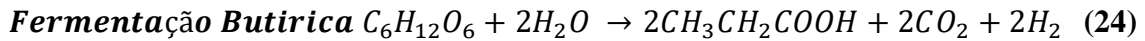
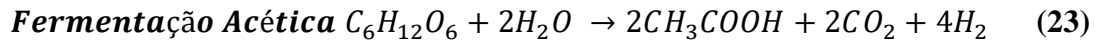


Figura 2.10 Múltiplos estágios do processo Fermentação Escura para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

À medida que as concentrações de hidrogénio aumentam, este tem que ser removido, pois caso contrário levaria a um aumento de pressão e uma consequente diminuição da sua síntese (Pareek *et al.*, 2020; Nikolaidis and Poullikkas, 2017). Este método é relativamente simples e não necessita de energia solar, podendo haver a produção constante durante a totalidade do dia (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

Tabela 2.6 Comparação dos processos de Bio-Fotólise, foto fermentação e fermentação escura. Adaptado: (Dincer and Acar, 2014)

Processos	Vantagens	Desvantagens
<b>Bio fotólise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Abundância de oferta (Água)</li> <li>○ Produz Hidrogénio e Oxigénio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Eficiências de conversão baixas</li> <li>○ Necessária grande área de superfície</li> </ul>
<b>Foto fermentação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Conversão de substrato quase completa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baixa taxa de produção volumétrica</li> <li>○ Eficiências de conversão baixas</li> <li>○ Necessária grande área de superfície</li> </ul>
<b>Fermentação escura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Uso de uma variedade de resíduos</li> <li>○ Taxas de produção elevadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Grande quantidade de subprodutos</li> </ul>

### 2.5.1.3. Dissociação da água

A água é um dos elementos mais abundantes na Terra e pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de hidrogénio através de processos de dissociação da água tais como a eletrólise, termólise e foto eletrólise. Estes processos requerem a adição de energia, e se esta energia resultar de energias renováveis, então a produção de hidrogénio será livre de emissões de carbono (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

- **Eletrólise**

A eletrólise é o processo mais efetivo de dissociação da água que consiste em separar a molécula de água em hidrogénio e oxigénio pela aplicação de uma corrente elétrica. Como a dissociação da água é uma reação endotérmica, o input de energia é feito pela corrente elétrica e se esta energia resultar de fontes renováveis iremos obter um processo sem emissões de carbono e, conseqüentemente o Hidrogénio Verde no final do mesmo (Pareek *et al.*, 2020; Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

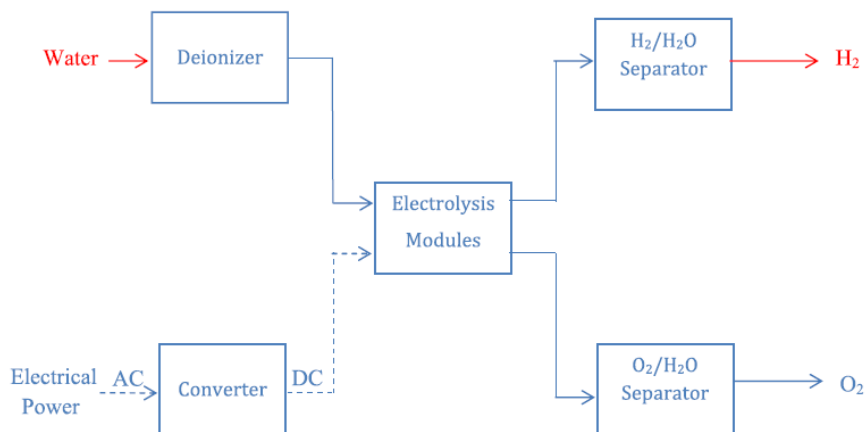


Figura 2.11 Estágios do eletrólise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

O processo de eletrólise é feito num eletrolisador que consiste em dois elétrodos, cátodo e ânodo separados por uma membrana imersos numa solução aquosa que contém um eletrólito e quando uma corrente elétrica é aplicada existe dissociação da molécula de água, sendo formado hidrogénio no cátodo e oxigénio no ânodo como podemos observar na Figura 2.12 (Pareek *et al.*, 2020; IBERDROLA, 2021). O oxigénio gerado pode ser libertado na atmosfera ou utilizado como gás medicinal em hospitais ou indústrias. Por

outro lado, o hidrogénio é armazenado como gás comprimido ou liquefeito para utilização industrial ou em pilhas de combustível (IBERDROLA, 2021).

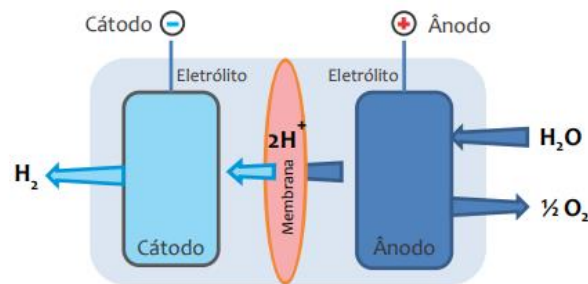


Figura 2.12 Esquema simplificado de um eletrolisador. Fonte: (DGEG, 2018).

Existem vários tipos de eletrolisadores tais como o (Nikolaidis and Poullikkas, 2017):

- Eletrolisador alcalino (AEC);
- Eletrolisador com membrana de troca de protões (PEM);
- Eletrolisador de óxido sólido (SOEC).

O eletrolisador alcalino utiliza uma solução eletrolítica de água e hidróxido de sódio ou potássio. Quando a corrente é aplicada, os iões hidróxidos movem-se através do eletrólito do cátodo para o ânodo gerando hidrogénio no lado do cátodo e oxigénio no ânodo. Os eletrolisadores PEM utilizam uma membrana de troca de protões de um eletrólito polimérico sólido, quando a corrente elétrica é aplicada, a água divide-se em hidrogénio e oxigénio sendo que os protões de hidrogénio passam através da membrana para o cátodo formando hidrogénio gasoso. Estes eletrolisadores são fáceis de refrigerar e produzem hidrogénio com altos níveis de pureza, sendo os mais adaptados para ajustarem a variabilidade das energias renováveis. O eletrolisador de óxido sólido funciona a temperaturas mais elevadas na ordem dos 500 a 850°C e potencialmente são mais eficientes que as restantes. Esta utiliza um processo de eletrólise do vapor de água e utiliza um material sólido cerâmico como eletrólito. Os eletrões do circuito externos combinam com a água no cátodo de modo a formar hidrogénio gasoso e iões de carga negativa, já o oxigénio passa através da membrana cerâmica e reage no ânodo para formar gás oxigénio e gerar eletrões para o circuito externo. Na Figura 2.13 podemos ver um comparativo entre os três tipos de eletrolisadores (IBERDROLA, 2021).

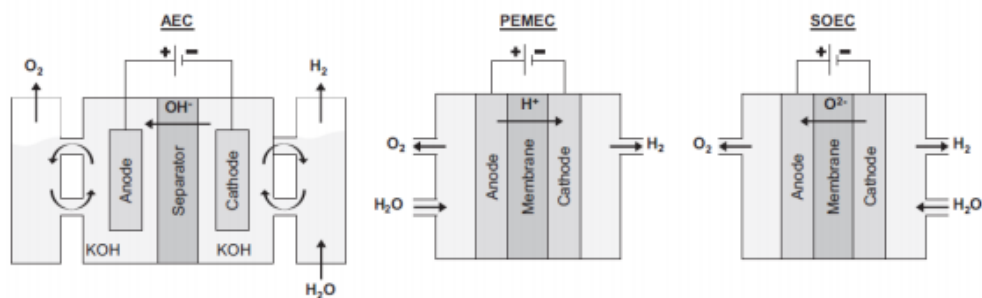


Figura 2.13 Comparação entre os eletrolisadores do tipo AEC, PEM, SOEC. Fonte: (Armemann, 2019).

- **Termólise**

É um processo termoquímico de dissociação da água em que esta é aquecida a altas temperaturas (superiores a 2500°C), até que se decompõe em oxigénio e hidrogénio. Como é necessária uma quantidade elevada de calor para o processo, utilizam-se vários ciclos termoquímicos de modo a diminuir a temperatura de operação e aumentar a eficiência. Estes ciclos consistem em reações químicas a diferentes temperaturas onde o calor é convertido em energia química na forma de hidrogénio.

A necessidade de atingir temperaturas elevadas pode ser atingida pela utilização de energia nuclear ou obtida através de coletores solares (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

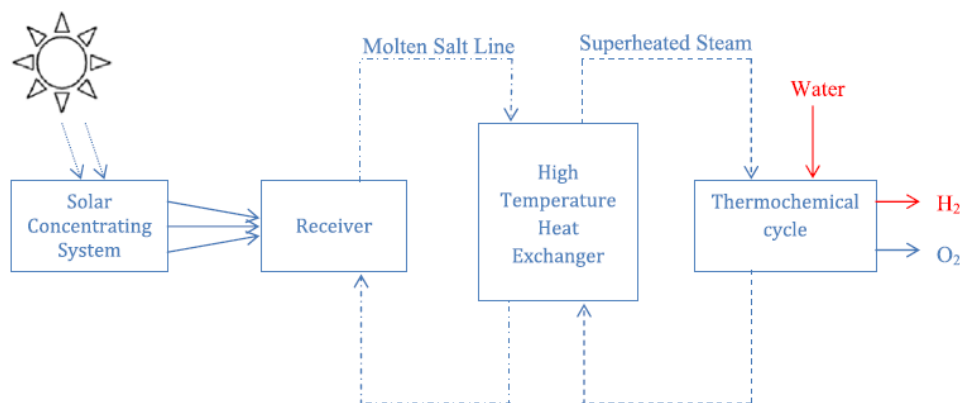


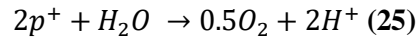
Figura 2.14 Estágios do processo de termólise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

- **Foto eletrólise**

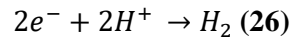
A fotólise ocorre quando a energia solar é absorvida com a ajuda de alguns fotocatalisadores e então utilizada para decompor a água em hidrogénio e oxigénio.

Na foto eletrólise a energia solar é absorvida por materiais semicondutores e o processo de dissociação da água é similar ao da eletrólise (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

**Anodo**



**Cátodo**



**Geral**

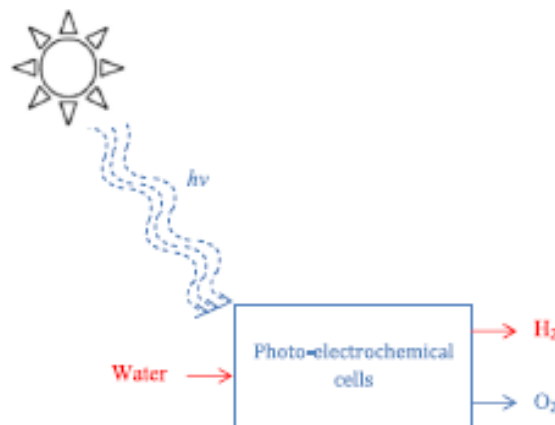
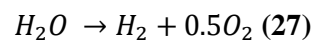


Figura 2.15 Estágios do processo de foto eletrólise para produção de hidrogénio. Fonte: (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

- **Produção de hidrogénio através Energia Nuclear**

A produção de hidrogénio utilizando energia nuclear baseia-se na possibilidade de utilizar o calor produzido para a produção de energia elétrica e a própria energia elétrica nestes processos. Os processos utilizados são a dissociação termoquímica da água e a eletrólise a altas temperaturas. Nos ciclos de dissociação termoquímica da água as temperaturas de operação são de 500°C ou superiores utilizando reatores nucleares, obtém-se altas eficiências e taxas de reação a temperaturas altas. Uma serie de reações químicas são feitas a altas temperaturas de modo a dissociar a água em hidrogénio e oxigénio ((Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Pareek *et al.*, 2020). Na eletrólise a altas temperaturas,

apesar da eficiência da conversão de eletricidade para hidrogénio poder atingir os 80% sob pressão, a eficiência geral deste método é muito mais baixa, pois está limitado à eficiência da estação nuclear que é cerca de 33%. Esta eficiência pode aumentar com o desenvolvimento dos reatores, pois se suportarem maiores temperaturas de operação a eficiência aumentará ((Nikolaidis and Poullikkas, 2017). Apesar da utilização destes métodos não gerar emissões de carbono, surgem outras preocupações ambientais já antigas associadas à extração e tratamento do urânio, a gestão dos resíduos radioativos e ao risco de acidentes nucleares. No plano europeu para a neutralidade carbónica, não existe nenhuma referência à produção de hidrogénio através de energia nuclear apesar de esta ser de baixo carbono. Existe apenas referência ao hidrogénio verde que é gerado através da utilização de energias renováveis, e a obtenção de hidrogénio através de energia nuclear em que classifica o hidrogénio como rosa (ENGIE, 2021; EDP, 2018).

### **2.5.2. Armazenamento de Hidrogénio**

A utilização do hidrogénio irá ganhar uma nova relevância nos próximos tempos na UE (Apak *et al.*, 2012) sendo utilizado como combustível e vetor energético de modo a cumprir as metas tanto na proteção ambiental como no crescimento económico (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

Para a utilização em grande escala do hidrogénio são necessários sistemas de armazenamento que podem ser estacionários ou móveis. O hidrogénio pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna, mas a nível do setor automóvel é previsto que a utilização das células de combustível aumente e substitua os motores a combustão visto que, convertem diretamente a energia química do hidrogénio em energia elétrica sendo que, o único produto de exaustão é o vapor de água. O volume e o peso nos sistemas de armazenamento estacionários não têm tanta relevância como nos sistemas móveis podendo estes ocupar mais espaço e funcionar a temperaturas e pressões superiores (Abe *et al.*, 2019)

O hidrogénio tem uma alta densidade energética por massa e baixa densidade energética por volume (Kumar *et al.*, 2020), fazendo com que, em sistemas de armazenamento móveis sejam importantes as capacidades gravimétricas e volumétricas do sistema. (Abe *et al.*, 2019) Para o armazenamento adequado de hidrogénio, estes dois parâmetros têm valores elevados. Ao nível dos sistemas de armazenamento móveis é necessário encontrar

um ponto de equilíbrio entre o peso e o volume, pois um peso elevado reduziria o alcance e a performance do veículo e, por outro lado um volume elevado reduziria o espaço livre para bagagem e para os passageiros (Abe *et al.*, 2019).

Deste modo, existem vários sistemas de armazenamento de hidrogénio, tais como:

- no estado gasoso;
- no estado líquido;
- no estado sólido.

#### **2.5.2.1.Sistemas de armazenamento no estado gasoso**

O sistema de armazenamento mais instituído é o que armazena o hidrogénio como gás pressurizado (Nikolaidis and Poullikkas, 2017), o hidrogénio tem uma densidade muito baixa de  $0,089\text{Kg/m}^3$ , o que requer pressões muito altas para o seu armazenamento (Abe *et al.*, 2019).

Para comprimir o hidrogénio de modo a armazená-lo é necessário utilizar pressões até 77 MPa, utilizando para isso compressores mecânicos (tipo pistão) (Kumar *et al.*, 2020), as células de combustível necessitam que o hidrogénio seja pressurizado a pressões entre os 35 e 70 MPa. Estima-se que a pressurização do hidrogénio leva a uma perda de 11 a 13% do seu conteúdo energético (Abe *et al.*, 2019). Os recipientes de armazenamento de hidrogénio tradicionalmente são produzidos utilizando aço e alumínio sendo que existem recipientes reforçados com fibra de carbono. Os recipientes em fibra de carbono são mais resistentes a impactos e mais leves, no entanto são mais caros em comparação com os de aço e alumínio (Abe *et al.*, 2019).

Atualmente, existem tecnologias em desenvolvimento que permitem o armazenamento de grandes quantidades de hidrogénio em cavidades subterrâneas com pressões até 200bar (20MPa), podendo chegar em casos específicos até aos  $500.000\text{m}^3$  ou 167GWh de maneira a produzir eletricidade quando existem picos de procura. (DGEG, 2018).

Na Figura 2.16 podemos ver as formações cavernosas salinas existentes na Europa, sendo que existem várias já utilizadas para armazenamento de gás em vários países, como a França, Alemanha e Reino Unido. Existe ainda várias formações cavernosas mas sem qualquer utilização de momento, podendo ser utilizadas no futuro para sistema de armazenamento de hidrogénio.



Figura 2.16 Formações cavernosas salinas. Fonte:(Chatzimarkakis,2020)

Na Figura 2.17 observa-se o potencial de armazenamento de hidrogénio em cavernas salinas em TWh, em diversos países europeus sendo que, os que possuem mais potencial dentro da Europa são a Alemanha, Países Baixos e Reino Unido.

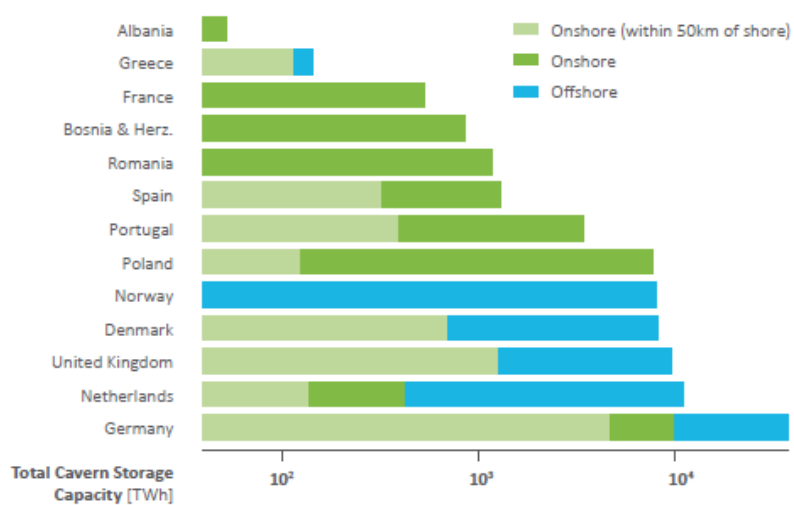


Figura 2.17 Potencial de armazenamento de hidrogénio em cavernas Salinas. Fonte: (Chatzimarkakis, 2020).

### **2.5.2.2.Sistemas de armazenamento no estado líquido**

Uma outra forma de armazenar o hidrogénio é na forma de líquido criogénico, sendo que o armazenamento como líquido significa uma maior densidade. Abe *et al.*, 2019. O hidrogénio líquido pode ser armazenado em reservatórios criogénicos no estado líquido (-252,9°C), à pressão atmosférica ou segundo um processo de duas etapas, compressão e liquefação (arrefecimento) utilizando um permutador de calor (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). O hidrogénio armazenado neste estado tem uma densidade de aproximadamente 71g/L no seu ponto de ebulição de 20K. Esta densidade é cerca de 1,8 vezes a densidade do hidrogénio pressurizado a 70 MPa e 288 K (14,85°C). Devido ao seu ponto de ebulição baixo, o processo de liquefação requer temperaturas muito baixas que consomem cerca de 30% do seu conteúdo energético total. Para reduzir a perda de calor, os recipientes de armazenamento possuem bons sistemas de isolamento e parede dupla (Abe *et al.*, 2019). Os recipientes de armazenamento criogénicos são mais leves e compactos que os de hidrogénio gasoso comprimido, sendo assim mais seguros (Abe *et al.*, 2019).

### **2.5.2.3.Sistemas de armazenamento no estado sólido**

Os sistemas de armazenamento necessitam de ser seguros, eficientes, económicos, leves e compactos. Os sistemas convencionais de hidrogénio pressurizado e criogénico requerem a ocupação de muito espaço, sendo muito robustas (Abe *et al.*, 2019). No sector dos transportes, com a utilização das células de combustível o armazenamento a bordo é um obstáculo que precisa de ser ultrapassado visto que, este tem que possuir grande capacidade gravimétrica e volumétrica (Abe *et al.*, 2019). Nos sistemas de armazenamento de hidrogénio no estado sólido, o hidrogénio é agregado com compostos sólidos de modo a armazenar uma grande quantidade e ocupar menor espaço. O hidrogénio pode ser agregado com outros sólidos através de adsorção ou absorção. Na adsorção, a molécula de hidrogénio adere à superfície de um material sólido, através das forças de van der Waals (força intermolecular), tais como nanotubos de carbono (Abe *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2020). No processo de adsorção, as moléculas de hidrogénio no estado gasoso interagem com os átomos da superfície do sólido, criando ligações entre eles sendo que, o hidrogénio pode ser reversivamente libertado sempre que necessária a sua utilização através de estimulação térmica (Nikolaidis and Poullikkas, 2017; Abe *et al.*,

2019). Os nanotubos em carbono permitem armazenar o hidrogénio a baixas temperaturas (-196,15°C) e pressões (6MPa) (Nikolaidis and Poullikkas, 2017). Na absorção, ocorre dissociação das moléculas de hidrogénio em átomos que reagem quimicamente com os materiais sólidos, incorporando na sua estrutura molecular, formando assim Hidretos como podemos ver na Figura 2.18. (Abe *et al.*, 2019). O hidrogénio pode reagir, à temperatura ambiente e à pressão atmosférica, com metais ou ligas metálicas de modo a formar Hidretos, podendo ainda reagir à pressão atmosférica, mas a temperaturas elevadas de modo a formar hidretos complexos (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).



Figura 2.18 Modelo simplificado de um hidreto metálico. Fonte: (Abe et al, 2019).

A utilização de hidretos metálicos no armazenamento de hidrogénio permite armazenar uma grande quantidade de hidrogénio nas suas estruturas, sendo uma das vantagens relativamente aos armazenamentos gasoso e criogénico. Abe *et al.*, 2019.

Na Tabela 2.7 apresentam-se diversas características dos vários métodos de armazenamento.

Tabela 2.7 Comparação dos métodos de armazenamento de hidrogénio. Adaptado: Nikolaidis and Poullikkas, 2017.

Método de armazenamento	Densidade Gravimétrica (wt%)	Densidade Volumétrica (Kg/m <sup>3</sup> )	T (°C)	P (MPa)
Gasoso a alta pressão	13	40	ambiente	77
Líquido criogénico	-	70,8	-252,87	atmosférica
Adsorção em nanotubos de carbono	10,8	41	-196,15	6
Absorvido formando Hidretos	3	150	ambiente	atmosférica
Absorvido formando Hidretos complexos	18	150	>100	atmosférica

### 2.5.3. Distribuição do hidrogénio

Para oferecer suporte a uma ampla gama de aplicações, a infraestrutura de distribuição de hidrogénio pode incorporar vários caminhos de tecnologia capazes de transportar hidrogénio nas suas formas de armazenamento como podemos ver na Figura 2.19 (USDOE, 2020). O transporte e distribuição do hidrogénio está dependente de vários fatores tais como, o volume de transporte, as distâncias de entrega e as circunstâncias dos locais (Ball and Weeda, 2015).

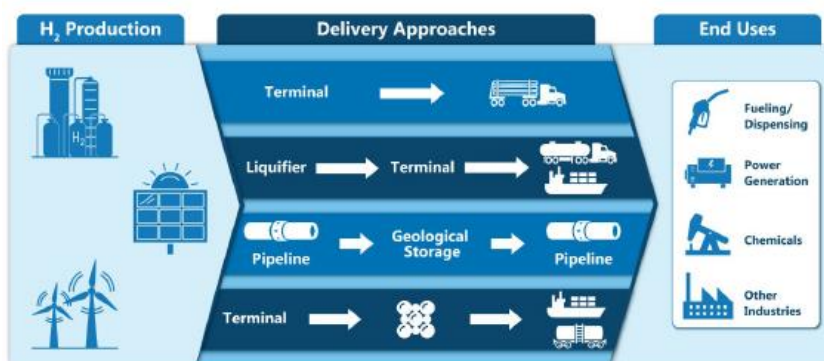


Figura 2.19 Métodos de transporte de hidrogénio. Fonte: (USDOE, 2020).

Os métodos de transporte utilizados são bastante convencionais, sendo que no caso do hidrogénio gasoso pode ser efetuado através de condutas, como as utilizadas no gás natural, e camiões que transportam estruturas individuais de armazenamento. Este método de transporte é utilizado para quantidades pequenas de hidrogénio pressurizado (até 200bar) e distâncias curtas até 200km (Ball and Weeda, 2015).

O transporte de hidrogénio no estado líquido pode ser feito através de camiões-cisterna e em tanques criogénicos. Estes são economicamente mais vantajosos para menores volumes e distâncias mais longas até os 900km (USDOE, 2020a; Ball and Weeda, 2015). No caso do armazenamento sólido do hidrogénio, o seu transporte é feito igualmente através de camiões. Em comparação, seria mais económico, no transporte de grandes quantidades de hidrogénio, utilizar a ferrovia e barcas ou navios (viagens marítimas), do que o meio rodoviário tal como acontece com os produtos (USDOE, 2020a; Ball and Weeda, 2015). Conjuguar estas formas de transporte em grande escala no mercado permitiria uma entrada a grande escala no mercado energético. Numa fase mais precoce, o transporte no estado gasoso comprimido seria mais eficiente, pois não existe o processo de liquefação, que é um processo muito energético e que reduz em cerca de 30% o seu conteúdo energético (Abe *et al.*, 2019; Ball and Weeda, 2015)

A utilização de condutas para o transporte de hidrogénio gasoso implica um investimento numa rede de infraestruturas visto que, as atuais condutas de gás natural são feitas de aço inoxidável, e o transporte de hidrogénio teria impacto coma formação de bolhas, fraturas e com o fenómeno de fragilização (Embrittlement) nas condutas. Contudo, é possível utilizar as condutas já existentes de gás natural, pois é possível misturar o gás natural com o hidrogénio, sendo este posteriormente separado e purificado. As condutas de gás natural, sem sofrerem alterações, permitem uma mistura de cerca de 15 a 30% de hidrogénio (USDOE, 2020a; Reddy et al, 2020).

As condutas são uma opção em grandes quantidades e distâncias, sendo já utilizadas em rede para fornecer refinarias e estações químicas, em território europeu (Ball and Weeda, 2015). Concentrações mais elevadas de hidrogénio vão exigir uma transição nas condutas para alta pressão, o que levará a um aumento de custos associados à implantação destas condutas. O hidrogénio liquefeito é transportado em camiões, mas os custos e perdas do processo de liquefação são elevados, tornando este meio de transporte não tao adequado para longas distâncias. Com base nos custos, o transporte por condutas na sua forma

gasosa é o mais adequado, para transportes em grande escala enquanto o hidrogénio líquido é mais adequado para uma escala mais reduzida (Reddy *et al*, 2020).

#### 2.5.4. Aplicações do Hidrogénio

O hidrogénio é um dos elementos mais abundantes na natureza, mas não se encontra livre, encontrando-se sempre associado a outros elementos (Reddy *et al*, 2020). Através da utilização de vários processos é possível produzir hidrogénio, utilizando fontes de energia renováveis ou combustíveis fósseis. O hidrogénio é um combustível muito energético, com uma energia específica de 120MJ/Kg, que é quase o dobro da energia dos combustíveis convencionais, sem emissões de gases com efeito de estufa e não é tóxico. Este sofre oxidação ou combustão na presença de ar ou oxigénio, formando apenas vapor de água (Reddy *et al*, 2020).

Atualmente, o hidrogénio é mais utilizado na indústria de produção de amoníaco, na refinação de matérias petrolíferas e na produção de metanol, através de processos baseados em combustíveis fósseis (DGEG, 2018). A utilização de fontes de energia renovável para a obtenção de hidrogénio é um fator fundamental para a descarbonização.

O hidrogénio pode ser utilizado como combustível em diversos dispositivos, de modo a obter energia elétrica, mecânica ou térmica como apresenta a Figura 2.20 (Yilanci *et al*, 2008).

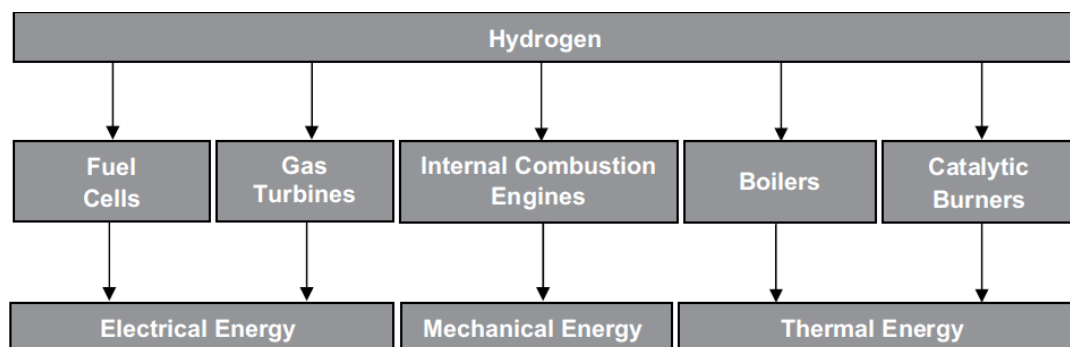


Figura 2.20 Aplicações do hidrogénio. Adaptada: (Yilanci *et al*, 2008).

A utilização do hidrogénio como combustível permite a geração de energia elétrica através de células de combustível e turbinas, energia mecânica utilizando motores de combustão interna e energia térmica utilizando caldeiras (Yilanci *et al*, 2008; Apak *et al*, 2012). O elevado conteúdo energético do hidrogénio torna-o num combustível preferencial para o setor automóvel e em sistemas estacionários de produção de energia e calor (Reddy *et al*, 2020).

Na indústria automóvel, o hidrogénio pode ser diretamente utilizado como combustível em motores de combustão interna ou em células de combustível (Reddy *et al*, 2020).

#### **2.5.4.1. Células de combustível**

As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química do hidrogénio em energia elétrica, sem a ocorrência de combustão, mas sim de reações eletroquímicas (Reddy *et al*, 2020; USDOE, 2020). O processo é o inverso do eletrólise visto que, requiere o fornecimento contínuo de combustível (hidrogénio), para manter uma reação eletroquímica e produzir fluxo de elétrons num circuito externo, a corrente elétrica sendo os subprodutos resultantes a água e algum calor (Almeida and Moura, 2006; DGEG, 2018)

A célula de combustível é constituída pelo ânodo, cátodo e um eletrólito sendo que, nos dois primeiros são utilizados catalisadores para promover as reações de oxidação e redução do hidrogénio e do oxigénio como se pode ver na Figura 2.21. O hidrogénio é fornecido ao ânodo e o oxigénio ao cátodo. O hidrogénio é oxidado na superfície do ânodo, local onde o catalisador promove a separação de elétrons do átomo de hidrogénio formando íões positivos. O eletrólito promove o deslocamento de íões do ânodo para o cátodo, mas bloqueia a passagem dos elétrons que são forçados a seguirem o circuito exterior à célula, gerando a corrente elétrica. Os íões de hidrogénio ao chegarem ao cátodo combinam-se com os elétrons que retornam do circuito externo e com os átomos de oxigénio fornecidos ao cátodo criando água (Almeida and Moura, 2006; DGEG, 2018).

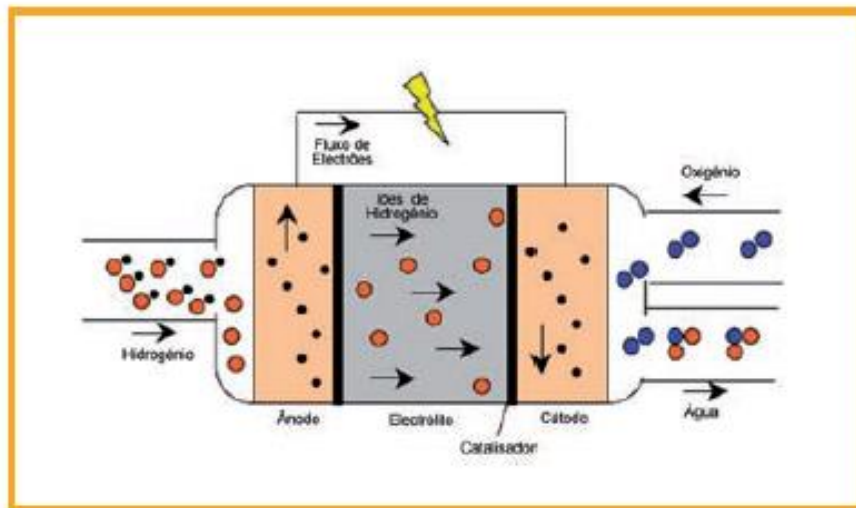


Figura 2.21 Diagrama de uma célula de combustível. Fonte: (Almeida and Moura, 2006).

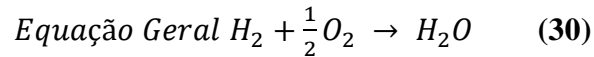
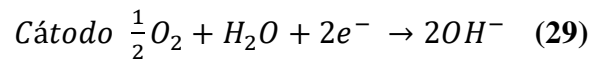
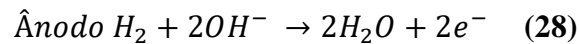
A energia produzida por uma célula de combustível depende de diversos fatores, tais como o tipo de célula, o seu tamanho, a temperatura de operação e a pressão a que o gás é fornecido. As células de combustível são montadas em série de modo a aumentar a tensão elétrica (USDOE, 2010). Atualmente, existem diversos tipos de células de combustíveis e normalmente são caracterizadas de acordo com o seu eletrólito, sendo que diferenciam em potência, eficiência, temperatura de operação e aplicação final.

- **Tipos de células de combustível**

- **Célula de combustível alcalina (Alkaline Fuel cell)**

Estas células de combustível utilizam um eletrólito com uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) e têm eficiências a rondar os 60%. Estas células foram utilizadas em missões espaciais para produzir eletricidade e água. Neste tipo de células, a reação de oxidação no cátodo é mais rápida utilizando eletrólitos alcalinos em vez dos ácidos, o que leva a uma maior performance. Uma desvantagem desta célula deve-se ao fato de ser sensível à presença de dióxido de carbono no combustível e no ar visto que, o eletrólito dissolve o dióxido de carbono (Portal Energia, 2019; USDOE, 2010).

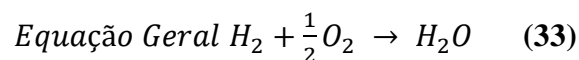
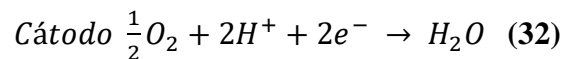
**Reações na célula de combustível alcalina** (University of Cambridge, 2021):



### - Células de combustível de Ácido Fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell)

Estas células utilizam um eletrólito de ácido fosfórico e têm uma temperatura de operação compreendida entre os 150-200°C, a operação a temperaturas elevadas torna-a mais adequada a sistemas em que o calor seja necessário. A estabilidade do ácido fosfórico em comparação com outros ácidos é superior, o que permite produzir energia elétrica a temperaturas elevadas. O catalisador utilizado no ânodo e no cátodo geralmente é a platina, o que pode contribuir para um aumento do custo final da célula (Portal Energia, 2019; USDOE, 2010).

**Reações na célula de combustível de ácido fosfórico** (University of Cambridge, 2021):



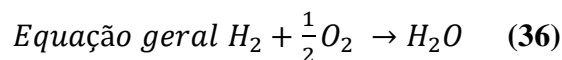
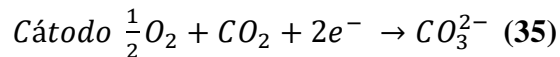
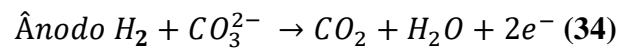
### - Células de combustível de Carbonatos fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell)

Este tipo de células utilizam um eletrólito que consiste numa solução que combina carbonatos alcalinos entre eles o lítio, sódio e/ou potássio. São utilizadas em sistemas de cogeração pois possuem uma temperatura de operação muito alta, entre os 600 e 700°C.

Neste tipo de células, devido à temperatura de funcionamento elevada, não é necessário utilizar metais nobres (platina, ouro, prata) como catalisador, podendo utilizar produtos menos dispendiosos como, o níquel no ânodo e óxido de níquel no cátodo. Estas células

têm eficiências elevadas, uma flexibilidade de combustíveis e podem utilizar vários catalisadores. Devido ao eletrólito ser uma mistura quente e corrosiva de lítio, potássio e sódio, os componentes sofrem corrosão (Portal Energia, 2019; USDOE, 2010).

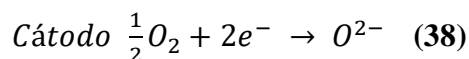
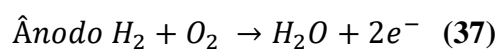
**Reações na célula de combustível de carbonatos fundidos** (University of Cambridge, 2021):



#### - Células de combustível de óxidos sólidos (Solid oxide fuel cell)

São células de funcionamento a altas temperaturas, entre 700-1000°C, utilizadas em sistemas de cogeração e ciclo combinado para produção de eletricidade nas indústrias. Nestes sistemas não é necessária a utilização de catalisadores nobres pois as velocidades das reações são altas. O eletrólito é sólido, um metal óxido, sólido e não poroso, normalmente óxido de ítrio estabilizado com dióxido de zircônio. Os materiais cerâmicos que estão presentes nesta célula envolvem custos elevados sendo necessários equipamentos extras para produzir energia elétrica (Portal Energia, 2019; USDOE, 2010).

#### **Reações na célula de combustível de carbonatos fundidos**

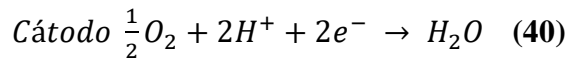


#### - Células de Combustível de membrana protônica (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Esta célula de combustível possui um eletrólito que é uma membrana de permuta iônica, formada por um polímero sólido que permite a passagem de prótons do ânodo para o cátodo da célula. A temperatura de operação deste tipo de células é relativamente baixa,

entre os 50 e 100°C, utilizando hidrogénio e oxigénio/ar como combustível. O único líquido presente na célula é a água, o que diminui drasticamente os problemas de corrosão dos elementos da célula, e permite que a membrana de permuta protónica se mantenha hidratada durante o funcionamento. As velocidades de reação são baixas sendo necessário o uso de catalisadores de platina. Esta célula tem características que as torna extremamente válidas para aplicação no sector dos transportes (Portal Energia, 2019; USDOE, 2010).

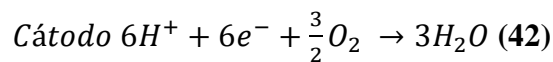
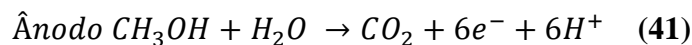
### **Reações na célula de combustível de membrana protónica**



### **- Células de combustível de metanol (Direct Methanol Fuel Cell)**

Estas células são parecidas com as de membrana protónica, ambas utilizam um polímero como eletrólito. Estas células funcionam com combustíveis alternativos tais como, o metanol, etanol, propano ou metano. Dentro da célula de combustível alimentada a metanol, o mesmo é convertido em hidrogénio e oxigénio. Estas células são menos eficientes que as de membrana protónica e tem o aspeto negativo de o metanol se difundir através da membrana de permuta do ânodo para o cátodo (Portal Energia, 2019).

### **Reações na célula de combustível de metanol**



Os veículos elétricos movidos a células de combustível (fuel cell electric vehicle , FCEV) e os veículos elétricos que utilizam baterias (Battery Electric Vehicle, BEV) convertem energia elétrica em energia cinética através de um motor elétrico. Nos veículos movidos a combustíveis fósseis (Gasolina e Diesel), a energia térmica resultante da queima do combustível é convertida em energia cinética no motor de combustão interna. A principal diferença entre os FCEV e os BEV é a fonte de eletricidade, enquanto os FCEV utilizam

hidrogénio para alimentar a célula de combustível, os BEV recebem a energia de baterias que são recarregadas externamente nas estações de carregamento (Deloitte, 2020).

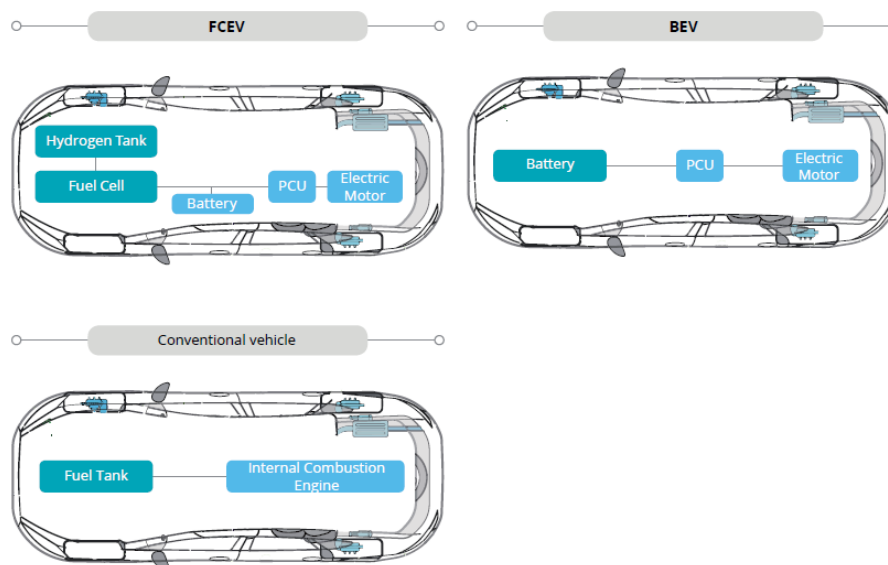


Figura 2.22 Sistema de propulsão em veículos a motor. Fonte: (Deloitte, 2020)

Num FCEV, a célula de combustível é o componente principal que converte energia química em energia elétrica para alimentar o veículo. Para além da célula de combustível existem outros sistemas complementares, como apresentado na Figura 2.23:

- sistema de fornecimento de hidrogénio,
- sistema de fornecimento de ar,
- sistema de gestão da água,
- sistema de gestão de calor,

A eletricidade produzida pela célula de combustível passa por uma unidade de controlo de potência (PCU) para o motor elétrico, que conta com a assistência de uma bateria para casos em que seja necessária potencia extra (Deloitte, 2020).

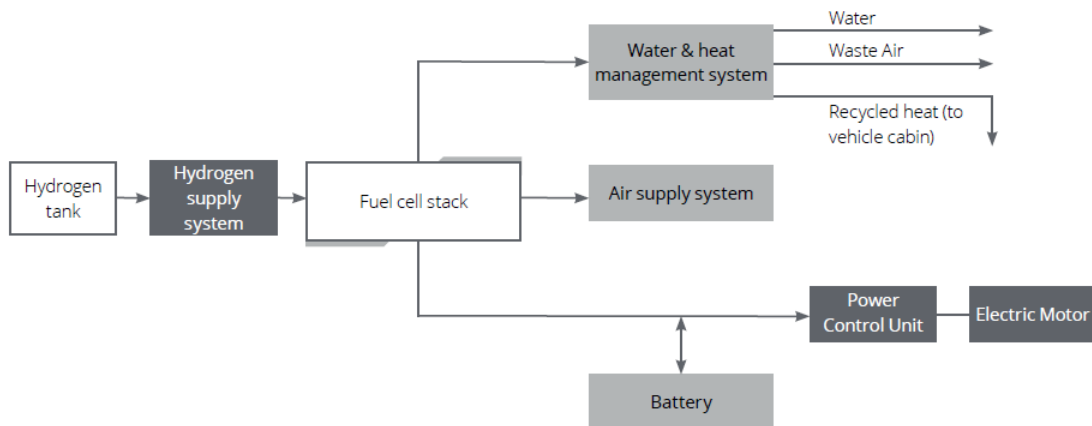


Figura 2.23 Princípio de operação de um FCEV. Fonte: (Deloitte, 2020).

Durante o funcionamento de um FCEV, o hidrogénio é convertido em energia eléctrica sendo que depois esta é convertida em energia mecânica, como mostrado na Figura 2.24. O motor eléctrico tem a mesma eficiência nos FCEV e BEV. A eficiência energética nos FCEV é influenciada pela perda de energia durante o processo de conversão de hidrogénio em eletricidade, que ronda os 45-55% (Deloitte, 2020).

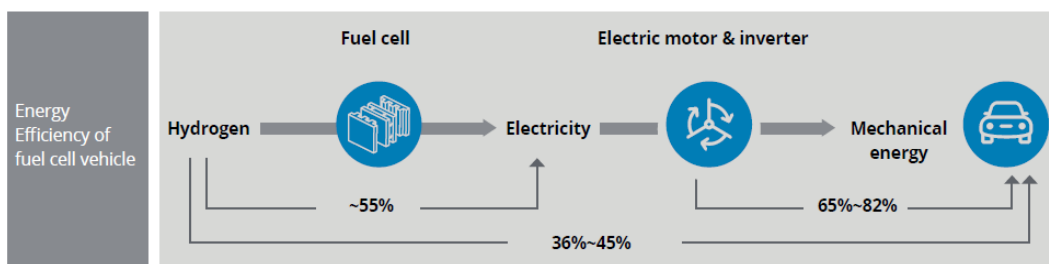


Figura 2.24 Eficiência energética de um FCEV. Fonte: (Deloitte, 2020)

O hidrogénio pode ser utilizado diretamente no motor de combustão interna ou misturado com outros combustíveis, como a gasolina e o diesel. Os motores de combustão interna em que o hidrogénio pode ser utilizado, no estado gasoso ou em mistura com outros combustíveis, são: motor rotativo Wankel, motor de ignição por compressão (Diesel) e motor de ignição por faísca (ciclo Otto) (AVTOTACHKI, 2021). O hidrogénio possui um poder calorífico elevado, sendo necessárias adaptações ao motor de combustão interna

para que este seja utilizado como combustível. A combustão interna do hidrogénio não emite dióxido de carbono, mas não está isenta da libertação de óxidos de azoto (Nox). Isto deve-se ao facto de o ar utilizado na combustão não conter apenas oxigénio, mas também azoto que é o principal constituinte do ar. Da combustão da gasolina resultam os Nox, único poluente da combustão do hidrogénio, monóxido de carbono e outros hidrocarbonetos. Utilizando células de combustível alimentadas a hidrogénio, o único efluente resultante é o vapor de água e calor, ao invés do motor de combustão interna alimentado a hidrogénio que tem como efluente os óxidos de azoto (Nox). Apesar do hidrogénio poder ser utilizado em motores de combustão interna, o futuro não passa por esta solução, mas sim pela utilização em células de combustível (Observador, 2021; Razão Automóvel, 2021; Oaos100, 2021).

### **3. Materiais e Métodos**

#### **3.1. Estratégia europeia para o Hidrogénio**

O hidrogénio é visto como uma peça importante na descarbonização, podendo ser utilizado como matéria-prima, combustível ou vetor de transporte e armazenamento de energia. Pode, assim, ser utilizado em diversas aplicações, a nível da indústria em processos industriais e químicos, no setor dos transportes (aéreo marítimo ou rodoviário), em aplicações de aquecimento, em setores de descarbonização onde a eletrificação direta não é possível e no armazenamento de energia, tendo, portanto, um papel relevante na integração do sistema energético. Esta transição energética irá transformar como a UE produz, armazena e consome energia (Comissão Europeia, 2020; Parlamento Europeu, 2021).

Atualmente o hidrogénio representa apenas uma pequena parcela do cabaz energético da União Europeia, cerca de 2%, e o produzido é maioritariamente a partir de combustíveis fósseis tais como, o gás natural e o carvão que representam 95% da produção. Com a produção de hidrogénio através dos combustíveis fósseis são libertadas 70 a 100 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano na UE. De modo que o hidrogénio seja solução para a neutralidade carbónica é necessário que atinja uma escala de produção superior e que descarbonize a sua produção. Estima-se, segundo resolução do Parlamento Europeu, que no ano de 2050 as energias renováveis possam representar praticamente 100% do mix energético da UE e que o hidrogénio possa atingir os 20% desse total (Comissão Europeia, 2020; Parlamento Europeu, 2021).

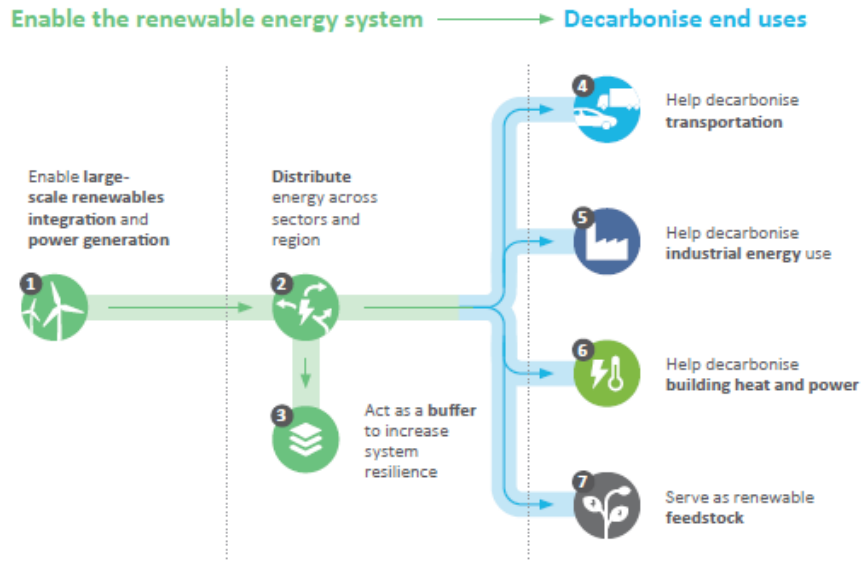


Figura 3.1 Diferentes formas de utilizar o hidrogénio para o processo de descarbonização. Fonte: (Chatzimarkakis, 2020)

A produção mundial de hidrogénio, atualmente, baseia-se em instalações específicas ou como subproduto de indústria de refinação e de produtos químicos utilizando combustíveis fósseis. Cerca de 43% do hidrogénio produzido mundialmente é utilizado na produção de amoníaco que é utilizado em fertilizantes agrícolas, 52% é utilizado na refinação de hidrocarbonetos e 5% na síntese do metanol (Parlamento Europeu, 2021).

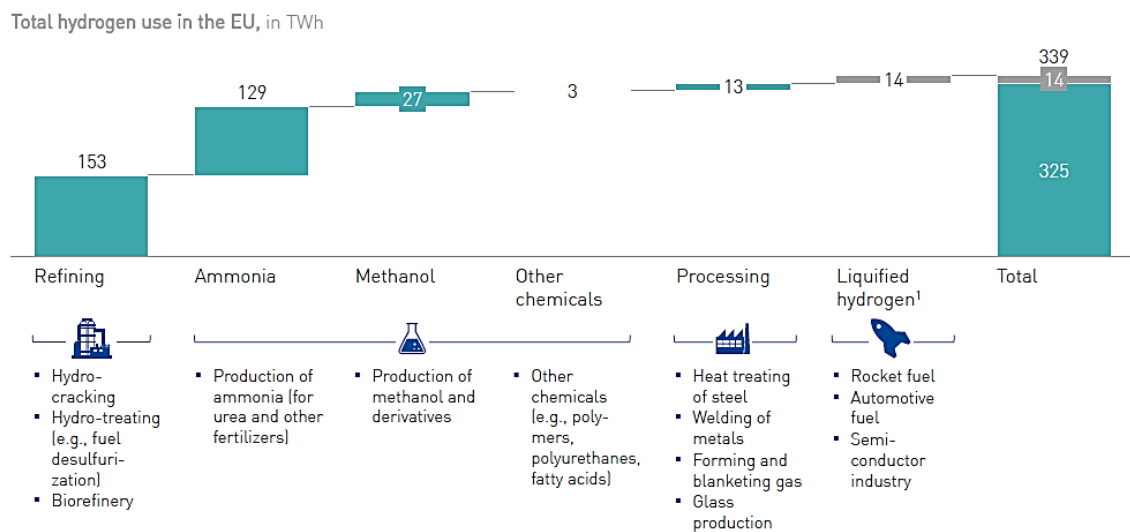


Figura 3.2 A utilização atual do hidrogénio. Fonte: (FCH, 2019)

O hidrogénio é visto como uma prioridade para concretizar os objetivos propostos no Pacto Ecológico Europeu e assim a transição para as energias limpas na Europa. Espera-se que, a eletricidade produzida através de energias renováveis descarbonize a maioria do consumo energético europeu até ao ano de 2050. O hidrogénio como vetor de armazenamento e transporte de energia, a partir de fontes de energia renováveis, pode complementar em caso de variações sazonais e fazer a ligação entre locais de produção e centros de procura.

Para que o hidrogénio seja implantado a nível europeu é necessário superar diversos desafios com parcerias no sector privado com os estados-membros. Para essa implementação é fundamental acautelar vários aspetos tais como, investimento, quadro regulamentar favorável, novos mercados pilotos, investigação e inovação nas tecnologias, rede de infraestruturas, um mercado único e cooperação com outros parceiros da UE (Comissão Europeia, 2020).

De modo a implementar as ideias do Pacto Ecológico europeu, o hidrogénio limpo terá que ser uma solução para descarbonizar diversos sectores instalando potência eletrolítica de pelo menos 6GW para produção de hidrogénio renovável até 2024, e 40GW até o ano de 2030 na UE. Além disso, existe também o objetivo de introduzir capacidade de produção eletrolítica de 40GW, no mesmo período de tempo, em países vizinhos e exportadores para a UE (Continente Africano e Ucrânia) pois estes têm um grande potencial de fontes de energia renováveis. (Kakoulaki *et al.*, 2021; Comissão Europeia, 2020; Chatzimarkakis, 2020).

A maioria dos estados-membros incluíram planos para hidrogénio limpo nos seus planos nacionais em matéria de energia, sendo que alguns já adotaram estratégias nacionais. No lote de países que possuem uma estratégia nacional podemos encontrar França, Noruega, Alemanha, Portugal, Espanha, Países Baixos, Hungria e Finlândia, sendo que existem vários países que vão entrar neste lote como a Áustria, Dinamarca e Itália e República Checa. Os investimentos cumulativos a nível europeu em hidrogénio renovável atingirão valores compreendidos entre os 180 mil milhões de euros e os 470 mil milhões de euros até ao ano de 2050. Para o hidrogénio hipocarbónico (com captura de gases de efeito de estufa) é esperado um investimento entre os 3 mil milhões de euros e os 18 mil milhões de euros (Comissão Europeia, 2020; Parlamento Europeu, 2021).

### 3.1.1. Denominação do Hidrogénio

De acordo com resolução do Parlamento Europeu de 19 de Maio de 2021, a classificação dos diferentes tipos de hidrogénio deve ser feita de acordo com bases científicas e não com a classificação normalmente utilizada através de cores, de forma a criar-se uma classificação jurídica em que se consigam adaptar as definições jurídicas nacionais. A utilização de uma terminologia com base científica permite que esta seja aplicada de forma uniforme em toda a UE (Parlamento Europeu, 2021).

O hidrogénio pode ser produzido através de variados métodos, a sua classificação baseia-se nos níveis de emissões, no método de produção e na fonte de energia utilizada (Comissão Europeia, 2020):

- Hidrogénio eletrolítico - Produção através da eletrólise da água independentemente da fonte de energia elétrica;
- Hidrogénio renovável - Produção através da eletrólise da água em que a fonte de energia elétrica é renovável;
- Hidrogénio Limpo – Também denominado de hidrogénio renovável;
- Hidrogénio fóssil - Produção através de processos que utilizam combustíveis fósseis como matéria-prima;
- Hidrogénio fóssil com captura de carbono – Subcategoria do hidrogénio fóssil que implica a captura dos gases com efeito de estufa emitidos durante produção;
- Hidrogénio Hipocarbónico – Refere-se ao Hidrogénio fóssil com captura de carbono e ao Hidrogénio eletrolítico.

Segundo esta mesma resolução, na classificação feita na estratégia europeia existe uma discrepância entre as diferentes definições de hidrogénio limpo, utilizadas pela Comissão e pela Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo. A distinção entre hidrogénio renovável e hidrogénio hipocarbónico não deve deixar dúvidas. Assim, deve ser evitada a utilização de dois nomes para a mesma categoria de hidrogénio, o “renovável” e o “limpo”, o que ofereceria uma maior clarificação, sendo que segundo esta resolução o termo “hidrogénio renovável” é a melhor opção pois é a mais objetiva e cientificamente fundamentada (Parlamento Europeu, 2021).

De momento, o hidrogénio fóssil é o mais vantajoso em termos de custos na UE com cerca de 1,5€/Kg, sendo que o hidrogénio fóssil com captura de carbono tem um custo de 2€/Kg. Já o hidrogénio renovável, atualmente, é o que tem maior custo compreendido entre os 2,5 e 5€/Kg. Relativamente ao hidrogénio renovável os custos estão a descer ao longo dos anos e espera-se que devido às economias de grande escala este valor baixe e consiga competir com o hidrogénio fóssil. (Comissão Europeia, 2020; Kakoulaki *et al.*, 2021). Na economia do hidrogénio que a UE quer implementar, o hidrogénio limpo deve ser a sua base, sendo que o hidrogeno hipocarbonico terá um papel de transição visto que, o hidrogénio limpo ainda não é abundante e competitivo (Parlamento Europeu, 2021).

### 3.1.2. Metas e prazos

O objetivo da UE consiste em implementar o hidrogénio renovável utilizando preferencialmente energia eólica e solar no seu processo de produção através da eletrólise. Até ao ano de 2050, o hidrogénio renovável deve ser progressivamente implementado em grande escala, sendo que à medida que as tecnologias de produção deste tipo de hidrogénio se desenvolvem os custos de produção diminuem.

A implementação do hidrogénio ocorrerá de forma gradual, com diferentes velocidades de utilização em sectores diferenciados e até em diferentes regiões na EU (Comissão Europeia, 2020).

Esta estratégia pode ser dividida em duas fases, uma primeira até ao ano de 2030 e a segunda até ao ano de 2050. A primeira fase é dividida em duas partes, a primeira de 2020 a 2024 e a segunda de 2025 a 2030. (Kakoulaki *et al.*, 2021)

**1ª Fase:** Entre o ano de 2020 e 2024, o objetivo é instalar uma potência eletrolítica de no mínimo 6GW que permitam produzir até 1 milhão de toneladas de hidrogénio renovável na UE, de modo a começar a descarbonizar a produção de hidrogénio fóssil atual em diversos sectores como o químico (Kakoulaki *et al.*, 2021; Comissão Europeia, 2020). Neste período será preciso aumentar a produção de eletrolisadores incluído os de grande dimensão (100MW), que serão instalados em refinarias e complexos químicos de grande dimensão, preferencialmente alimentados a eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis (Comissão Europeia, 2020)

Entre o ano de 2025 e 2030, o hidrogénio deve ser parte integrante do sistema energético europeu, com o objetivo de instalar uma potência eletrolítica de pelo menos 40GW em território europeu até ao ano de 2030. Esta potência instalada deverá produzir até 10 milhões de toneladas de hidrogénio renovável na UE (Kakoulaki *et al.*, 2021; Comissão Europeia, 2020). É esperado que o hidrogénio renovável se torne cada vez mais competitivo ao nível de custos em relação a outros métodos de produção. Assim, o hidrogénio renovável terá um papel importante no sistema elétrico baseado em fontes de energia renováveis. Quando existir abundância de energia elétrica proveniente de fontes de energia renováveis, esta poderá ser utilizada para a produção de hidrogénio, neste caso o hidrogénio é utilizado como forma de armazenamento podendo funcionar como reserva e reforçando o sistema. (Comissão Europeia, 2020).

Nesta fase será necessária uma infraestrutura logística à escala da UE que permita transportar o hidrogénio para centros de procura em cada país ou entre estados-membros associados a uma criação de uma rede de estações de abastecimento de hidrogénio. A rede de gás natural já existente poderá ser uma solução pois se for sujeita a adaptações permitirá transportar hidrogénio em distâncias longas de acordo com a Figura 3.3 (Chatzimarkakis, 2020).



Figura 3.3 Infraestrutura de transporte gás natural na Europa (linhas azuis e vermelhas) e novas infraestruturas de transporte de hidrogénio (linhas laranjas). Fonte:( Chatzimarkakis, 2020)

**2º Fase:** A segunda fase decorrerá a partir do ano de 2030 até ao de 2050, neste período espera-se que as tecnologias de produção de hidrogénio renovável atinjam a maturidade e que estejam implantadas em grande escala em todos os sectores, inclusive nos de difícil descarbonização (Comissão Europeia, 2020).

Nesta fase espera-se que a procura por hidrogénio renovável aumente e que a procura desça gradualmente a nível das refinarias, visto que um aumento do consumo de hidrogénio levará a uma diminuição de produtos petrolíferos (Kakoulaki *et al.*, 2021).

Como apresentado na Figura 3.4, são traçados dois panoramas para o desenvolvimento do hidrogénio na UE, um ambicioso e outro mais conservador. No panorama mais ambicioso, prevê-se que no ano de 2050 o hidrogénio represente 24% da procura de energia, correspondendo a um valor de 2251 TWh. Analisando a nível setorial verifica-se que, 675TWh corresponde ao setor dos transportes, 579 TWh em aquecimento e eletricidade em edifícios, 391 TWh em matéria-prima industrial já existente, 257 TWh em nova matéria-prima industrial, 237TWh em energia na indústria e 112 TWh na produção de energia (FCH, 2019; Kakoulaki *et al.*, 2021). Atingir estes valores permitiria à UE reduzir cerca de 560 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> até 2050. (Kakoulaki *et al.*, 2021)

No panorama mais conservador, prevê-se que no ano de 2050, o hidrogénio represente 8% da procura de energia correspondendo a 780 TWh. Se olharmos a nível setorial verificamos que 85 TWh corresponde ao setor dos transportes, 207 TWh em aquecimento e eletricidade de edifícios, 391 TWh em matéria-prima industrial já existente, 1TWh em nova matéria-prima industrial, 53 TWh em energia na indústria e 43 TWh na produção de energia (FCH, 2019).

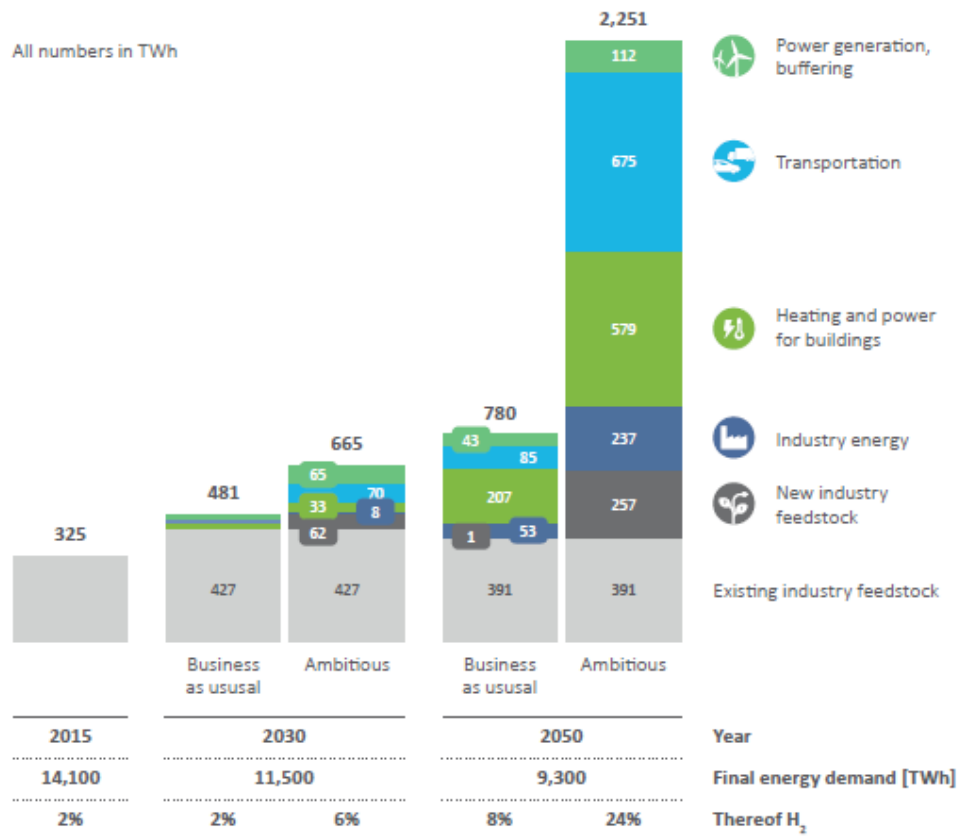


Figura 3.4 Desenvolvimento do hidrogénio na UE. Fonte:( FCH, 2019).

### 3.1.3. Investimento

Para alcançar os objetivos propostos é necessário um investimento que estimule o desenvolvimento e implementação de tecnologias, e criação de infraestruturas para a implementação do hidrogénio renovável.

Até ao ano de 2030, o investimento em eletrolisadores estará compreendido entre os 24 e os 42 mil milhões de euros. Assim, é necessário um investimento para reforçar e ligar diretamente os eletrolisadores à potência instalada (80 a 120GW) de energia solar e eólica, para fornecer energia elétrica utilizada no eletrólise para a formação de hidrogénio renovável. Este investimento na ligação da potência instalada renovável e os eletrolisadores fixa-se entre os 220 e 340 mil milhões de euros.

Uma parte do investimento (65 mil milhões de euros) está direcionada para o transporte, distribuição, armazenamento de hidrogénio e estações de abastecimento do mesmo. Até

ao ano de 2050, os investimentos na capacidade de produção na UE atingirão um valor entre os 180 e 470 mil milhões de euros, pressupondo a implementação de 40GW de hidrogénio renovável e 5Mt de hidrogénio hipocarbónico até 2030, e ainda 500GW de capacidade eletrolítica até 2050 (Comissão Europeia, 2020).

Para agilizar este investimento foi criada a Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo que permitirá facilitar as ações da estratégia para o hidrogénio e apoiar os investimentos, de modo a aumentar a procura e produção de hidrogénio renovável e hipocarbónico.

A Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo é formada por autoridades públicas nacionais e locais, sociedade civil, indústria e outras partes interessadas. Desde 2020 que 500 empresas fazem parte desta aliança, e esperava-se que em 2024 pudessem ser 1000 empresas, mas a 20 de maio de 2021 verificou-se que esta Aliança já é constituída por 1399 membros. O objetivo desta Aliança é identificar e criar um leque de projetos de investimentos viáveis a nível industrial desde a produção, transmissão e aplicações na esfera da mobilidade, da indústria, da energia e do aquecimento. Contudo, é importante e necessário que exista coordenação entre esta Aliança, os Estados-Membros e os regimes de apoio, enquanto o hidrogénio não conseguir competir a nível de custos (ECH2A, 2021; Comissão Europeia, 2021a; 2021b).

#### **3.1.4. Setor dos transportes**

O setor dos transportes emite cerca de 32% das emissões de gases com efeito de estufa na UE, sendo necessário reduzir estes valores até ao ano de 2050, eliminando assim 72% das emissões atuais. Para que esta mudança ocorra é necessária uma alteração de paradigma, substituindo os combustíveis fósseis por outras fontes de energia renováveis (FCH, 2019). Um ponto fundamental neste sector baseia-se no facto de num veículo ser necessário um sistema de armazenamento que ocupe pouco espaço, seja leve e que armazene grandes quantidades de energia (Abe *et al.*, 2019). É também necessária uma rede de posto de recarga/reabastecimento visto que é essencial distribuir de forma eficiente a energia de fontes renováveis até aos veículos em si. Os veículos elétricos movidos a células de combustível ou com baterias não produzem gases de escape com efeito de estufa, ao contrário dos veículos movidos a combustíveis fósseis,

biocombustíveis, GPL e os híbridos. Podem ser consideradas emissões nos carros elétricos dependendo da forma de obtenção do combustível. Assim, nos carros a células de combustível dependendo do processo de produção de hidrogénio (utilizando combustíveis fósseis) e nos carros a baterias dependendo da fonte de energia elétrica utilizada.

Para os veículos de passageiros, os veículos elétricos a células de combustível têm tempos de reabastecimento muito parecidos aos veículos de motor de combustão interna e as distâncias alcançadas por ambos são muito similares. No caso dos veículos elétricos a baterias, os tempos de carregamento mais elevados, superiores a 30 min, não são tão cómodos para os utilizadores de veículos a células de combustível que não necessitam de ajustar os seus comportamentos. Os veículos elétricos a células de combustível, em comparação com os veículos a baterias, possuem um menor tempo de reabastecimento para a mesma distância, têm mais autonomia e menor peso e volume do sistema de armazenamento de energia (DGEG, 2018; FCH, 2019; TOYOTA UK MAGAZINE, 2020).



Figura 3.5 Comparação de diversos sistemas de armazenamento para uma autonomia de 500km. Fonte: (DGEG, 2018)

Em veículos pesados, as células de combustível são a opção mais adequada, o uso de baterias neste veículo implicaria que estas tivessem dimensões enormes e um tempo de carregamento muitíssimo elevado (Transport&Environment, 2020).

A infraestrutura de abastecimento do hidrogénio possui algumas vantagens em relação às infraestruturas de carregamento rápido. A nível de reabastecimento/recarregamento, o hidrogénio é 10 a 15 vezes mais rápido, ou seja, uma estação de reabastecimento de hidrogénio reabastece 10 a 15 vezes mais veículos do que uma estação de recarregamento rápido (FCH, 2019; NFPA, 2021).

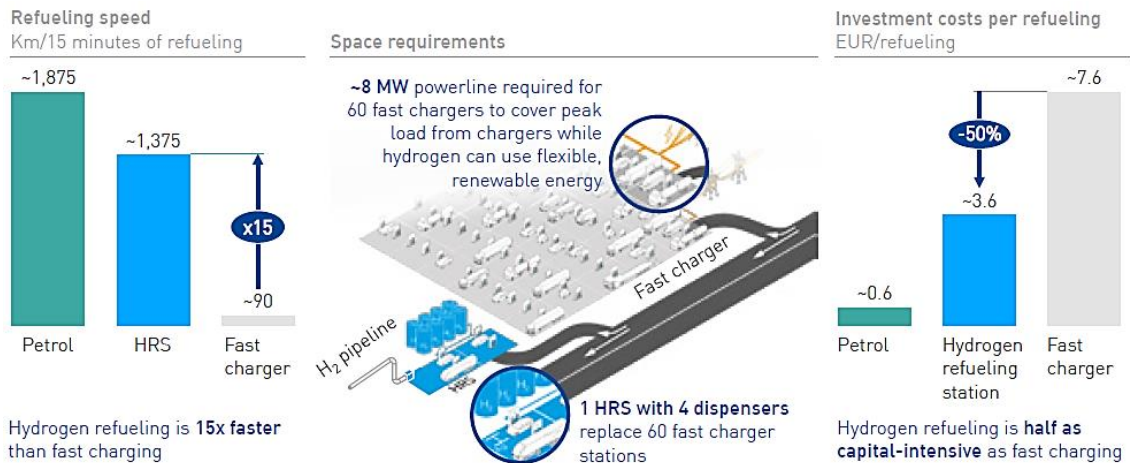


Figura 3.6 Velocidade de abastecimento, requisitos de espaço e abastecimento. Fonte:(FCH, 2019)

O hidrogénio permite equilibrar a rede energética, pois o excesso de energia elétrica pode ser utilizado para produzir hidrogénio, o que permite armazenar energia. Relativamente às estruturas de carregamento rápido, estas aumentam a procura de pico sendo que para ultrapassar este ponto, é necessário um aumento da capacidade de pico e melhoramento na rede de distribuição (FCH, 2019; NFPA, 2021). Os postos de carregamento necessitam de 10 a 15 vezes mais espaço do que os postos de abastecimento de hidrogénio, para lidar com o mesmo número de veículos. Este facto levaria a uma expansão muito significativa da rede de abastecimento rápido para equilibrar os números, e consequentemente levaria ao aumento de potência da rede de modo a controlar os picos de procura (FCH, 2019).

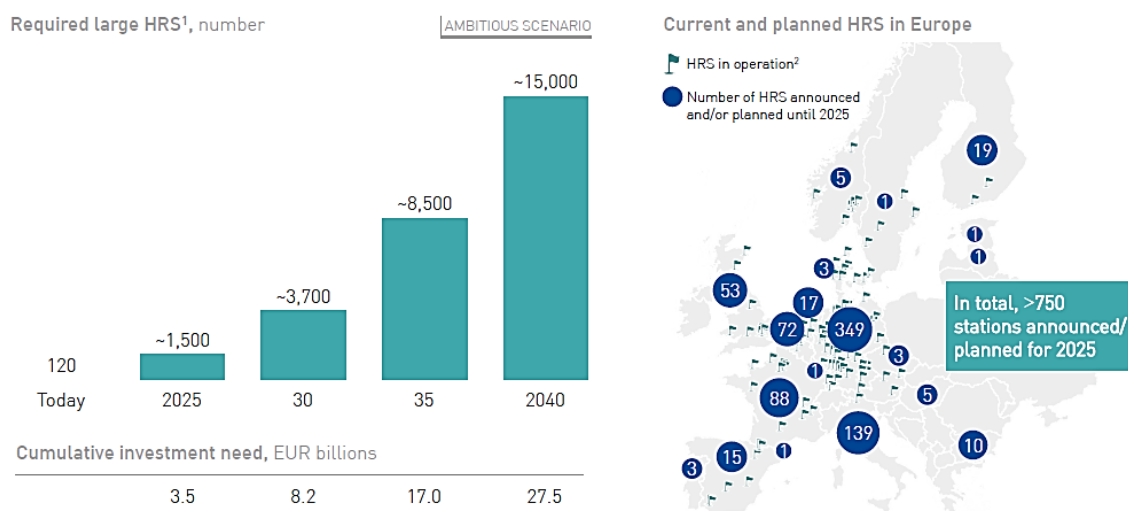


Figura 3.7 Futuros postos de abastecimento de hidrogénio. Fonte: (FCH, 2019).

Espera-se que os veículos movidos a hidrogénio tais como carros, autocarros, camiões e comboios, se tornem mais visíveis neste sector. De momento, os carros elétricos movidos a baterias, especialmente no sector automóvel, conseguem contribuir mais rapidamente para a descarbonização, enquanto não existe uma rede de infraestruturas de reabastecimento a hidrogénio.

Até ao ano de 2050, espera-se que cerca de 30% da procura de hidrogénio seja no sector dos transportes. Atualmente, ainda não existe uma rede de infraestruturas implementada na UE, sendo que só existem 120 postos de abastecimento a hidrogénio.

Até 2025, já foram anunciados e estão a ser planeados mais de 750 postos de reabastecimento pela UE, pertencendo a Portugal 3 postos. No futuro, é esperado que exista uma rede mais consolidada para abastecer uma frota de veículos a hidrogénio, sendo expectável que existam cerca de 3700 postos de abastecimento em 2030 e aproximadamente 15000 em 2050 (FCH, 2019; Deloitte,2020).

## **3.2.Estratégia portuguesa para o Hidrogénio**

### **3.2.1. Enquadramento**

Portugal em sintonia com a UE e no cumprimento do Acordo de Paris, comprometeu-se a atingir a neutralidade carbónica até ao ano de 2050, descarbonizando assim a sua economia, sendo criado o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050).

De acordo como RNC2050, para se atingir a neutralidade carbónica tem que existir uma redução entre 85 e 90% nas emissões de gases com efeito de estufa em relação a 2005, e existir uma captura de carbono entre os 9 a 13 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Até 2030, deve existir uma redução de 45 a 55% de emissões e de 65 a 75% de emissões até 2040, em relação aos valores de 2005. De modo a cumprir estes objetivos, Portugal submeteu à UE o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC2030) que estabelece metas ambientais e no setor da energia. Neste plano, Portugal compromete-se a nível de energia a incorporar 47% de fontes renováveis no consumo final de energia, a atingir 80% de renováveis na produção de energia elétrica, a reduzir para 65% a dependência energética a nível de importações e a reduzir em 35% o consumo de energia primária. Para que se cumpram estes objetivos é necessária uma ação combinada entre políticas energéticas e climáticas, de modo a descarbonizar diversos sectores da economia. O hidrogénio desempenhará um papel importante na descarbonização destes setores, permitindo incorporar fontes de energia renováveis no consumo final de energia, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, tornando então o sector energético mais flexível. O hidrogénio verde possui elevada densidade energética, permite o armazenamento de energia produzida em excesso através de fontes renováveis e é um elemento utilizado em combustíveis de base renovável. Além disso, o hidrogénio verde é visto como uma peça fundamental para o cumprimento destes objetivos de descarbonização, sendo fundamental promover as políticas, sendo já criada a Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2).

A EN-H2 tem como objetivo integrar faseadamente e de forma sustentável o hidrogénio na descarbonização da economia portuguesa, enquadrando o seu papel no sistema energético. Esta estratégia tem ainda como objetivo enquadrar a visão portuguesa, de modo que empresas e promotores apresentem projetos em sintonia e relacionados com estes objetivos (República Portuguesa, 2020; Diário da República, 2020; PNEC2030, 2019).

### 3.2.2. Iniciativas

Portugal pretende implementar uma série de iniciativas que permitem contribuir para o cumprimento dos objetivos a que se propôs a nível da descarbonização entre as quais: a implementação de um mecanismo de apoio à produção de hidrogénio verde, que vai cobrir a diferença entre o preço da produção de hidrogénio verde e o preço do gás natural em Portugal, de modo a não afetar os consumidores; criar um quadro regulamentar para o hidrogénio, que licencie as instalações e regule a injeção de hidrogénio na rede de gás natural, sem desprezar a qualidade e segurança do abastecimento (República Portuguesa, 2020; REN, 2021).

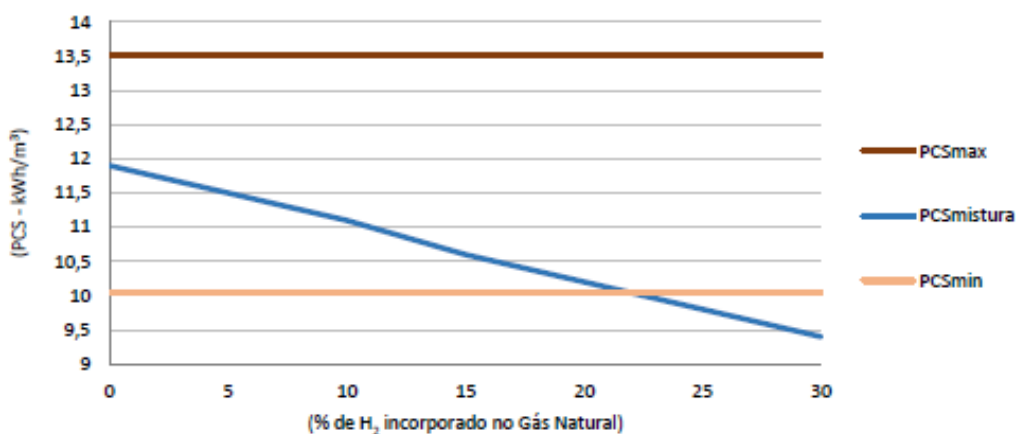


Figura 3.8 Representação da evolução do PCS do gás face à incorporação de hidrogénio. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

De momento, a legislação ainda não permite introduzir hidrogénio na rede de gás natural. Como podemos ver na Figura 3.8, do ponto de vista teórico apenas se pode incorporar 22% de hidrogénio no gás natural, de modo que o poder calorífico mínimo se mantenha dentro dos limites regulados (República Portuguesa, 2020).

O apoio no investimento de projetos de hidrogénio, patrocinando novas tecnologias e clusters industriais com a utilização de energia de fontes renováveis, que faz parte de mais uma iniciativa. Esta iniciativa visa a candidatura ao Projeto Importante de Interesse Europeu Comum (IPCEI), que foi efetuada sendo o projeto de hidrogénio de Sines um dos 37 projetos aprovados (Dinheiro Vivo, 2021).

Uma das iniciativas consiste em implementar uma Aliança nacional para o Hidrogénio, ao estilo da que existe a nível europeu, com vista ao envolvimento de agentes do sector público e privado na economia de hidrogénio, assegurando o cumprimento dos objetivos nacionais. (Fi group, 2021)

Assim, algumas iniciativas e tarefas da descarbonização passam por:

- Descarbonizar o setor dos transportes promovendo a utilização do hidrogénio e combustíveis sintéticos produzidos através do mesmo em conjunto com a eletricidade, e criando infraestruturas de abastecimento de hidrogénio;

- Descarbonizar o sector da indústria química que tem um peso elevado nas emissões de gases com efeito de estufa;

- Pretende-se aproveitar as águas residuais para a produção de hidrogénio verde através da eletrólise;

- Implementar um laboratório colaborativo de investigação e desenvolvimento das tecnologias relacionadas com o hidrogénio (Diário da República, 2020).

Na Tabela 3.1 podemos ver as fontes potenciais de água para o processo de produção de hidrogénio através da eletrolise e qual o tratamento necessário para que essas fontes de água possam ser utilizadas.

Tabela 3.1 Fontes potenciais de água para eletrolise e opções de tratamento necessárias. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

Fonte potencial de água	Principais poluentes e parâmetros de qualidade da água	Operações de tratamento necessárias antes da eletrolise
Águas superficiais (rios, ribeiras e lagos).	Organismos vivos, sólidos, matéria orgânica e eventual toxicidade.	Crivagem fina (ou microfiltração) + coagulação/ floculação e filtração (ou ultrafiltração) + osmose inversa.
Águas subterrâneas . . . .	Sólidos dissolvidos (eventual salinidade, matéria orgânica e toxicidade).	Tratamento depende da composição da água (que é variável), podendo ser necessária ultrafiltração ou osmose inversa.
Água residual industrial	Variável consoante tipo de indústria. Sólidos, matéria orgânica, toxicidade.	Eventualmente neutralização, coagulação/ floculação e filtração (ou ultrafiltração/nanofiltração), osmose inversa.
Águas residuais urbanas tratadas.	Sólidos suspensos e dissolvidos, matéria orgânica, contaminação fecal, eventual toxicidade.	Nano ou ultrafiltração + osmose inversa.
Água do mar. . . . .	Salinidade 30-37 ‰, organismos vivos, incluindo algas, sólidos e matéria orgânica.	Crivagem fina (ou microfiltração ou ultrafiltração) + osmose inversa. Necessidades de elevação e distância poderão ser substanciais.
Estuários. . . . .	Salinidade média 10-30 ‰, organismos vivos, incluindo algas, sólidos e matéria orgânica.	Crivagem fina (ou microfiltração ou ultrafiltração) + osmose inversa. Necessidades de elevação e distância poderão ser substanciais.
Água da rede pública . . .	Sólidos dissolvidos . . . . .	Filtração (e/ou osmose inversa) consoante as características da água.
Águas pluviais . . . . .	Sólidos dissolvidos, e eventualmente sólidos suspensos e matéria orgânica.	Filtração (eventualmente tratamento físico ou químico), osmose inversa.

### 3.2.3. Fases, Metas e Objetivos

A estratégia portuguesa para o hidrogénio divide-se em três fases (Diário da República, 2020):

- Fase 1: decorrerá de 2020 a 2023 e visa a criação de um enquadramento regulamentar que permita acelerar e desenvolver novos projetos. Se existir um enquadramento regulamentar será possível a implantação dos projetos de diferentes escalas em diversos sectores da economia
- Fase 2: decorrerá de 2024 a 2030 e prevê uma consolidação do enquadramento e dos projetos a nível nacional, em várias dimensões da cadeia de calor.
- Fase 3: decorrerá de 2030 a 2050 e ao fim deste período espera-se um pleno desenvolvimento do mercado nacional de hidrogénio, incluindo o nível de exportação.

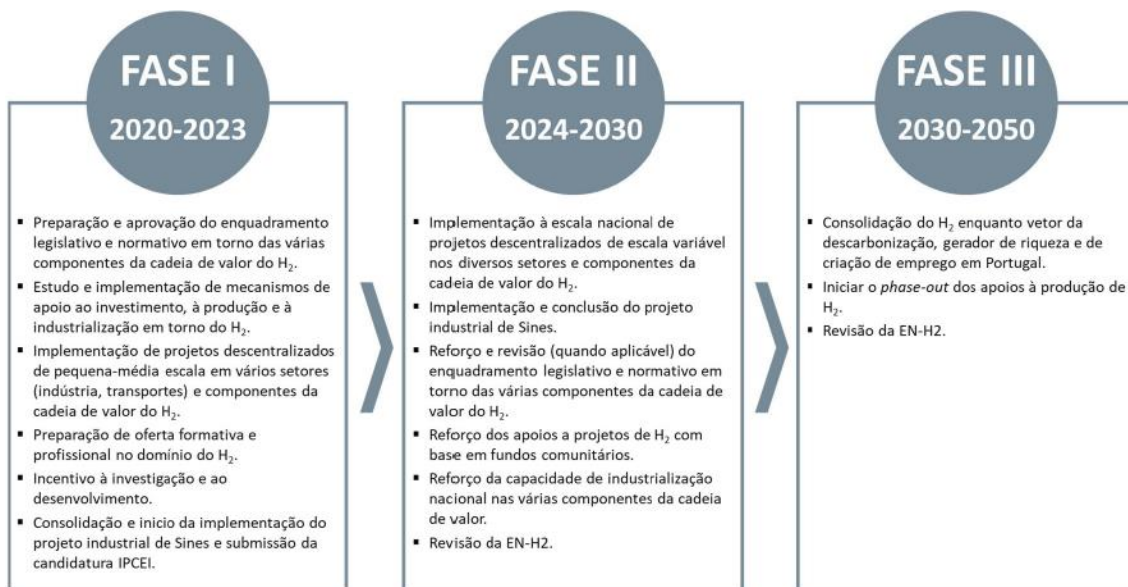















Figura 3.9 Fases de implementação do EN-H2. Fonte: (Diário da República, 2020).

Até ao ano de 2050, é necessária a descarbonização de diversos sectores, nomeadamente descarbonizar toda a rede de gás natural, as centrais termoeletricas a gás natural, o sector dos transportes e da indústria com a complementação de eletricidade de origem renovável. Na Tabela 3.2 podemos ver a incorporação de hidrogénio em diversos setores.

Portugal propõe cumprir certas metas ao nível de incorporação, em volume, de hidrogénio em diversos sectores. Isto é, incorporar 10 a 15% de hidrogénio verde até ao ano de 2030 nas redes de gás natural, e atingir valores entre os 75 e 80% até 2050. No sector da indústria, até 2030, pretende incorporar 2 a 5% de hidrogénio no seu consumo de energia atingindo valores de 20 a 25%, em 2050. Outro sector visado é o dos transportes, onde se espera incorporar entre 1 a 5% de hidrogénio verde no seu consumo de energia até 2030, sendo que para 2050 os valores são mais ambiciosos fixando-se dos 20 a 25%. No sector dos transportes, pretende-se investir e aumentar o número de pontos de abastecimento de hidrogénio. Atualmente, em Portugal, existe apenas um ponto de abastecimento, mas espera-se que em 2030 estes sejam entre 50 e 100. Ao nível da capacidade instalada de eletrolisadores esperam-se 2 a 2,5GW até 2030 (República Portuguesa, 2020).

Tabela 3.2 Proposta de metas e objetivos de incorporação, em volume, de hidrogénio nos vários setores.  
 Fonte: (República Portuguesa, 2020).

	2025	2030	2040	2050
 H <sub>2</sub> NA REDE DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL <sup>20</sup>	1% - 5%	10% - 15%	40% - 50%	75% - 80%
 H <sub>2</sub> NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL <sup>21</sup>	1% - 5%	10% - 15%	40% - 50%	75% - 80%
 H <sub>2</sub> NO CONSUMO DA INDÚSTRIA <sup>22</sup>	0,5% - 1%	2% - 5%	10% - 15%	20% - 25%
 H <sub>2</sub> NO CONSUMO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO	0,1% - 0,5%	1% - 5%	5% - 10%	20% - 25%
 H <sub>2</sub> NO TRANSPORTE MARÍTIMO DOMÉSTICO	0%	3% - 5%	10% - 15%	20% - 25%
 H <sub>2</sub> NO CONSUMO TOTAL FINAL DE ENERGIA	1% - 2%	2% - 5%	7% - 10%	15% - 20%
 H <sub>2</sub> NAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS A GÁS NATURAL	1% - 5%	5% - 15%	40% - 50%	75% - 80%
 CAPACIDADE PARA PRODUÇÃO DE H <sub>2</sub>	250 - 500 MW	1,75 - 2 GW	3 GW	5 GW
 CAPACIDADE PARA PRODUÇÃO DE H <sub>2</sub> UPP <sup>23</sup> (<5 MW)	50 MW	100 MW	250 MW	500 MW
 N.º DE PONTOS DE ABASTECIMENTO	10 - 25	50 - 100	500 - 700	1000 - 1500
 N.º DE VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS	25 - 50	400 - 750	1500 - 2500	4500 - 6000
 N.º DE VEÍCULOS PESADOS DE MERCADORIAS	25 - 50	400 - 500	4000 - 5000	10000 - 12000
 N.º DE VEÍCULOS LIGEIROS (PASSAGEIROS E MERCADORIAS)	400 - 500	750 - 1000	4000 - 5000	25000 - 30000

<sup>20</sup> O diferencial para os 100% será por via de outros gases renováveis (biogás e biometano).

<sup>21</sup> O diferencial para os 100% será por via de outros gases renováveis (biogás e biometano).

<sup>22</sup> Indústria Transformadora e Extrativa. Serão avaliados objetivos para cada um dos setores prioritários.

<sup>23</sup> Unidades de Pequena Produção.

### 3.2.4. Cadeia de valor de hidrogénio em Portugal

A cadeia de valor de hidrogénio divide-se em 4 fases, a sua produção, o seu armazenamento e a sua distribuição, e aplicações (Nikolaidis and Poullikkas, 2017).

A primeira fase da cadeia de valor é a produção, que engloba diversos processos e tecnologias. De acordo com a capacidade instalada, podemos separar a produção em grande escala ou centralizada, e em pequena escala ou descentralizada. A segunda fase compreende o armazenamento do hidrogénio nos diferentes estados, líquido, gasoso e sólido. A terceira fase corresponde às estruturas de distribuição para o abastecimento do hidrogénio. A quarta fase engloba as aplicações finais do hidrogénio em diversos sectores, na mobilidade, nos transportes e na indústria. Em aplicações estacionárias é utilizado para gerar calor e eletricidade a nível residencial e industrial (Diário da República, 2020).

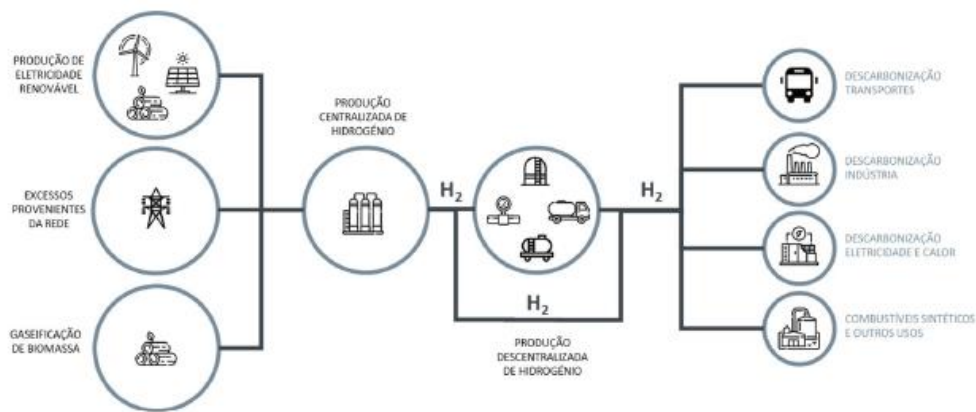


Figura 3.10 Esquema da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção à utilização final. Fonte: (Diário da República, 2020).

Dentro da cadeia de hidrogénio existem cinco configurações que variam de acordo com as características do sistema energético e do seu objetivo final das quais se inclui:

- Power to Gas (P2G)
- Power to Mobility (P2M)
- Power to Industry (P2I)
- Power to Power (P2P)
- Power to Synfuel (P2Fuel)

- Power-to-Gas (P2G):** o Hidrogénio verde é injetado, em certas percentagens, diretamente na rede de gás natural, ou convertido em metano sintético através de metanização. Esta cadeia de valor está direcionada para a descarbonização da rede de gás natural, através da incorporação de uma mistura de gases renováveis com o gás natural. Esta cadeia possui duas variantes, utilizando o hidrogénio ou o metano, sendo o hidrogénio obtido através da eletrólise e o metano através de um processo de metanização. A percentagem a incorporar na rede de gás natural está limitada devido às características dos equipamentos finais e da própria rede. A utilização desta cadeia de valor permite converter eletricidade em gases para o armazenamento de energia, e a utilização de uma rede de gás natural já existente, permitindo assim diminuir os custos de investimento e contribuir para a descarbonização. Em Portugal, nesta cadeia de valor já existem projetos em curso ou em fase de projeto tais como, a construção de uma central solar para a produção de hidrogénio e a realização de estudos de viabilidade de injeção na rede de gás natural. (República Portuguesa, 2020; DGEG, 2018; 2019)

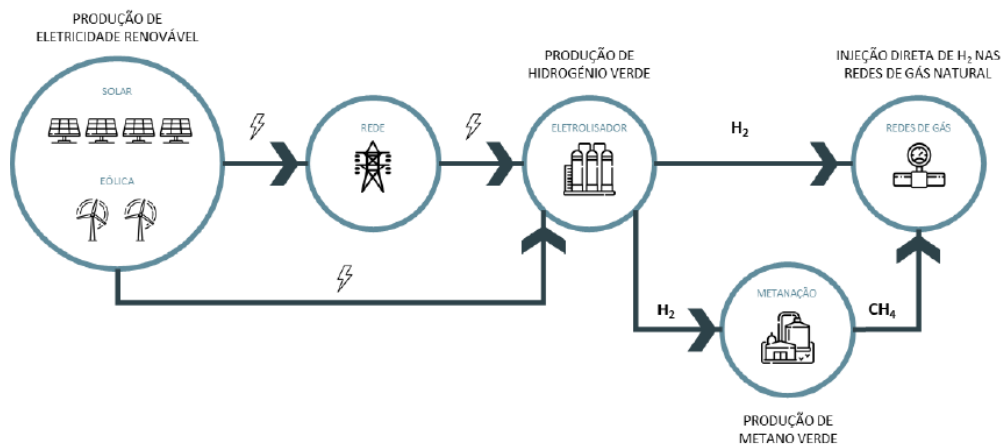


Figura 3.11 Esquema da cadeia de valor P2G. Fonte: (República Portuguesa, 2020)

- Power-to-Mobility (P2M):** o hidrogénio pode ser produzido a nível local ou transportado, de modo a fornecer combustível aos postos de abastecimento de veículos. Esta cadeia de valor é associada à mobilidade e aos transportes e baseia-se na utilização de células de combustível em veículos pesados e passageiros, em ferrovia não eletrificada. A infraestrutura de abastecimento tem um papel fundamental nesta cadeia de valor, sendo que já existem vários projetos na área

do abastecimento de hidrogénio para viaturas ligeiras e pesadas associadas a centros de logística, frotas de transportes e navios de cruzeiro utilizando hidrogénio verde (República Portuguesa, 2020; DGEG, 2018; 2019).

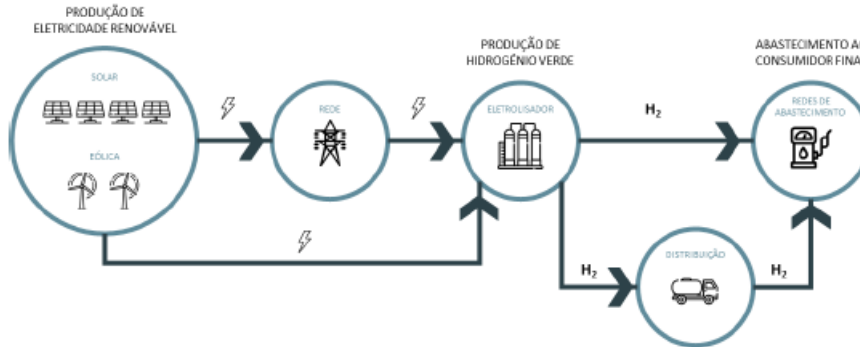


Figura 3.12 Esquema da cadeia de valor P2M. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

- Power-to-Industry (P2I):** de modo a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa deve existir uma substituição do gás natural por hidrogénio no sector industrial. O hidrogénio tem diferentes aplicações no sector da indústria, tendo o potencial de substituir o gás natural como fonte de calor e energia, em processos em que não é possível a eletrificação. Atualmente, o hidrogénio é utilizado como matéria-prima em diversos sectores tais como, no químico para a produção de amónia utilizado em fertilizantes e na refinação de produtos petrolíferos. Atualmente, procede-se a uma otimização de processos industriais nomeadamente no processo de combustão utilizando hidrogénio produzido a nível local (República Portuguesa, 2020; DGEG, 2018; 2019).

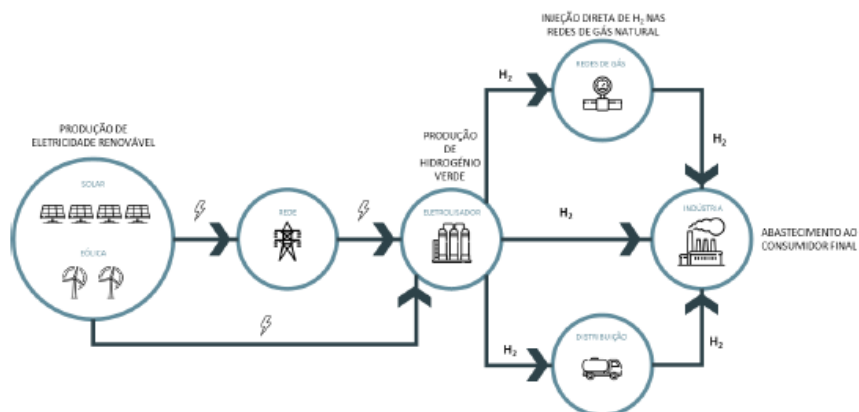


Figura 3.13 Esquema da cadeia de valor P2I. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

- Power-to-Power (P2P):** o excesso de eletricidade produzida através de fontes de energia renovável pode ser convertida em hidrogénio, armazenada e mais tarde reconvertida novamente em eletricidade através das células de combustível ou através de turbinas de centrais a gás adaptadas para esse fim. Esta cadeia de valor é direcionada para a rede elétrica, sendo que a energia elétrica pode ser produzida através de turbinas a gás adaptadas ou células de combustível estacionárias a hidrogénio, sendo ele próprio produzido utilizando energia elétrica de fontes renováveis. Do ponto de vista do armazenamento é visto como um complemento da produção, pois permite utilizar a energia em momentos em que não exista tanta produção. Existem vários projetos nesta cadeia de valor, nomeadamente, a utilização de hidrogénio verde produzido através de eletricidade renovável nas centrais termoelétricas do Ribatejo e da Tapada do Outeiro, o armazenamento e co-combustão com gás natural nas turbinas a gás de ciclo combinado. Um outro projeto é o desenvolvimento e comercialização de um sistema que visa produzir hidrogénio por eletrólise com recurso a eletricidade de origem renovável offshore (República Portuguesa, 2020; DGEG, 2018; 2019).

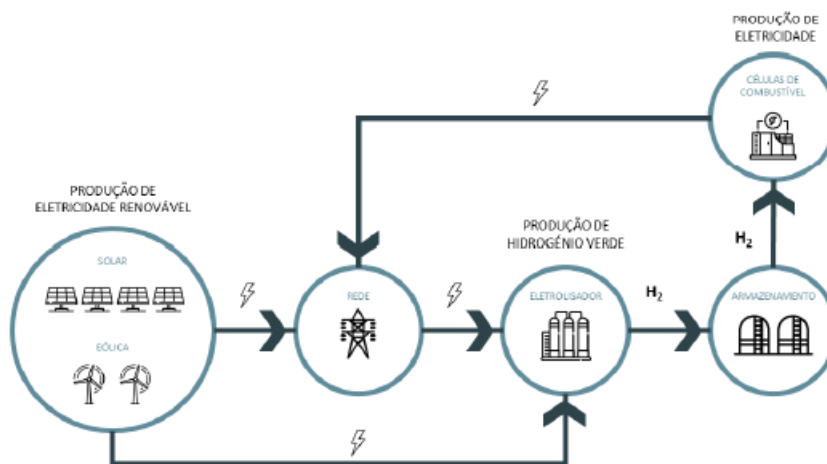


Figura 3.14 Esquema da cadeia de valor P2P. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

- Power-to-Synfuel (P2Fuel):** a utilização de hidrogénio verde tem potencial para descarbonizar a produção de combustíveis, substituindo-os por combustíveis sintéticos de origem renovável. Os combustíveis sintéticos são, normalmente, produzidos através de reformação a vapor do metano ou por gaseificação do metano. Através do processo de Fisher Tropsch é possível produzir combustíveis sintéticos, o que teoricamente nos diz que os produtos derivados do petróleo no

estado bruto podem ser obtidos sinteticamente. O syngas é obtido pela reação do hidrogénio gasoso com o dióxido de carbono formando metano pelo processo de Fisher Tropsch. Atualmente, existem projetos nesta cadeia de valor para a produção de combustíveis sintéticos nomeadamente à escala industrial para utilização no sector da aviação com base em hidrogénio verde (República Portuguesa, 2020; DGEG, 2018; 2019).

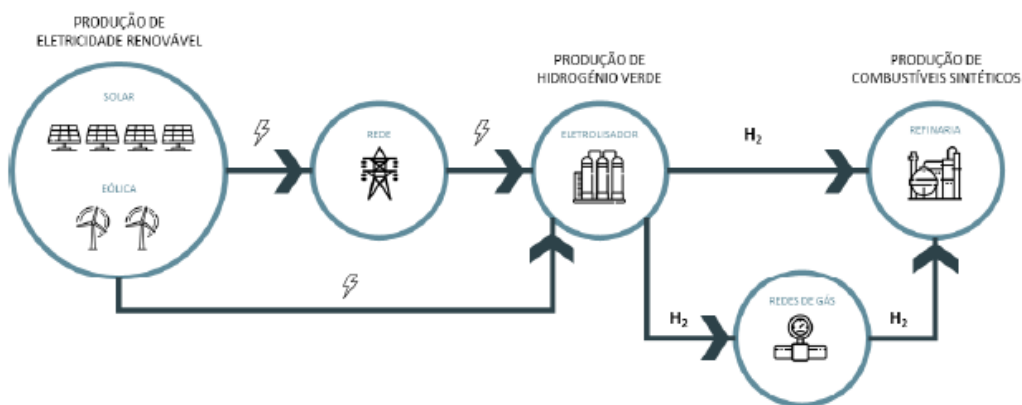


Figura 3.15 Esquema da cadeia de valor P2F. Fonte: (República Portuguesa, 2020)

### 3.3.Estratégias Nacionais para o Hidrogénio de diversos membros da UE

O desenvolvimento de uma economia de hidrogénio ainda está na sua fase inicial sendo que vários países já anunciaram as suas estratégias nacionais para o hidrogénio. Atualmente, para lá da estratégia anunciada pela UE, países como França, Alemanha, Países Baixos, Noruega, Portugal, Espanha e Hungria já anunciaram as suas estratégias nacionais para o hidrogénio. Na UE diversos países estão a preparar as suas estratégias nacionais para serem anunciadas num futuro próximo tais como Áustria, Bélgica, Itália, Polónia, Suécia e Eslováquia. A Alemanha durante a sua presidência do Conselho da UE ajudou a impulsionar a estratégia da UE para o hidrogénio (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany, 2020).

#### 3.3.1. Alemanha

A Alemanha é um dos estados-membros da UE mais empenhados em expandir a utilização do hidrogénio, de modo a construir uma economia de hidrogénio (Mitsui & Co., 2020). De modo a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, especialmente no sector dos transportes, o governo alemão promoveu a utilização de hidrogénio em

células de combustível já no ano de 2006, e em 2020 anunciou a sua estratégia nacional para o hidrogénio (Mitsui & Co., 2020). Na sua estratégia nacional o governo alemão reconhece a importância do hidrogénio como uma fonte limpa, segura e acessível de energia. O hidrogénio verde, produzido através de eletricidade proveniente de fontes renováveis, será utilizado como fonte de energia, de modo a ter um papel relevante na redução de emissões de gases com efeito de estufa na indústria, nos transportes e em outros sectores da economia. Um dos objetivos do governo alemão é ter uma posição de liderança num mercado global de hidrogénio (Mitsui & Co., 2020; Clifford Chance, 2020). Na estratégia nacional alemã, o governo considera o hidrogénio verde como uma fonte de energia que permitirá que a Alemanha cumpra os objetivos de reduzir as suas emissões em concordância com o Acordo de Paris. O hidrogénio verde terá um papel fundamental em diversos campos tais como (Clifford Chance, 2020; Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020):

- **Fonte de energia:** o hidrogénio pode ser utilizado como fonte de energia, nomeadamente como combustível para alimentar células de combustível em veículos, ou para produzir combustíveis sintéticos;
- **Armazenamento de energia:** o hidrogénio pode ser utilizado como um meio de armazenamento de energia, pois permite armazenar energia obtida através de fontes renováveis de forma flexível com base na oferta, ajudando a equilibrar a oferta e a procura de energia;
- **Elemento de ligação entre sectores:** o hidrogénio tem um papel fundamental na ligação entre sectores. Nas áreas onde não é possível utilizar diretamente eletricidade de origem renovável, o hidrogénio verde e as suas cadeias de valor permitem descarbonizar a oferta de energia;
- **Substituto do hidrogénio cinzento em processos industriais e químicos:** atualmente, diversos processos químicos e industriais utilizam hidrogénio, por exemplo, na produção de amónia. Futuramente, o hidrogénio produzido através de combustíveis fósseis, hidrogénio cinzento, utilizado nestes processos será substituído pelo hidrogénio verde. O hidrogénio verde permitirá descarbonizar uma vasta gama de processos industriais, para os quais ainda não existem tecnologias de descarbonização disponíveis.

- **Meio de captura e utilização de carbono:** com a captura de emissões de carbono no setor industrial, estas podem ser combinadas com o hidrogénio produzindo produtos químicos, que podem ser utilizados em diversas cadeias de valor.

A estratégia alemã para o hidrogénio tem como objetivos (Clifford Chance, 2020):

- Aumentar a competitividade do hidrogénio
- Criar um mercado de hidrogénio na Alemanha
- Estabelecer o hidrogénio como uma fonte de energia alternativa
- Tornar o hidrogénio sustentável para utilização em processos industriais
- Desenvolver estruturas de transporte de hidrogénio
- Investimento na pesquisa em tecnologias de hidrogénio
- Estabelecer um mercado internacional de cooperação

Atualmente, a oferta de hidrogénio é praticamente coberta pela utilização de hidrogénio cinzento com cerca de 55 TWh, o hidrogénio verde representa apenas 7% desse valor (3,85TWh) (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020). Esta estratégia espera aumentar a oferta de hidrogénio verde, de modo a ser utilizado para a produção de calor, utilização no sector dos transportes e indústria e ainda para produção de energia elétrica (Clifford Chance, 2020). O governo alemão espera que a oferta de hidrogénio aumente significativamente atingindo valores entre os 90 a 110 TWh até 2030 e aproximadamente 380 TWh até 2050. A capacidade eletrolítica instalada espera-se que seja de 5GW até 2035, e que sejam instalados mais 5GW no mínimo até 2040, tendo um capacidade eletrolítica superior aos 10 GW. A nível de produção doméstica, espera-se que a produção até 2030 seja de 14 TWh. De modo a atingir estes valores, a estratégia alemã enumera uma série de medidas que apoiem o aumento de energia elétrica renovável tais como, introduzir preços para o CO<sub>2</sub> no mercado dos transportes e aquecimento. Outra medida baseia-se na produção de hidrogénio verde ser isenta de impostos e viabilizar um novo modelo de negócios, entre operadores de eletrolisadores e operadores de redes de energia e gás. A produção de hidrogénio verde receberá apoios estatais e condições de investimento favoráveis (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020; Clifford Chance, 2020; Mitsui & Co, 2020).

Na Tabela 3.3 é possível ver um panorama geral da estratégia alemã para o hidrogénio, com as principais políticas, os objetivos principais e as suas metas de produção.

Tabela 3.3 Quadro geral da estratégia alemã para o hidrogénio. Fonte: (Mitsui & Co, 2020).

Major policies		Core objectives of the strategy	Production and procurement forecasts
<b>Budget</b>	<b>Policy details</b>	(1) Green hydrogen will play a central role in the promotion and completion of Germany's energy transition policy	Hydrogen use in Germany
3.6 billion euros	Support for conversion to fuel cells for automobiles, trains, and coastal and inland water transportation vessels (~2023)	• For decarbonization	2030: 90-110 TWh 2050: ~380 TWh
3.4 billion euros	Support for development of hydrogen refueling and recharging infrastructure (~2023)	• As a means of storing renewable energy	Green hydrogen production
1.91 billion euros	Support for hydrogen technology research (e.g., NIP II, a program for innovation in hydrogen and fuel cell technology) (~2026)	• As an energy source	Domestic production 2030: 14 TWh (4,000 hours full-load operation of water electrolyzer, average energy efficiency ratio 70%)
1.1 billion euros	Support for PtL facilities that convert electricity to liquid fuel (~2023)	• As raw material	Facility capacity 2030: 5 GW 2040: 10 GW or more
1 billion euros	Investment in new technologies and large-scale facilities (~2023)	(2) Fulfilling the global responsibility to meet the challenge of reducing CO <sub>2</sub> emissions	Imports 2030: Almost none 2050: Imports will account for the majority of demand
700 million euros	Support for the introduction of fuel cell heaters (~2024)	(3) Building a hydrogen society is a collective task for the EU	
600 million euros	Support for hydrogen research and industrialization through the Real-World Laboratories program (~2023)		
50 million euros	Support for research on the practical application of fuel cell powered airplanes and ships (~2024)		
<b>Total 12.36 billion euros</b>			

### 3.3.2. Países Baixos

No dia 20 de março de 2020, o governo neerlandês anunciou a sua estratégia nacional para o hidrogénio (DNHS). O objetivo do governo neerlandês é apoiar o hidrogénio limpo, baseado no processo de eletrólise utilizando eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis. Na DNHS, o hidrogénio limpo refere-se ao hidrogénio verde obtido através de eletrólise e ao hidrogénio azul, produzido utilizando gás natural com captura de carbono. O governo vê o hidrogénio azul como um complemento ao hidrogénio verde e não como um elemento primário na produção de hidrogénio (Clifford Chance, 2021).

O governo neerlandês considera que o hidrogénio terá um papel importante em diversos sectores tais como:

- Portos e clusters industriais
- Sector da mobilidade
- Áreas urbanizadas
- Sector elétrico
- Sector agrícola

A presente estratégia fixa os seguintes marcos:

- Entre 2019 e 2021 preparar a implementação do hidrogénio, tendo em conta o início de algumas iniciativas e projetos que darão informações para rever objetivos em fases seguintes. No final de 2021, será decidido a estrutura final para uma fase após 2030.
- De 2022 a 2025, de acordo com os resultados da primeira fase, espera-se reduzir os custos do processo de eletrólise e ter uma potência eletrolítica instalada até 2025 até 500MW, em conjunto com o aumento da procura e com a implementação de estruturas regionais e ligações entre diversos clusters.
- No período entre 2026 a 2030, pretende-se a expansão de 3 a 4 GW de capacidade eletrolítica instalada, com ligação a locais de armazenamento e desenvolvimento, e a expansão das infraestruturas apoiadas num aumento da produção de eletricidade através de fontes renováveis.

Na região norte dos Países Baixos, existe colaboração entre o sector público e privado com vista à utilização do hidrogénio para uma transição energética. Segundo o programa europeu Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), o primeiro *Hydrogen Valley* localiza-se no norte dos Países Baixos. Para o desenvolvimento desta área industrial espera-se um investimento total de 9 mil milhões de modo a construir um ecossistema para o hidrogénio até 2030 (Clifford Chance, 2021). *Hydrogen Valley* é assim definido como é uma área geográfica, cidade, região ou área industrial onde várias aplicações de hidrogénio são combinadas e integradas dentro de um ecossistema FCH (Comissão Europeia, 2019).

O desenvolvimento do *Hydrogen Valley* está dividido em duas fases:

- Uma primeira fase, entre 2020 e 2050, onde estão planeados 35 projetos e um investimento de 850 milhões de euros, de modo a aumentar a capacidade de hidrogénio entre os 5 e 10 PJ por ano.
- A segunda fase será entre 2025 e 2030 e prevê 10 projetos a longo prazo para expandir o ecossistema de hidrogénio em 100PJ por ano até 2030. 75% será de hidrogénio verde, o equivalente a 6GW, e 25% de hidrogénio azul (Clifford Chance, 2021).

### **3.3.3. Hungria**

A estratégia nacional húngara para o hidrogénio abre caminho para o estabelecimento de uma economia de hidrogénio, contribuindo para o cumprimento de objetivos relativos à descarbonização e colocando a Hungria com um papel relevante no sector europeu para o hidrogénio. Esta estratégia está focada no hidrogénio verde utilizando eletricidade proveniente de fontes de energias renováveis, com especial foga na energia solar. A curto médio prazo espera-se que, a implementação desta estratégia reduza as emissões de gases com efeito de estufa e que permita estabelecer um mercado de hidrogénio viável com baixo teor de carbono (Hungary's national hydrogen strategy, 2021).

- **Produção descentralizada de hidrogénio livre de carbono e com baixo teor de carbono**

O hidrogénio produzido e utilizado, atualmente, na indústria húngara é considerado hidrogénio cinzento, ou seja, utilizando combustíveis fósseis para produzir hidrogénio através do processo de reforma a vapor. O objetivo passa por substituir este tipo de hidrogénio por outro, com baixo teor de carbono de modo a reduzir as emissões com gases de estufa na indústria e na economia nacional. Até 2030, para atender à procura industrial de hidrogénio, pretende-se utilizar hidrogénio com menor teor de carbono, focando o hidrogénio azul e turquesa. Paralelamente, pretende-se criar condições a longo prazo para a produção em grande volume de hidrogénio, através do processo de eletrólise de modo que se torne a principal fonte de produção de hidrogénio no futuro.

É esperada uma produção de 36 000 ton por ano de hidrogénio verde e hidrogénio com baixo teor de carbono até 2030. Neste período, pretende-se produzir 20 000 ton por ano de hidrogénio com baixo teor de carbono, 16 000 ton por ano de hidrogénio verde e ter uma capacidade eletrolítica instalada de 240 MW (Hungary's national hydrogen strategy, 2021).

- **Descarbonização da indústria**

Primeiramente, para reduzir as emissões de carbono nos processos industriais será utilizado hidrogénio com baixo teor de carbono, sendo mais tarde substituído por hidrogénio verde a longo prazo. Até 2030, espera-se produzir 24 000 ton por ano de hidrogénio verde e hidrogénio com baixo teor de carbono para utilização industrial. Destas 24 000 ton, 20 000 ton são de hidrogénio de baixo teor de carbono e 4 000 ton de

hidrogénio verde permitindo assim evitar cerca de 95 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano. A descarbonização do setor da indústria está apoiada pela criação de dois *Hydrogen Valleys* até ao ano de 2030 (Hungary's national hydrogen strategy, 2021).

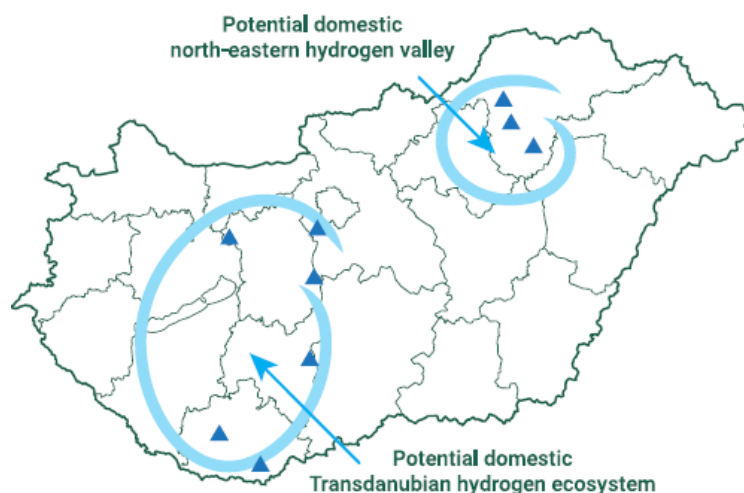


Figura 3.16 Hydrogen Valleys na Hungria. Fonte: (Hungary's national hydrogen strategy, 2021)

O primeiro *Hydrogen Valley* será na região da Transdanubia, nesta região existem refinarias, produção de amónia e outros sectores que utilizam hidrogénio. A central nuclear de Paks pode fornecer quantidades elevadas de eletricidade livre de carbono para estabelecer uma cadeia de valor de hidrogénio. O segundo *Hydrogen Valley* será localizado no noroeste do país, uma região desenvolvida a nível industrial, nomeadamente a indústria química e petroquímica, com um consumo significativo de hidrogénio (Hungary's national hydrogen strategy, 2021).

- **Sector dos transportes**

O objetivo da estratégia neste sector consiste em introduzir a utilização do hidrogénio em paralelo com uma redução gradual da utilização de combustíveis fósseis, com especial foco no tráfego de veículos pesados. Os objetivos secundários consistem na redução da pegada carbónica no tráfego de veículos pesados utilizando hidrogénio, expandir a utilização de hidrogénio para autocarros e construir infraestruturas de abastecimento de hidrogénio.

Na Hungria, a procura de hidrogénio no sector dos transportes irá crescer até às 10 000 ton até 2030. Após um desenvolvimento dos veículos a células de combustível espera-se

que, este valor aumente para as 65 000 ton até 2040 e 212 000 ton até 2050. A nível das frotas de veículos, a estratégia húngara destaca os veículos pesados, como por exemplo, os camiões pesados, veículos de recolha de lixo e autocarros citadinos.

A implementação de uma rede de abastecimento terá um papel fundamental, para satisfazer a procura espera-se que até 2030 existirão 20 postos de abastecimento de hidrogénio, com 2 pontos de abastecimento por estação. Até 2040, com um aumento da procura por hidrogénio, tanto nacional como internacional, este número aumentará (Hungary's national hydrogen strategy, 2021).

- **Infraestrutura de apoio ao gás natural e eletricidade**

O objetivo da estratégia húngara passa por integrar o hidrogénio como apoio, pois permite armazenar energia sazonalmente ajudando a uma transição para neutralidade carbónica utilizando infraestruturas já existentes.

O hidrogénio surge como solução para o armazenamento sazonal de eletricidade, pois utilizará a energia elétrica excedente para a sua produção, através do processo de eletrolise da água.

A rede de gás natural também será afetada com o desenvolvimento de uma economia de hidrogénio. No futuro será introduzido hidrogénio em pequenas quantidades, cerca de 2%, na rede gás natural húngara. Além do desenvolvimento da rede de gás natural nacional pretende-se ainda criar conexões com uma rede europeia de transporte de hidrogénio (Hungary's national hydrogen strategy, 2021).

### **3.3.4. França**

A estratégia francesa para o hidrogénio vê esta fonte de energia livre de carbono como uma área prioritária de investimento devido a diversos fatores, tais como:

- Questões ambientais: o hidrogénio fornece diversas soluções para descarbonizar os setores da indústria e dos transportes.
- Desafios económicos: o hidrogénio oferece a oportunidade de criar um setor industrial próprio e um ecossistema que permite desenvolvimento económico nomeadamente com a criação de postos de trabalho.
- Questões energéticas: reduzir a dependência francesa das importações de hidrocarbonetos.
- Desafio tecnológico: colocar a França num papel de destaque a nível global de desenvolvimento tecnológico (Gouvernement, 2020).

## **Objetivos da estratégia francesa para o hidrogénio**

O desenvolvimento de tecnologias de hidrogénio é visto como uma oportunidade para acelerar a transição energética e criar um sector industrial próprio a nível nacional e igualmente à escala europeia. Esta estratégia define 3 objetivos principais:

- Instalar capacidade eletrolítica suficiente para contribuir para a descarbonização da economia. A capacidade eletrolítica será de 6,5GW para a produção de hidrogénio livre de carbono.
- Desenvolver uma mobilidade limpa com particular foco para os veículos pesados. O objetivo é reduzir mais de 6Mton de CO<sub>2</sub> até 2030, valor este que é equivalente às emissões anuais de CO<sub>2</sub> da cidade de Paris.
- Construir em França um setor industrial que crie postos de trabalho e garanta o desenvolvimento tecnológico. A meta passa por criar 50 a 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos.

As 3 prioridades do governo francês para que se atinja a neutralidade carbónica até ao ano de 2050 são (Gouvernement, 2020):

- Descarbonizar a indústria francesa utilizando hidrogénio obtido através do processo de eletrólise.
- Desenvolver o setor da mobilidade utilizando hidrogénio livre de carbono.
- Apoiar a pesquisa, inovação e desenvolvimento de tecnologias de modo a promover utilizações futuras.

### **Primeira prioridade – Descarbonizar a indústria utilizando hidrogénio eletrolítico**

1. Promover o hidrogénio eletrolítico: a produção de hidrogénio livre de carbono é um elemento-chave para o desenvolvimento de um mercado de hidrogénio. Um aumento do número de unidades de produção permitirá criar uma economia à volta do hidrogénio e reduzir os custos de produção. Dos diferentes processos de produção de hidrogénio, a eletrólise é a mais promissora e com maior potencial, a produção de hidrogénio eletrolítico evoluirá com a implementação de projetos de grandes dimensões e de maior capacidade. O objetivo passa por ter uma capacidade instalada de 6,5 GW até ao ano de 2030. Para desenvolver a produção de hidrogénio a estratégia francesa propõe desenvolver projetos de grande capacidade e passar a produção para a escala industrial de modo a obter lucro.

2. Descarbonizar a indústria substituindo o hidrogénio obtido através de combustíveis fósseis: atualmente, o setor industrial é o principal consumidor de hidrogénio, sendo o objetivo substituir o hidrogénio produzido através de combustíveis fósseis por hidrogénio livre de carbono. Para acelerar a descarbonização da indústria, a estratégia francesa propõem tornar o processo de eletrólise mais confiável, adaptar e desenvolver processos industriais e apoiar estas soluções enquanto o preço do hidrogénio não seja competitivo

### **Segunda prioridade – Desenvolver o setor da mobilidade utilizando hidrogénio livre de carbono**

1. Desenvolver a oferta de veículos pesados a hidrogénio: a tecnologia de hidrogénio oferece capacidade de armazenamento adicional em relação às baterias elétricas o que é mais adequado a veículos pesados.
2. Desenvolver projetos de grande escala: de modo a acelerar a implementação do hidrogénio no setor da mobilidade em França a estratégia propõem implementar projetos territoriais de modo a criar parcerias entre as comunidades e a indústria de modo a criar ecossistemas regionais e utilizar o hidrogénio produzido para a indústria e para a mobilidade

### **Terceira prioridade - Apoiar a pesquisa, inovação e desenvolvimento de tecnologias de modo a promover utilizações futuras**

1. Apoiar a pesquisa e inovação: para acelerar a utilização de tecnologias de hidrogénio, a estratégia francesa propõe continuar o esforço na investigação e desenvolvimento na área do hidrogénio, de modo que a França se mantenha na vanguarda e apoiar a inovação de modo a implementar novas tecnologias a nível industrial.
2. Desenvolver competências: reforçar as competências de modo a desenvolver a utilização do hidrogénio, contratar pessoas qualificadas para trabalhar com veículos, gestores de qualidade e segurança, engenheiros e investigadores. Para fazer face a esta necessidade o Estado irá apoiar a qualificação destas pessoas a

nível profissional e/ou ensino superior em parceria com empresas deste sector (Gouvernement, 2020).

### **3.3.5. Espanha**

Em outubro de 2020, o governo espanhol aprovou o seu projeto nacional para o hidrogénio denominado "Hydrogen Roadmap: a commitment to renewable hydrogen". Esta estratégia tem o seu foco no hidrogénio produzido através de fontes renováveis, o hidrogénio verde, e estabelece os objetivos a atingir até 2030 (Clifford Chance, 2020a; Flanders Investment & Trade, 2021).

Segundo esta estratégia o hidrogénio será utilizado em diversos sectores tais como:

- No sector da indústria: o hidrogénio verde pode ser utilizado como matéria-prima em processos industriais e como fonte de energia limpa para processos que requerem utilização de calor e onde a eletrificação não é solução. Atualmente, a Espanha consome cerca de 500 000 ton de hidrogénio por ano, sendo que 95% deste valor é de hidrogénio cinzento, na indústria química e em refinarias.
- No sector dos transportes: o hidrogénio pode ser utilizado em células de combustível que possui vantagens em relação à utilização de baterias elétricas, nomeadamente terem um peso menor, tempos de abastecimento mais curtos e maior autonomia.
- No sector dos serviços e residencial: o hidrogénio verde pode ser visto, a longo prazo como uma alternativa ao gás natural.

### **Objetivos da estratégia espanhola para 2030**

Na produção de hidrogénio renovável pretende-se instalar pelo menos 4GW de capacidade eletrolítica com uma capacidade instalada entre 300MW e 600MW até 2024. No sector da indústria espera-se que 25% do hidrogénio total consumido seja de origem renovável. No sector dos transportes pretende-se que a cota de energias renováveis no consumo final de energia neste sector seja de pelo menos 28% em 2030.

Neste setor pretende-se atingir até 2030 certas metas nomeadamente:

- uma frota de pelo menos 150 a 200 autocarros movidos a células de combustível alimentadas a hidrogénio;
- pelo menos 5000 a 7500 veículos ligeiros e pesados movidos a células de combustível para o transporte de bens;

- uma rede de pelo menos 100 a 150 estações de hidrogénio com localizações acessíveis e distanciadas no máximo em 250 km.
- utilizar comboios movidos a hidrogénio de maneira contínua em duas rotas comerciais de média e longa distância em linhas que atualmente não são eletrificadas;
- introdução de maquinaria industrial que utiliza células de combustível e pontos de abastecimento nos principais portos e aeroportos.

No sector elétrico, a nível do armazenamento de energia, prevê-se que a implementação de projetos de hidrogénio até 2030 serão fundamentais para armazenar eletricidade e/ou utilizar o excedente de energia renovável (Clifford Chance, 2020a; Flanders Investment & Trade, 2021).

### **Passos principais para atingir as metas da estratégia para o hidrogénio**

- Garantias de origem: o desenvolvimento de um sistema de garantias de origem relativos ao hidrogénio renovável será fundamental para o estabelecimento de preços adequados.
- *Hydrogen valleys*: a criação de *Hydrogen valleys* que concentrarão a produção, a transformação e o consumo de hidrogénio é um objetivo prioritário.
- Transportes: promover a utilização de hidrogénio nos transportes públicos e nos serviços urbanos.

O cumprimento das metas estabelecidas para 2030 na estratégia para o hidrogénio permitirá assim reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 4,6 Mton entre 2020 e 2030 (Clifford Chance, 2020a).

### **3.4. Projetos de Hidrogénio em Portugal**

Após a retificação do Acordo de Paris a UE, de acordo com o Pacto Ecológico Europeu, definiu a descarbonização como uma estratégia para atingir zero emissões de gases com efeito de estufa até 2050, sendo o hidrogénio visto como uma peça integrante e fundamental desta estratégia. Portugal e vários estados-membros, em sintonia com a UE, incluíram o hidrogénio nos seus planos nacionais para a energia sendo que, alguns já adotaram estratégias nacionais. Dentro desta estratégia e de modo a implementar uma

economia de Hidrogénio surgiram projetos em diversas cadeias de valor, e em todas as suas fases: produção, armazenamento, distribuição e armazenamento e utilização final.

- **H2Sines:**

Portugal pretende criar um cluster industrial em torno do hidrogénio em Sines com 6 projetos sendo que um deles, H2Sines, é candidato a Projeto Importante de Interesse Europeu Comum para o Hidrogénio (IPCEI). Este projeto industrial de grandes dimensões é considerado fundamental para impulsionar a economia de hidrogénio em Portugal visto que, incorpora todas as fases da cadeia de valor de hidrogénio. A implementação deste processo baseia-se numa parceria entre Portugal e os Países Baixos, tendo sido assinado um memorando entre os países para o hidrogénio verde. Este memorando prevê o desenvolvimento de uma cadeia de valor estratégica de exportação-importação, com produção e transporte de hidrogénio verde de Portugal para os Países baixos, considerando como peças fundamentais o porto de Sines e de Roterdão. O porto de Sines possui características que o classificam como um local privilegiado para a indústria de hidrogénio, pois possui um conjunto de infraestruturas já existentes, está localizado na costa atlântica e possui um porto de águas profundas. As infraestruturas de transporte já existentes, a ligação à rede de transporte de gás natural e o facto de estar situado numa zona industrial (refinaria), com futuros consumidores de hidrogénio, disponibilidade de terrenos na zona envolvente, e até no mar para implementação de tecnologias de origem renováveis, fazem deste um local privilegiado para a indústria do hidrogénio (República Portuguesa, 2020).



Figura 3.17 Localização estratégica de Sines. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

Este projeto prevê a produção de hidrogénio verde com uma capacidade eletrolítica de pelo menos 1GW até ao ano de 2030, utilizando energia elétrica produzida através da energia solar e eólica.

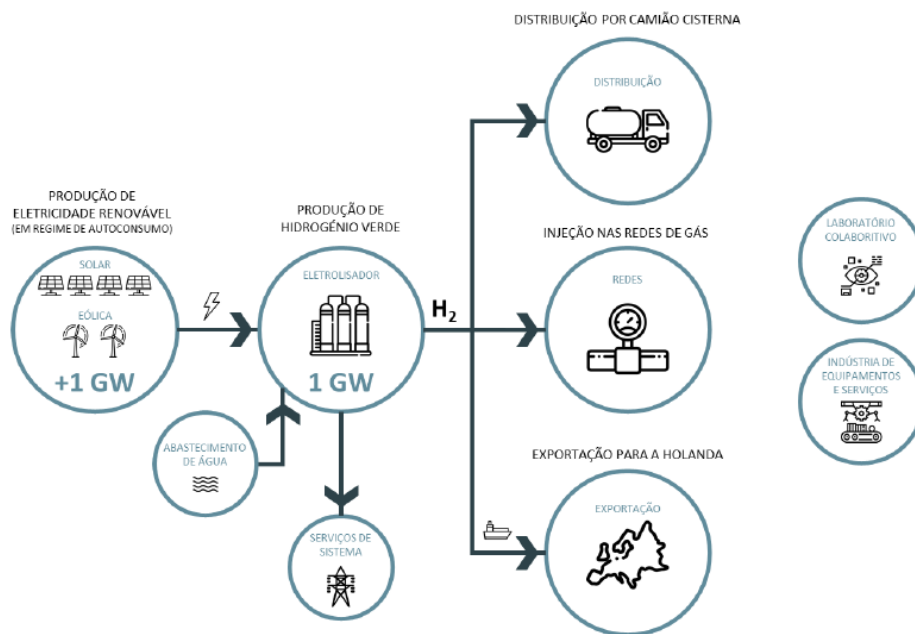


Figura 3.18 Composição do projeto de produção de hidrogénio verde á escala industrial em Sines. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

O hidrogénio verde produzido em Sines será injetado diretamente na rede de gás natural e na rede elétrica, distribuído através de camiões-cisterna para diversos pontos de consumo e exportado através do porto de Sines para o porto de Roterdão (nos Países Baixos), ao abrigo do memorando assinado entre os dois países. Inicialmente, espera-se que o hidrogénio produzido seja utilizado na totalidade em Portugal, e à medida que a capacidade de produção aumenta, a exportação irá ganhar mais preponderância.

A exportação de hidrogénio verde para os Países Baixos servirá como alavanca para outras parecerias com países vizinhos, contribuindo para a economia de hidrogénio verde na UE, e consolidando assim, a estratégia europeia para atingir a neutralidade carbónica.

É esperado que este projeto sirva como impulsionador para o desenvolvimento da produção de hidrogénio verde em Portugal, e que contribuirá para a descarbonização da nossa economia. O desenvolvimento do projeto em Sines permitirá a instalação e operação de uma unidade de produção de eletrolisadores, de modo a garantir capacidade de produção nacional e, posteriormente, para exportação para outros mercados (República Portuguesa, 2020).

Tabela 3.4 Estrutura preliminar para a execução do projeto de Sines. Fonte: (República Portuguesa, 2020).

	ÁREAS DE INTERESSE	OBJETIVO
CADEIA DE VALOR	PRODUÇÃO DEDICADA DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL	Produção de energia elétrica renovável para alimentar a unidade de produção de H <sub>2</sub> . Inclui o desenvolvimento, construção e operação da central que terá uma capacidade instalada superior a 1 GW, dimensionada de acordo com as necessidades da unidade de produção de H <sub>2</sub> e otimizada para maximizar a produção ao mais baixo custo possível.
	PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO	Produção de H <sub>2</sub> verde. Inclui o desenvolvimento, construção e operação da unidade de produção de H <sub>2</sub> que terá uma capacidade instalada de 1 GW.
	INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE, DISTRIBUIÇÃO E ARMAZENAMENTO	Construção, supervisão e operação de infraestruturas para o transporte, distribuição e armazenamento de H <sub>2</sub> , podendo incluir o aproveitamento e reconversão de ativos de gás natural para H <sub>2</sub> .
	EXPORTAÇÃO	Construção, supervisão e operação de infraestruturas associadas à logística de exportação de H <sub>2</sub> , que inclui a infraestrutura necessária para a conversão de H <sub>2</sub> para o transporte por via marítima (ex.: H <sub>2</sub> liquefeito ou comprimido, amónia, LOHC <sup>24</sup> , entre outros).
OUTRAS ÁREAS	MERCADO NACIONAL	Dinamização de um mercado competitivo, nível nacional e europeu, para a comercialização de H <sub>2</sub> de forma a dar resposta às necessidades dos consumidores.
	PRODUÇÃO DOS ELETROLISADORES	Instalação e operação de uma unidade industrial de produção de eletrolisadores para garantir capacidade de produção suficiente para suprir as necessidades do projeto e, numa fase posterior, exportar equipamentos para outros mercados.
	LABORATÓRIO COLABORATIVO	Implementação de um projeto de um laboratório colaborativo capaz de promover a inovação, abordar as áreas relevantes da cadeia de valor e promover a criação de emprego qualificado.

Inicialmente, este projeto foi desenhado para ser executado sob a forma de um consórcio que contaria com várias empresas: EDP, REN, GALP, Vestas, Engie e Martifer. Durante o ano de 2021, o consórcio fragmentou-se com a saída da EDP, REN, GALP, mas apesar da saída destas 3 empresas, o projeto irá continuar mantendo-se como parceiros a Vestas, Engie e Martifer, sendo que a elétrica francesa irá liderar o consórcio. Apesar desta alteração no consórcio original, os acordos internacionais com os Países Baixos e com o porto de Roterdão irão manter-se. A EDP saiu do grupo para investir em outros projetos, mais especificamente para liderar um consórcio de investigação sobre a produção offshore de hidrogénio verde denominado “Behyond”.

Este consórcio contaria com a EDP, a TechnipFMC e outros parceiros, de modo a avaliar a viabilidade técnica e económica para a produção de hidrogénio verde utilizando energia eólica offshore. A GALP retirou-se do consórcio pois considera que o hidrogénio produzido deve ser utilizado em Sines e não exportado para os Países Baixos. A GALP pretende transformar a sua refinaria em Sines num centro de energia verde, avançando com um projeto próprio de 100MW até 2025, com o potencial de expansão para 0,6-1GW (SAPO, 2021; 2021a; 2021b; 2021c; 2021d; República Portuguesa, 2020).

- **Green Pipeline Project:**

A GALP pretende desenvolver um projeto piloto no setor da energia, para desenvolver a injeção de hidrogénio verde na rede de distribuição de gás natural, a partir de energia elétrica produzida através de fontes renováveis. Este estudo pretende avaliar o impacto da injeção de Hidrogénio na rede de distribuição e nos equipamentos de queima. Além do mais, este projeto visa desenvolver a injeção na rede de hidrogénio verde produzido através de um eletrolisador que utiliza energia elétrica produzida por painéis fotovoltaicos. Devido à localização do produtor e da configuração da rede de gás natural, o projeto piloto terá cerca de 80 instalações com características maioritariamente residenciais. O projeto encontra-se em fase de licenciamento e vai testar a injeção de hidrogénio verde numa pequena rede de distribuição, com abastecimento na zona do Seixal (República Portuguesa, 2020; SAPO, 2020a).

- **Hychem:**

A Hychem anunciou um projeto que terá um investimento de 5 milhões de euros na construção de uma central elétrica, que no espaço de 18 meses crescerá de 2MW para 10 MW, e cuja energia elétrica será utilizada para produzir hidrogénio renovável (SAPO, 2021e).

- **Hyperion:**

A Hyperion pretende produzir hidrogénio verde em Setúbal e no Alentejo, com o objetivo de exportar para Espanha ou injetar na rede de gás natural. A maior central está projetada para ser instalada na localidade do Alandroal, com uma capacidade instalada que poderá ir dos 100MW até aos 250MW de eletrolisadores. Para produzir este hidrogénio verde através de eletricidade proveniente de fontes renováveis, pretende-se contruir uma central solar com 250MW e uma central eólica de 100MW de capacidade. O início de construção está previsto para 2022/2023 e a entrada em operação prevista para 2023/2024. A Hyperion tem outro projeto de dimensão, mais reduzida em comparação com o projetado para o Alentejo, para a construção de uma unidade de 19MW de capacidade eletrolítica, e com capacidade de produção de cerca de mil toneladas ano de hidrogénio verde. Para alimentar os eletrolisadores de energia elétrica está prevista a construção de um central solar de 15MW (AICEP, 2021).

- **H2Enable-The Hydrogen Way for Our Chemical Future:**

A Bondalti, empresa química portuguesa, pretende produzir hidrogénio no seu complexo químico em Estarreja, com aplicação de um projeto denominado “H2Enable-The Hydrogen Way for Our Chemical Future”. Este projeto representará um investimento total de 2,4 mil milhões de euros com desenvolvimento e implementação até ao ano de 2040. Este projeto incluirá a produção de energia fotovoltaica, a produção do hidrogénio verde para venda direta no mercado e para o fabrico de amoníaco verde (BONDALTI, 2020; SAPO, 2020b; Ambiente magazine, 2021).

- **Green Gas:**

A Fusion Fuel pretende produzir hidrogénio verde utilizando uma tecnologia desenvolvida pelos próprios, que corresponde à utilização da concentração solar fotovoltaica, em simultâneo com o calor dissipado por esta tecnologia, de modo a proceder à eletrolise da água de forma descentralizada. Está, assim, prevista a construção

de uma central solar de produção de hidrogénio utilizando a concentração solar neste projeto denominado “GreenGas” em Évora. Este projeto será dividido em duas fases, uma primeira que consiste na instalação de 15 concentradores solares denominados “Hevo-Solar” na Nossa Senhora da Tourega, para a produção de hidrogénio verde que posteriormente será convertido em eletricidade através de células de combustível. A segunda fase consiste na instalação de 40 unidades Hevo-Solar” junto ao parque industrial da cidade de Évora, em que se pretende produzir hidrogénio verde para injetar na rede de gás natural, e ainda para vender em recipientes para uso industrial. A Fusion Fuel em parceria com a Galp espera, através de um projeto piloto, testar a injeção de hidrogénio verde na rede. Este hidrogénio é produzido pela empresa através da eletrólise da água na sua unidade industrial, no Sabugo em Almargem do Bispo, com base nos concentradores solares (FUSION-FUEL, 2021; SAPO, 2021f; Jornal de Negócios, 2021; ODigital, 2021).

- **UTIS-Ultimate Technology to Industrial Savings:**

No sector da indústria surgirá um projeto desenvolvido pela UTIS-Ultimate Technology to Industrial Savings, que consiste na otimização da combustão continua em unidades industriais. Esta otimização baseia-se em injetar quantidades reduzidas de hidrogénio e oxigénio no processo de combustão, sendo o hidrogénio produzido localmente (1<sup>a</sup> 10m<sup>3</sup>/h) em unidades industriais adaptadas para a utilização de várias fontes de energia (UTiS 2021; República Portuguesa, 2020).

- **CaetanoBus:**

Em Portugal, de modo descarbonizar o sector dos transportes, têm sido feitos investimentos e os primeiros projetos começaram a surgir. Ao nível da mobilidade, o Hidrogénio surgiu com o projeto desenvolvido pela CaetanoBus, para o fabrico de autocarros a hidrogénio em Portugal. O autocarro desenvolvido pela CaetanoBus (H2.CityGold) foi feito em parceria com a marca Toyota, e está equipada com uma célula de combustível Toyota de 60kW, a mesma utilizada no seu outro modelo a hidrogénio Mirai, tendo uma autonomia de 400 km com apenas um abastecimento. Este autocarro possui sensores de fuga e colisão que, aquando da sua ativação corta o fornecimento dos tanques sendo que, estes encontram-se colocados no tejadilho de modo a otimizar o espaço no interior do veículo, aumentando a sua capacidade ao nível de passageiros até aos 64 (República Portuguesa, 2020; CaetanoBus, 2021).

- **DRHYVE:**

Em 2021, foi instalada a primeira estação de abastecimento portátil para veículos a hidrogénio em Cascais. Esta estação foi desenvolvida e contruída pela PRF Gas Solutions e tem o nome de “DRHYVE”, permitindo abastecer veículos ligeiros e pesados a 350bar, como os autocarros da CaetanoBus, e existindo ainda a possibilidade do posto conseguir abastecer mais veículos ligeiros a 700bar. Esta empresa tem como objetivo implementar mais estações de abastecimento a hidrogénio sendo que, já esta a ser projetado uma segunda estação “DRHYVE” com produção própria (PRF, 2021; Diário da República, 2021).



Figura 3.19 Primeira estação de abastecimento de hidrogénio em Portugal. Fonte: (PRF, 2021).

- **Hydrogen Refillin Station:**

Em Vila Nova de Gaia está programada a instalação de uma estação de acordo com um projeto denominado “Hydrogen Refillin Station”, que foi sujeito a concurso público para a concessão da construção e exploração, conforme DR II serie N°217 (SAPO, 2020e; Diário da República, 2020a; Diário da República, 2020b).

- **Power-to-Mobility:**

Segundo a estratégia nacional para o hidrogénio, estão a concurso dois projetos na cadeia de valor Power-to-Mobility para a produção de hidrogénio verde e abastecimento de estações de abastecimento de veículos. Um primeiro projeto que consiste na conceção, desenvolvimento e implementação de uma estação de reabastecimento de hidrogénio num centro logístico para abastecer veículos ligeiros e pesados. Esta estação produzirá

hidrogénio verde com eletricidade proveniente de um parque solar, sendo que a instalação de produção de hidrogénio terá uma capacidade de produção de 300kg de hidrogénio por dia. O segundo projeto ocorrerá nos mesmos moldes do projeto anterior, mas para reabastecer com hidrogénio navios de cruzeiro que operam no rio Douro, recorrendo igualmente a energia elétrica de um parque solar para a produção de hidrogénio. A capacidade para a produção de hidrogénio será de 1000kg de hidrogénio por dia. (República Portuguesa, 2020). Até ao ano de 2030, Portugal prevê ter instalados 50 a 100 postos de abastecimento a hidrogénio (SAPO,2020f).

- **Power-to-Power:**

Na cadeia de valor Power-to-Power surgem dois projetos, que pretendem produzir e introduzir hidrogénio verde na central térmica de ciclo combinado do Ribatejo e na central de ciclo combinado da Tapada do Outeiro.

O investimento feito na central termoelétrica do Ribatejo terá um investimento previsto de 12,6 milhões de euros por parte da EDP. Este projeto piloto enquadrado num consórcio constituído pela EDP, através da EDP Produção e do NEW R&D Centre for New Energy Technologies, prevê a produção de hidrogénio com armazenamento, utilizando um eletrolisador com capacidade instalada de 1MW e 12MWh de capacidade de armazenamento. O hidrogénio será produzido utilizando um eletrolisador PEM e armazenado na sua forma comprimida a 300bar, para ser posteriormente queimado na turbina juntamente com o gás natural e, por fim produzir eletricidade (EDP, 2019; SAPO, 2020c; República Portuguesa, 2020).

O projeto da central termoelétrica da Tapada do Outeiro é desenvolvido pela Turbogás e a data prevista para o arranque é 2024. Este projeto pretende produzir localmente o hidrogénio verde e utilizá-lo em co-combustão com o gás natural. Para tal recorre, as três turbinas de gás, que integram cada uma das três unidades do ciclo combinado, numa proporção de 5% de hidrogénio em volume. A energia elétrica utilizada pelo eletrolisador de 15MW para a produção de hidrogénio será inicialmente de origem renovável provida da rede nacional com certificados de origem e garantia (SAPO, 2020d; República Portuguesa, 2020).



Figura 3.20 Central termoelétrica da Tapada do Outeiro. Fonte: (SAPO, 2020d).

- **Power-to-Synfuel:**

Na cadeia de valor Power-to-Synfuel existe um projeto com um investimento previsto de 90 milhões de euros, por parte da Solabelt e a Akuo Energy, destinado à produção de hidrocarbonetos líquidos, que utiliza eletricidade gerada através da energia solar para produzir hidrogénio verde. A produção de hidrogénio é feita através da eletrólise com células de combustível PEM e com captura de carbono, para utilizar como recurso para sintetizar um combustível alternativo, com características muito equivalentes às do combustível utilizado na aviação, produzindo cerca de 10 mil toneladas por ano (República Portuguesa, 2020; CMS, 2020).

No sector automóvel, Portugal está a avaliar os investimentos das marcas no mercado das células de combustível, com o surgimento dos veículos comerciais vendidos. O grupo Hyundai Motor planeia desenvolver versões com células de combustível de todos os seus veículos até 2028, e a Toyota já lançou a segunda versão do Mirai. A Toyota afirma que já é mais barato contruir um veículo elétrico com célula de combustível, do que um veículo elétrico a baterias. Outras marcas como BMW, Audi, Opel, Citroen, Renault, Honda com o Clarity já têm modelos novos a hidrogénio ou versões de modelos já existentes, mas a hidrogénio. Em Portugal, como foi visto, existe apenas um posto de abastecimento, mas com o aumento de número de postos, a sua cota de mercado irá certamente aumentar (CNBC, Setembro 2021; TOYOTA, 2021; BMW, 2019; H2, 2021; HONDA,2021; Audi, 2021; Renault Group, 2021; Razão Automóvel, 2021a)

### 3.5. Projetos de Hidrogénio em países da UE

A nível europeu têm sido criados projetos e iniciativas conjuntas de modo a atingir a neutralidade carbónica até 2050, utilizando o hidrogénio como veículo para atingir esse fim.

Por toda a Europa têm surgido projetos relacionados com o hidrogénio, projetos estes muitas vezes em forma de consórcio e que, mostram a cooperação entre as empresas e demonstra a vontade de utilizar o hidrogénio como solução para atingir a neutralidade carbónica.

- **Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH 2JU):**

O programa “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking” (FCH 2JU) é constituído por uma parceria público-privada entre a comissão europeia, membros da indústria europeia e organizações de investigação, de modo a apoiar a pesquisa, o desenvolvimento e implementação de células de combustível e de tecnologias relacionadas com o hidrogénio na Europa (Cebolla and Navas, 2019; Comissão Europeia, 2021c).

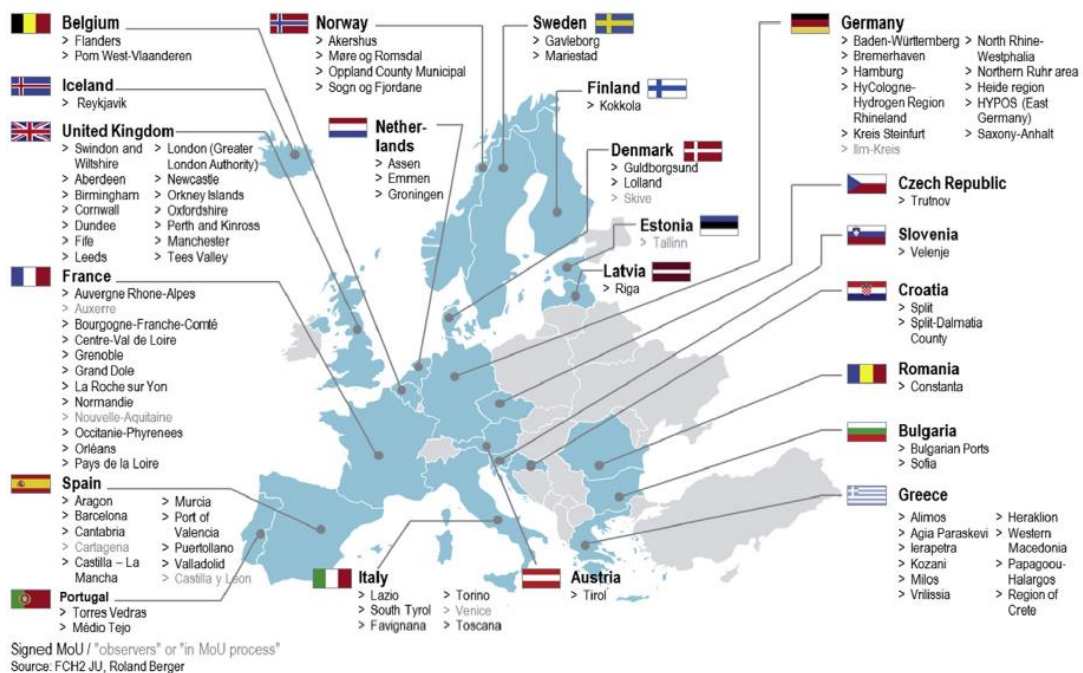


Figura 3.21 Regiões /cidade envolvidas na iniciativa “FCH 2JU. Fonte: (Cebolla and Navas, 2019)

- **CaetanoBus:**

A empresa de transportes públicos ESWE VERKEHR, in Wisenbaden na Alemanha, encomendou 10 autocarros elétricos movidos a células de combustível à empresa portuguesa CaetanoBus, sendo o prazo final da entrega para novembro de 2021 (Fuel Cells Bulletin, 2021). A empresa CaetanoBus vai também entregar durante o ano de 2021 os 8 autocarros elétricos movidos a células de combustível, para o operador de transportes metropolitanos de Barcelona. O desenvolvimento deste programa foi apoiado pelo “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking” (Fuel Cells Bulletin, 2020; Fuel Cell Electric Buses, 2021).

- **Solaris Bus&Coach:**

A construtora de autocarros elétricos movidos a células de combustível “Solaris Bus&Coach” irá entregar 15 autocarros à empresa de transportes “Regionalverkehr Köln” em Colonia (Alemanha) sendo que, os autocarros serão entregues na sua totalidade até dezembro de 2021. Existe ainda outra entrega de 12 autocarros na cidade de Bolzano, na Itália (Fuel Cells Bulletin, 2021b; Fuel Cells Bulletin, 2021c).

- **HyTrucks:**

Um consorcio “HyTrucks” formado pela Air Liquide, Dats24 e o porto de Antuérpia tem o objetivo de colocar 300 camiões movidos a hidrogénio na Bélgica. Este projeto pretende também investir na produção de hidrogénio verde e nas suas infraestruturas de abastecimento. A introdução dos camiões deve ser feita junto do porto de Antuérpia que é um grande centro logístico (Fuel Cells Bulletin, 2021d)

- **SmartQuart:**

A companhia francesa Elogen foi selecionada pela empresa alemã E.ON para fornecer um eletrolisador PEM de 1MW, integrado com transformador e uma unidade de compressão para o projeto alemão “SmartQuart”. A capacidade de produção do eletrolisador será de 200 Nm<sup>3</sup>/h de hidrogénio (Fuel Cells Bulletin, 2021e).

- **Digital H2 Green Project:**

A companhia espanhola H2B2 está a produzir eletrolisadores PEM para o projeto “Digital H2 Green Project” que está a ser implantado no porto de Málaga em Espanha. Este projeto

está organizado na forma de consórcio e engloba 13 organizações, pretendendo implementar rede de hidrogénio no porto. O hidrogénio verde será produzido através de eletrólise e surgirão postos de abastecimento do mesmo, para barcos e veículos terrestres no porto (Fuel Cells Bulletin, 2021f; H2B2,2021).

- **Shell:**

Um eletrolisador PEM começou a operar no parque de energia e química da empresa SHELL, localizado em Colónia na Alemanha. O eletrolisador de 10MW irá utilizar eletricidade de fontes renováveis para produzir 1300 toneladas por ano de hidrogénio verde. Inicialmente irá produzir combustíveis com baixa intensidade carbónica e para ajudar a descarbonizar outras indústrias. Está planeada a expansão da capacidade eletrolítica de 10MW para 100MW, aumentando assim a produção de hidrogénio verde para 15 000 toneladas por ano, e as operações estão agendadas para começar em 2024 (Shell, 2021; Refhyne, 2021; Shell 2021a; Fuel Cells and Hydrogen, 2021).

- **Green Hysland:**

Nas Ilhas Baleares em Espanha existe um projeto denominado “Green Hysland” pertencente ao programa “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking” que prevê produzir, utilizando energia solar, e distribuir pelo menos 300 toneladas por ano de hidrogénio verde na ilha de Maiorca. Este projeto vai decorrer de 2021 a 2025, e faz parte do programa de estratégia espanhol para o hidrogénio. O hidrogénio verde será utilizado para diversos fins tais como reabastecer uma frota e autocarros elétricos que utilizam células de combustível, produzir eletricidade e calor pra edifícios comerciais e públicos, fornecer energia adicional pra as operações no porto e criar uma estação de abastecimento de hidrogénio para veículos ligeiros. Este projeto inclusive injetará hidrogénio verde nos gasodutos de gás natural já existente na ilha. Este projeto está organizado na forma de consórcio que engloba 30 empresas de vários setores (Fuel Cells and Hydrogen, 2021; Spain, Hydrogen Roadmap, 2020).

- **Djewels:**

Nos Países Baixos foi criado um consórcio que engloba as empresas Nouryon, a Gasuniene e mais 4 parceiros denominado “Djewels”, para produzir hidrogénio verde em Delfzijl, a norte na provincia de Groningen. O projecto “Djewels” (Delfzijl Joint dEvelopment of green Water Eletrolysis at Large Scale) irá desenvolver elétrodos com

maior performance, mais eficientes e de alta densidade de corrente para eletrolisadores alcalinos. Outro parceiro deste projeto é a McPhy, que irá fornecer os eletrolisadores alcalinos e que irão converter a energia elétrica de fontes renováveis em 3000 toneladas de hidrogénio verde por ano. A empresa BioMCN irá combinar o hidrogénio renovável com dióxido de carbono de modo a produzir metanol renovável.

O programa “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking” irá financiar este projeto que será executado até ao fim do ano de 2025, com a implementação de um eletrolisador de 20MW no parque industrial de Delfzijl. Estão a ser estudadas opções que podem aumentar a capacidade eletrolítica de 20MW para 60MW, para produzir Jet Fuel no futuro (Comissão Europeia, 2021c; Fuel Cells Bulletin 2020a).

- **Get H2:**

Sete empresas do programa alemão “Get H2” tencionam criar uma estrutura transfronteiriça de hidrogénio verde desde a produção, armazenamento e utilização. Este consórcio pretende ligar a cidade de Lingen à cidade de Gelsenkirchen, e ainda ligar a fronteira neerlandesa a Salzgitter, entre 2024 e 2030. O programa “Get H2” é constituído pelas empresas BP, Evonik, Nowega, OGE, RWE, Salzgitter Flachthahl e Thyssengas. A empresa RWE produz hidrogénio verde utilizando a eletrólise na sua fábrica, em Lingen, que a partir de 2024 irá fornecer à refinaria da BP em Gelsenkirchen. O transporte do hidrogénio será feito através de gasodutos de gás natural já existentes. Em 2025, está planeado a extensão da ligação à fronteira neerlandesa, e em 2030 a rede será alargada até Salzgitter para ser utilizado na indústria do aço (GETH2, 2021; Fuel Cells Bulletin, 2021g).

- **Linde Engineering:**

A empresa alemã Linde Engineering garantiu um contrato para contruir um centro de produção de hidrogénio eletrolítico e uma estação de reabastecimento de hidrogénio, em parceria com a empresa de resíduos urbanos AGR na cidade de Herten, na Alemanha. Este projeto inclui a utilização de eletrolisadores PEM, compressores, tanques de armazenamento e uma estação de abastecimento. Os eletrolisadores irão produzir cerca de 44 toneladas por ano de hidrogénio, e a eletricidade será fornecida pela central de resíduos da AGR. A estação de abastecimento irá fornecer hidrogénio a 350 e 700bar, abastecendo camiões e veículo ligeiros elétricos que com células de combustível. O principal objetivo do projeto é servir a frota da AGR e a comunidade, e vender o

hidrogénio para empreendimentos comerciais e industriais (Linde Engineering, 2021; Fuel Cells Bulletin, 2021h).

- **H2RES:**

A empresa dinamarquesa Ørsted iniciou o projeto “H2RES” em Copenhaga. Este projeto irá utilizar a energia elétrica produzida por um parque eólico offshore para produzir hidrogénio renovável. O projeto “H2RES” de hidrogénio renovável, em combinação com o parque eólico offshore, espera produzir hidrogénio no final de 2021. A central eletrolítica de 2MW, com eletrolisadores fornecidos pela empresa GHS, será alimentada por duas turbinas eólicas offshore de 3,6MW produzindo cerca de 1000kg por dia de hidrogénio verde (Fuel Cells Bulletin, 2021i; Fuel Cells Bulletin, 2021j).

- **Green HydrogenV @ Blue Danube:**

A empresa austríaca Verbund lidera o projeto “Green HydrogenV @ Blue Danube” que pretende produzir, transportar e utilizar hidrogénio verde para aplicação no setor da indústria e da mobilidade. A Verbund tem desenvolvido este projeto em conjunto com parceiros tecnológicos e compradores de hidrogénio verde. Entre os parceiros surgem a empresa ElringKlinger, Hydrogenious, DBSchenker, OBB, Siemens, Danube Commission e a Teco 2030. O projeto consiste na produção e utilização de hidrogénio verde em território austríaco e na região da Baviera, na Alemanha. O hidrogénio será transportado através do rio Danúbio, para os consumidores de hidrogénio nestas regiões (Hydrogenious, 2021; TECO 2021; Fuel Cells Bulletin, 2020b).

- **Iberdrola:**

A empresa espanhola Iberdrola criou um projeto em parceria com uma empresa de fertilizantes, a Fertiberia em Puertollano para a produção de hidrogénio verde, para a produção de amónia utilizada nos fertilizantes. Este projeto pretende instalar eletrolisadores PEM com a capacidade de 20MW sendo que, o fornecedor destes eletrolisadores é a empresa norueguesa Nel. As instalações em Puertollano incorporarão uma central fotovoltaica de 100MW, baterias com capacidade de armazenamento de 20MWh e capacidade eletrolítica de 20MW (Nel, 2021; Iberdrola, 2021b; Iberdrola, 2020; Fuel Cells Bulletin, 2020c; Fuel Cells Bulletin, 2021k).

- **Nel and Lhyfe Labs:**

A empresa norueguesa Nel de fornecimento de eletrolisadores fechou acordo com a empresa Lhyfe Labs em Nantes (França), para o fornecimento de 60MW de capacidade eletrolítica. Os eletrolisadores alcalinos irão ser utilizados para produzir hidrogénio verde para uma frota de autocarros em Bouin (França) (Fuel Cells Bulletin, 2021l)

- **GreenLabe Skive:**

As empresas dinamarquesas GHS e Eurowind Energy assinaram um acordo com a companhia de produção de hidrogénio francesa Lhyfe, para a disponibilização de 24MW de capacidade eletrolítica ao parque industrial GreenLabe Skive na Dinamarca. O projeto de grande escala irá produzir e armazenar hidrogénio verde utilizando energia solar e eólica produzida no parque industrial GreenLab Skive, para posteriormente ser processado para a produção de metanol verde e utilizado no setor dos transportes. Numa primeira fase, a central eletrolítica terá uma capacidade de 12MW instalada até ao final de 2022 sendo que, nos 2 primeiros anos a empresa GHS irá operar a central e posteriormente a Eurowind Energy e a Lhyfe (Green Hydrogen Systems, 2021m; Fuel Cells Bulletin 2021n).

- **AquaVentus:**

O consórcio alemão “AquaVentus”, atualmente constituído por 27 empresas e organizações, pretende implementar as estratégias europeias e alemãs para a produção de hidrogénio verde, utilizando energia renovável offshore no mar do Norte. Este projeto pretende instalar 10GW de capacidade eólica offshore no mar do Norte até 2035. O hidrogénio será produzido offshore e posteriormente transportado para terra. Este projeto inclui vários subprojectos que incluem o desenvolvimento de turbinas eólicas offshore com produção integrada de hidrogénio, parque offshore de grande escala de produção de hidrogénio, construção de condutas de hidrogénio, infraestruturas portuárias, entre outros. Entre os fundadores deste consórcio destacam-se a Deutsche Shell, Fraunhofer IFAM, E.ON, MHI Vestas Offshore Wind, Gasunie, RWE Renewables, Siemens, Gamesa Renewable Energy, Siemens Gas and Power e a Vattenfall (Fuel Cells Bulletin, 2021o).

- **NorthH2:**

O projeto europeu “NorthH2”, lançado em fevereiro de 2020 pela Gausine, pelo porto de Groningen e pela Shell Nederland, nos Países Baixos, conta com mais dois novos parceiros, a alemã RWE e a norueguesa Equinor. Este consórcio pretende estabelecer um sistema de produção eólica offshore, eletrolisadores, sistemas de armazenamento e condutas de modo a converter a energia elétrica produzida offshore em hidrogénio verde, e armazenar e transportar o hidrogénio para zonas industriais no noroeste europeu. O objetivo passa por ter uma capacidade de produção de 4GW até 2030 e de 10GW até 2040, para produzir 1 milhão de toneladas de hidrogénio verde por ano (NorthH2, 2021; Fuel Cells Bulletin, 2021p).

- **Gamesa:**

A Siemens Gamesa pretende integrar eletrolisadores em turbinas eólicas de modo sincronizado para produzir diretamente hidrogénio verde. A turbina eólica terá uma adaptação que permitirá integrar um eletrolisador PEM na base da torre (Fuel Cells Bulletin, 2021q).

- **HySynergy:**

A empresa dinamarquesa Everfuel participa no projeto “HySynergy” que pretende estabelecer 20MW de capacidade eletrolítica para a produção de hidrogénio na refinaria da Shell em Frederica, na Dinamarca. É esperado que comece a operar em 2022. A Everfuel será dona da parte da produção de hidrogénio verde e a Shell o destinatário desse hidrogénio. A capacidade eletrolítica inicial é de 20MW, mas o local vai ser preparado para acomodar um aumento de até 1GW até 2030. A segunda parte do projeto “HySynergy” já foi anunciada e prevê um aumento de 300MW de capacidade eletrolítica (Everfuel, 2021; Fuel Cells Bulletin 01/2020d; Fuel Cells Bulletin, 2021r).

- **Masshylia:**

As francesas Total e a Engie assinaram um acordo para o desenvolvimento, construção e operação de um projeto de produção de hidrogénio verde denominado “Masshylia” em Châteauneuf-les-Martigues na região de Provence-Alpes-Côte d’Azur region.

A produção de hidrogénio verde seria feita junto à bio refinaria La Mède da Total, utilizando uma central solar com capacidade instalada superior a 100MW para alimentar

os eletrolisadores com uma capacidade de 40MW, capazes de produzir 5 toneladas por dia de hidrogénio verde. O hidrogénio verde seria utilizado na bio refinaria para a produção de biocombustíveis. O início da construção das infraestruturas está programado para 2022 de modo a iniciar a produção em 2024 (Total, 2021; Engie, 2021a; Fuel Cells Bulletin, 2021s).

- **Hybrit project:**

No norte da Suécia surgiu um projeto denominado “Hybrit project”, que produz hidrogénio verde para uso industrial ao invés do carvão, produzindo ferro e aço livres de carbono (Comissão europeia, 2021d).

- **Áustria:**

Na cidade de Linz, na Áustria, um projeto semelhante utiliza um eletrolisador com capacidade de 6MW, de modo a produzir hidrogénio verde para uso numa fábrica de aço (Comissão europeia, 2021d).

## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os principais resultados deste trabalho, tendo em conta todo o trabalho apresentado ao longo deste estudo sobre o papel do hidrogénio na transição energética da união europeia.

Nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 podemos ver uma análise comparativa entre diversos métodos de produção de hidrogénio. O hidrogénio pode ser produzido através da utilização de combustíveis fósseis, por métodos termoquímicos utilizando biomassa, através de métodos biológicos e ainda através da dissociação da água. Cada um destes processos possui um TRL (Technology readiness levels), que é um método que permite estimar o nível de maturidade técnica de uma determinada tecnologia, podendo variar entre o nível 1 e 9. Para identificar o TRL analisa-se a progressão da tecnologia em etapas de pesquisa, desenvolvimento e implementação. Dentro de cada um destes métodos existem diversos processos de produção, cada um com características e eficiências próprias (BIOTECHTOWN, 2021; HORIZON 2020, 2014).

Tabela 4.1 Quadro comparativo de métodos de produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis.

Processos	Vantagens	Desvantagens	Eficiência
<b>Reforma a Vapor</b>	Tecnologia desenvolvida; Não utiliza oxigénio; Requer temperaturas baixas; Alta eficiência; Melhor rácio de hidrogénio/monóxido de carbono.	Dióxido de carbono como subproduto; Emissões elevadas; Dependência de combustíveis fósseis.	74-80%
<b>Oxidação Parcial</b>	Tecnologia comprovada; Sem necessidade de catalisador; Exigência de dessulfurização é menor.	Dióxido de carbono como subproduto; Dependência de combustíveis fósseis; Menor rácio de hidrogénio/monóxido de carbono; Utilização de oxigénio; Temperatura de operação elevada.	60-75%
<b>Reforma Autotómica</b>	Tecnologia comprovada; Rácio favorável de hidrogénio/monóxido de carbono; Necessita de menos oxigénio que na oxidação parcial; Temperatura de operação mais baixa que na oxidação parcial.	Dióxido de carbono como subproduto; Dependência de combustíveis fósseis; Utilização de ar ou oxigénio.	60-75%

Os métodos de produção através de combustíveis fósseis (Tabela 4.1) são tecnologias comprovadas e de maior eficiência. Atualmente, a maioria do hidrogénio produzido mundialmente é através destes processos, mas com tendência de inversão pois o dióxido de carbono, que é um subproduto, contribui para o incumprimento de metas ambientais colocadas por vários países.

É também possível obter hidrogénio através de processos termoquímicos (Tabela 4.2) utilizando biomassa, que é uma matéria-prima abundante, mas com eficiências baixas para além de formação de alcatrão.

Tabela 4.2 Quadro comparativo de métodos termoquímicos de produção de hidrogénio através da biomassa.

<b>Processos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Pirólise</b>	Neutra em carbono Matéria-prima abundante e barata	Formação de alcatrão Variação da quantidade de hidrogénio devido á sazonalidade e ao nível de impurezas da matéria-prima	35-50%
<b>Gaseificação</b>	Neutra em carbono Matéria-prima abundante e barata	Formação de alcatrão Variação da quantidade de hidrogénio devido á sazonalidade e ao nível de impurezas da matéria-prima	-

Os métodos biológicos de produção de hidrogénio (Tabela 4.3) permitem utilizar resíduos agrícolas e industriais de modo a obter hidrogénio. Estes processos são neutros em carbono e permitem produzir hidrogénio através de matéria orgânica utilizando microrganismos como catalisadores na presença ou ausência de luz em condições próximas das condições ambiente. Estes processos apesar de serem neutros em carbono têm eficiências relativamente baixas.

Tabela 4.3 Quadro comparativo de métodos biológicos de produção de hidrogénio.

<b>Processos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Bio fotólise direta</b>	Produção de hidrogénio através de luz solar e água	Elevada intensidade solar necessária	6,04 - 46%
<b>Bio fotólise indireta</b>	Produção de hidrogénio através da água utilizando cianobactérias	Apresenta 30% de oxigénio na mistura de gás	6,04 - 46%
<b>Foto fermentação</b>	Neutra em carbono; Bactérias utilizam energia solar; Utiliza desperdícios orgânicos; A conversão do substrato é praticamente completa.	Necessita de energia solar para funcionar; Eficiência de conversão é baixa; Reator com elevado volume; Sensibilidade ao oxigénio.	6,6 - 86%
<b>Fermentação escura</b>	Sem limitação de hidrogénio devido ao processo anaeróbio; Neutra em carbono; Produção de hidrogénio sem luz solar; Alta taxa de produção; Utiliza uma variedade de substratos; Reator simples.	Remoção de ácidos gordos; Eficiência de conversão é baixa; Reator com elevado volume; Grande quantidade de subproduto.	60 - 80%

A produção de hidrogénio através da dissociação da água (Tabela 4.4) não emite gases com efeito de estufa e como subproduto forma-se apenas oxigénio.

Tabela 4.4 Quadro comparativo de métodos de produção de hidrogénio através da dissociação da água.

<b>Processos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Eletrólise</b>	Sem poluição devida à utilização de fontes renováveis; Tecnologia comprovada; Infraestruturas existentes; Matéria-prima abundante; O único subproduto é o oxigénio; Contribui para a integração de fontes de energia renováveis como opção de armazenamento de eletricidade.	Eficiência relativamente baixa; Custos elevados.	40-60%
<b>Termólise</b>	Limpa e sustentável; Matéria-prima abundante; O único subproduto é o oxigénio.	Toxicidade de elementos; Problemas de corrosão; Custos elevados.	20-45%
<b>Foto-eletrólise</b>	Sem emissões; Matéria-prima abundante; O único subproduto é o oxigénio.	Requer luz solar; Baixa eficiência de conversão; Foto catalisadores com baixa taxa de absorção.	0,06%

Atualmente, a descarbonização das economias é um ponto essencial para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e o hidrogénio é visto com um papel importante nestas pretensões. De momento, o hidrogénio produzido através de combustíveis fósseis é utilizado na refinação e na indústria química. A produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis com captura e utilização de carbono é vista, inicialmente, como uma solução, enquanto o hidrogénio verde não se encontra consolidado, de modo a reduzir as emissões com gases de estufa no imediato. Os processos obtenção de hidrogénio de utilizando combustíveis fósseis possuem um TRL elevado sendo que a reforma a vapor tem um TRL 9, o que significa que é um sistema comprovado em ambiente operacional, competitivo. Os métodos termoquímicos de produção de hidrogénio através da biomassa, pirólise e gaseificação, possuem um TRL de 7-8, o que significa que são um sistema completo e qualificado utilizado em ambiente operacional. O hidrogénio verde, sem emissões de gases com efeito de estufa, é visto como fundamental para a obtenção da neutralidade carbónica e pode ser obtido através de processos biológicos e através da dissociação da água.

Muitos destes processos ainda não se encontram consolidados e necessitam de investimento, desenvolvimento e investigação. Os processos biológicos não possuem grande eficiência na conversão e possuem TRL baixo. O processo de Fermentação escura e Foto fermentação tem um TRL 3-4, ou seja, é um conceito experimental validado em laboratório. Já o processo de Bio fotólise tem um TRL 1, o que significa que apenas os princípios básicos foram observados. O processo de eletrólise é a maior aposta para a produção de hidrogénio verde. O processo de eletrólise permite produzir hidrogénio através da água utilizando eletricidade de fontes renováveis e, permite armazenar energia quando a produção de eletricidade renovável excede a procura. Os eletrolisadores PEM e AEC têm um TRL 9; atualmente, os eletrolisadores SOEC possuem um TRL 7, podendo este passar para um TRL 9 em 2030 (AAH2PP, 2016; SOE, 2020; LBST, 2015; DGEG, 2018).

Tabela 4.5 Utilização do hidrogénio nos diversos setores. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020).

Sectores	UE	DE	NL	FR	ES	PT	HUN
<b>Indústria</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Energia</b>	*	*	*	<b>X</b>	*	*	*
<b>Transportes</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Edifícios</b>	*	*	*	*	-	*	<b>X</b>
<b>Exportações</b>	-	-	<b>- 1</b>	-	<b>X</b>	<b>X</b>	-

**X: Prioritário; \*: Não prioritário; -: Não abordado; 1-trânsito de importação de hidrogênio para outros países.**

Tabela 4.6 Principais objetivos dos países europeus. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020).

Objetivos principais	UE	DE	NL	FR	ES	PT	HUN
<b>Descarbonização</b>	X	X	X	X	X	X	X
<b>Diversificar o fornecimento de energia</b>	*	X	X	*	X	X	X
<b>Crescimento económico mais rápido</b>	*	X	X	X	X	X	*
<b>Integração de renováveis</b>	X	X	X	*	X	X	*

**X: Prioridade imediata; \*: Prioridade mais baixa; -: Não mencionada**

Tabela 4.7 Estratégias dos países europeus. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020).

	UE	DE	NL	FR	ES	PT	HUN
<b>Estratégia contém cronograma para desenvolvimento de mercado com metas</b>	X	X	*	*	X	*	*
<b>Estratégia contém metas de custo de hidrogénio</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Investimentos diretos</b>	X	X	-	X	*	X	-
<b>Outos mecanismos económicos e financeiros</b>	X	X	X	X	*	X	*
<b>Medidas legislativas e regulatórias</b>	X	X	X	*	X	X	*
<b>Estratégia de padronização e prioridades</b>	*	*	*	*	X	X	*
<b>Iniciativas de pesquisa e desenvolvimento</b>	*	X	X	X	X	X	X
<b>Estratégia aborda questões sociais para o desenvolvimento de hidrogénio</b>	-	*	*	*	X	X	-
<b>Estratégia inclui revisão e atualização</b>	-	X	-	-	X	*	-

**X: Detalhada; \*: Mencionada; -: Não Mencionada**

Com a ratificação do Acordo de Paris, a UE e os seus estados-membros, comprometeram-se a limitar o aumento da temperatura global.

Com o objetivo de cumprir as metas do Acordo de Paris, a UE e segundo o Pacto Ecológico Europeu definiu a descarbonização como uma nova estratégia de crescimento sustentável, permitindo atingir zero emissões líquidas de gases com efeito de estufa até ao ano de 2050. A contínua descarbonização do sistema energético e das economias é vital para atingir as metas climáticas, e entre as áreas de investimento, encontra-se o hidrogénio. Assim, o hidrogénio verde permite descarbonizar e modernizar as indústrias e o setor energético. A fim de implementar o hidrogénio foi criada a estratégia para o hidrogénio para uma Europa com impacto neutro no clima. Deste modo, vários países da UE tem o objetivo de desenvolver uma economia de hidrogénio, e anunciaram estratégias nacionais, dos quais se destacam países como Alemanha, França, Países Baixos, Portugal, Espanha e Hungria. Além do mais vários países estão a preparar as suas estratégias nacionais tais como, Áustria, Bélgica, Itália, Polónia, Suécia e Eslováquia.

Cada país tem uma estratégia própria para o hidrogénio de acordo com as suas visões para as economias desses países, de modo a cumprir as metas climáticas. As abordagens em relação ao hidrogénio variam de estratégia para estratégia a nível de setores prioritários e dos objetivos principais, como podemos ver nas Tabelas 4.5 a 4.8.

Tabela 4.8 Metas dos países europeus. Adaptada: (World Energy Council, 2021; World Energy Council – Germany 2020).

	<b>UE</b>	<b>DE</b>	<b>NL</b>	<b>FR</b>	<b>ES</b>	<b>PT</b>	<b>HUN</b>
<b>Fonte de hidrogénio até 2030</b>	Baixa em carbono	Livre de carbono	Azul e verde	Baixo carbono Baseado em combustíveis fósseis	Renovável	Verde	Baixa em carbono Livre de carbono
<b>Fonte de hidrogénio até 2050</b>	Limpa/ Renovável	Renovável	Verde	Baixo carbono	Renovável	Verde	Baixa em carbono Livre de carbono
<b>Importação /Autossuficiência/ Exportação</b>	Dependente dos estados-membros	Importação/ Exportação	Importar para exportar	Exportação	Autossuficiência Exportação	Autossuficiência Exportação	Autossuficiência

Todos eles possuem os mesmos objetivos principais variando ao nível de prioridade de cada um, sendo que a descarbonização é vista como prioridade imediata em todas as estratégias. Os sectores considerados relevantes por todas estas estratégias são os da indústria e dos transportes. No campo da integração de renováveis, pode-se constatar que a França e a Hungria não o consideram uma prioridade, pois uma parte do hidrogénio eletrolítico pode ser alimentado por eletricidade produzida em centrais nucleares.

A nível da potência instalada, cada estratégia tem as suas metas de acordo com a visão de cada um dos países.

Um ponto que não é abordado em nenhuma das estratégias, o que pode ser considerado uma falha, é o das metas de custo de hidrogénio, pois parece não existir uma perceção exata dos custos. Os objetivos variam no que toca às escalas e à utilização do hidrogénio para autossuficiência, exportação e importação. Todos os países têm a autossuficiência como objetivo, mas outros, como os Países Baixos, pretendem importar para depois exportar para outros países na Europa. Portugal pretende exportar, nomeadamente para os Países Baixos, sendo que existe uma parceria entre eles que inclui os portos de Sines e Roterdão. A Alemanha é o país que pretende ter mais capacidade eletrolítica instalada, podendo assim, exportar. Além disso, pretende ainda importar de países fronteiriços como os Países Baixos para ser utilizado em locais específicos.

A estratégia da UE prevê, entre 2020 e 2024, instalar no mínimo 6 GW capazes de produzir 1 milhão de toneladas de hidrogénio renovável. Entre 2025 e 2030, prevê-se que a potência instalada seja de 40 GW, e até 2050 espera-se que atinja a maturidade e que seja implementado em larga escala em todos os setores.

Em Portugal, até 2030, pretende-se ter uma capacidade instalada de 2 a 2,5 GW e de 5GW até 2050. A Alemanha prevê na sua estratégia uma capacidade instalada de 5 GW até 2030 e mais de 10GW até 2040. Nos Países Baixos prevê-se, entre 2022 e 2025, uma capacidade instalada de 500MW, e de 2026 a 2030 entre 3 e 4 GW. Na estratégia francesa define-se que até 2030, a capacidade instalada será de 6,5GW, de modo a produzir hidrogénio livre de carbono; e em Espanha define-se como meta os 4GW até 2024. A Hungria espera produzir, até 2030, 36 000 ton/ano de hidrogénio verde e de baixo teor em carbono sendo que, 20 000 toneladas correspondem a hidrogénio de baixo teor de carbono e 16 000 ton a hidrogénio, verde com uma capacidade instalada de 240 MW.

A Tabela 4.9 apresenta sumariamente as metas a atingir ao nível da potência eletrolítica instalada, pelos estados-membros da UE.

Tabela 4.9 Metas a atingir a nível de potência eletrolítica instalada.

	<b>Capacidade Instalada</b>	<b>Ano</b>
<b>UE</b>	Mínimo 6GW	2024
	40GW	2030
<b>Portugal</b>	2 a 2,5GW	2030
	5GW	2050
<b>Alemanha</b>	5GW	2030
	10GW	2040
<b>Países Baixos</b>	500MW	2025
	3 a 4GW	2030
<b>França</b>	6,5GW	2030
<b>Espanha</b>	4GW	2024
<b>Hungria</b>	240MW	2030

Os projetos de eletrolisadores propostos com uma previsão de lançamento até 2024 na UE totalizaram 5,2 GW no início de julho de 2021, não estando muito longe da meta dos 6 GW proposta até 2024. Os 5,2 GW representam 86,6% da meta prevista até 2024. Grande parte da capacidade eletrolítica anunciada, com início de operação previsto até 2024, é atribuída a Espanha com cerca de 2,2 GW sendo que outros países como, os Países Baixos, a Suécia, a Alemanha entre outros, contribuem com os restantes 3 GW (S&PGLOBALPLATTS, 2021).

Os projetos anunciados para a produção de hidrogénio utilizando o processo de eletrólise autorizados até 2030, representam aproximadamente 28 GW. Este valor fica 12 GW aquém da meta dos 40 GW até 2030. Com os projetos anunciados atualmente, a meta dos 40 GW será atingida com 10 anos de atraso, apenas em 2040 (THEMA, 2021).

Segundo a Platts Analytics, no último ano foi notada uma rápida aceleração no número de projetos de grande escala previstos e planeados que são anunciados regularmente, impulsionada pelo aumento do apoio governamental. Assim, se esta tendência se mantiver será muito prematuro afirmar que as metas para 2030 não serão cumpridas (S&PGLOBALPLATTS, 2021).

## 5. Conclusão

A UE pretende atingir a neutralidade carbónica até 2050 e considera o hidrogénio como uma ferramenta de modo a atingir esse objetivo.

A energia obtida através do hidrogénio tem um papel chave para a transição energética, pois este oferece um conteúdo energético elevado, cerca de duas vezes e meia superior à do metano e três vezes superior à da gasolina. Além disso, possui uma capacidade de armazenamento e flexibilidade, podendo assim ser utilizado para a produção de calor e energia elétrica, e ainda ser utilizado em diversos sectores da economia.

A cadeia de valor do hidrogénio está dividida em 4 fases, produção, armazenamento, distribuição e aplicações finais. O hidrogénio não se encontra livre na natureza sendo necessário utilizar diversos processos para a sua obtenção. O hidrogénio pode ser obtido utilizando combustíveis fósseis, utilizando processos termoquímicos, processos biológicos e através da dissociação da água. Os processos com maior eficiência são os que utilizam combustíveis fósseis, mas como estes produzem gases com efeito de estufa, como subprodutos, não se enquadrando na estratégia de redução de emissões.

O hidrogénio verde, obtido através de processos biológicos ou através da dissociação da água, utilizando eletricidade proveniente de fontes de energia renovável, é fundamental para a descarbonização. Atualmente, os processos biológicos para obtenção de hidrogénio não são tecnologias muito desenvolvidas e possuem eficiências relativamente baixas, não sendo assim uma solução imediata, mas podendo ter um papel mais relevante no futuro, com um investimento e desenvolvimento das tecnologias.

De momento, o processo de eletrólise é o mais consolidado e com eficiências entre os 40 a 60%, sendo visto como o mais capaz para obter a neutralidade carbónica. Visto que as fontes de energias renováveis são intermitentes, quando existe produção em excesso de energia elétrica é possível armazená-la na forma de hidrogénio através do processo de eletrólise para que esta seja utilizada posteriormente.

O hidrogénio pode ser armazenado em sistemas estacionários ou móveis e pode ser armazenado no estado sólido, gasoso e líquido. Assim, é necessária uma infraestrutura de distribuição de hidrogénio, de modo a transportar hidrogénio nas suas formas de armazenamento. O transporte do hidrogénio está dependente de diversos fatores tais como

o volume do transporte, as distâncias a percorrer e as características dos locais. Os métodos de transporte são bastante convencionais podendo ser transportado através de camiões, ferrovias, navios ou utilizando condutas. O hidrogénio pode ser introduzido em condutas de gás natural em pequenas quantidades pois, se este exceder os 22% ocorre o fenómeno de fragilização que leva à formação de bolhas e fraturas. A nível europeu prevê-se a construção de uma infraestrutura de transporte de hidrogénio que ligue diversos países na UE.

Quanto à sua utilização final, o hidrogénio pode ser utilizado em diversos dispositivos de modo a obter energia elétrica, mecânica e térmica. O hidrogénio pode ser utilizado em células de combustível, turbinas a gás, motores de combustão interna, e caldeiras.

No sector dos transportes, o hidrogénio é visto como a melhor solução para os veículos pesados. A utilização de baterias para alimentar um motor elétrico em veículos pesados não é visto como opção, pois é necessária uma grande quantidade de baterias que aumentaria consideravelmente o peso dos veículos. Sendo assim, a melhor solução para os veículos pesados é alimentar o motor elétrico com eletricidade obtida através células de combustível a hidrogénio.

A UE, no âmbito do Pacto Ecológico Europeu, criou a estratégia europeia para o hidrogénio e diversos estados-membros, entre os quais Alemanha, França, Países Baixos, Portugal, Espanha e Hungria, incluíram o hidrogénio nos seus planos energéticos.

As abordagens em relação ao hidrogénio variam de estratégia para estratégia, a nível de setores prioritários e dos seus objetivos principais. Todos eles possuem os mesmos objetivos principais, variando ao nível de prioridade de cada um, sendo que a descarbonização é vista como prioridade imediata em todas as estratégias. Os sectores considerados relevantes por todas estas estratégias são os da indústria e dos transportes. A nível da potência instalada, cada estratégia tem as suas metas de acordo com a visão de cada um dos países.

Um ponto importante e que não é tido em consideração em nenhuma estratégia é o custo do hidrogénio verde, tanto em termos de produção como consumo/venda. Uma das razões pode prender-se com de ainda não ser produzido e utilizado em grande escala.

A definição de metas implica que exista um compromisso destes países para que estas sejam cumpridas. A Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo foi criada para facilitar as ações da estratégia para o hidrogénio e apoiar os investimentos, de modo a aumentar a procura e produção de hidrogénio renovável. O objetivo desta Aliança é identificar e criar um leque de projetos de investimentos viáveis a nível industrial desde a produção, distribuição e aplicações na esfera da mobilidade, da indústria. A Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo é formada por autoridades públicas nacionais e locais, sociedade civil, indústria e outras partes interessadas.

Existem vários projetos, quer em Portugal quer na UE, para a implementação de hidrogénio verde. Diversos projetos surgem de parcerias entre países e da criação de consórcios que são formados por empresas de diversos países. Isto mostra que existe cooperação e vontade de introduzir o hidrogénio nos diversos sectores da economia, contribuindo assim para a transição energética e consequente descarbonização.

## Referências bibliográficas

- Oaos100, 2021. Toyota desenvolve motor de combustão alimentado a hidrogénio. Disponível: <https://Oaos100.pt/pt/5087/toyota-desenvolve-motor-de-combustao-alimentado-a-hidrogenio> [Acesso: 30-08-2021]
- AAH2PP, 2016. Analysis of Advanced H2 Production Pathways. Disponível: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review16/pd102\\_james\\_2016\\_o.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review16/pd102_james_2016_o.pdf)
- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072–15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Acar, C., & Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.060>
- AICEP, 2021. Projeto de 300 milhões para produzir hidrogénio no Alandroal para exportação. Disponível: <https://portugalglobal.pt/PT/PortugalNews/Paginas/NewDetail.aspx?newId=%7B0A0B49EF-7052-4054-AE9F-6259815CECB9%7D> [Acesso: 03-08-2021]
- Almeida, Aníbal & Moura, Pedro. (2006). Hydrogen and Fuel Cells to Distributed Energy Generation. *Gazeta de Física*. 29. 50-55.
- Ambiente magazine, 2021. “H2ENABLE” DA BONDALTI É UM DOS PROJETOS ANCORAS DO HIDROGÉNIO VERDE EM PORTUGAL. Disponível: <https://www.ambientemagazine.com/h2enable-da-bondalti-e-um-dos-projetos-ancoras-do-hidrogenio-verde-em-portugal/> [Acesso: 03-08-2021]
- AP2H2, 2021. SOBRE O HIDROGÉNIO. Disponível: <https://www.ap2h2.pt/sobre-h2.php> [Acesso: 26-03-2021]
- Apak, S., Atay, E., & Tuncer, G. (2012). Renewable hydrogen energy regulations, codes and standards: Challenges faced by an EU candidate country. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 5481–5497. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.005>
- APREN, 2020. Evolução da Potência Instalada nos Centros Eletroprodutores de Portugal Continental. Disponível: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/potencia> [Acesso: 07-05-2021]
- Arnemann, E. R., 2019. DESENVOLVIMENTO DE COLETORES DE CORRENTE Á BASE DE *Ti / NbN PARA ELETRÓLISE PEM DA ÁGUA*. Disponível: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/19428/ELTON%20REGIS%20ARNEMANN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Audi, 2021. Audi h-tron quattro. Disponível: <https://www.audi.com/en/experience-audi/models-and-technology/concept-cars/audi-h-tron-quattro.html> [Acesso: 09-09-2021]
- AVTOTACHKI, 2021. MOTOR A HIDROGÉNIO. COMO FUNCIONA E DESVANTAGENS. Disponível: <https://avtotachki.com/pt/vodorodnyj-dvigatel-kak-rabotaet-i-nedostatki/#1058108010871099-10741086107610861088108610761085108610751086-107610741080107510721090107710831103>
- Ball, M., & Weeda, M. (2015). The hydrogen economy - Vision or reality? *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(25), 7903–7919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032>
- BIOTECHTOWN, 2021. Disponível: <https://biotechtown.com/blog/trl/> [Acesso: 25-10-2021]
- BMW, 2019. Hydrogen fuel cell cars: everything you need to know. Disponível: <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html> [Acesso: 09-09-2021]
- BONDALTI 2020. Bondalti aposta no hidrogénio. Disponível: <https://www.bondalti.com/pt/multimedia/noticias/bondalti-aposta-no-hidrogenio> [Acesso: 03-08-2021]
- CaetanoBus, 2021. H2.City Gold. Disponível: <https://caetanobus.pt/pt/buses/h2-city-gold/> [Acesso: 10-08-2021]
- Cebolla, R., & Navas, C. (2019). Supporting hydrogen technologies deployment in EU regions and Member States: The Smart Specialisation Platform on Energy (S3PEnergy). *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(35), 19067–19079. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.041>
- Chatzimarkakis, 2020. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. Disponível: [https://www.waterstofnet.eu/asset\\_public/WIC/Hydrogen-Europe\\_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper-1.pdf](https://www.waterstofnet.eu/asset_public/WIC/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper-1.pdf)
- Clifford Chance, 2020. NATIONAL HYDROGEN STRATEGY – GERMANY AIMS TO TAKE THE LEAD Disponível:

- <https://www.cliffordchance.com/content/dam/cliffordchance/briefings/2020/06/national-hydrogen-strategy%E2%80%93germany-aims-to-take-the-lead%2022.7.pdf>
- Clifford Chance, 2020a. FOCUS ON HYDROGEN: SPAIN'S BID TO PLAY A LEADING ROLE IN NEW ENERGY Disponível:  
<https://www.cliffordchance.com/content/dam/cliffordchance/briefings/2020/10/focus-on-hydrogen-spains-bid-to-play-a-leading-role-in-new-energy.pdf>
- Clifford Chance, 2021. FOCUS ON HYDROGEN: STRATEGY FOR HYDROGEN ENERGY IN THE NETHERLANDS Disponível:  
[https://www.cliffordchance.com/content/dam/cliffordchance/briefings/2021/03/focus-on-hydrogen\\_strategy-for-hydrogen-energy-in-the-netherlands\\_10.3.pdf](https://www.cliffordchance.com/content/dam/cliffordchance/briefings/2021/03/focus-on-hydrogen_strategy-for-hydrogen-energy-in-the-netherlands_10.3.pdf)
- CMS, 2020. CURRENT STATE OF HYDROGEN PROJECTS IN PORTUGAL.  
Disponível:<https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/portugal> [Acesso: 14-08-2021]
- CNBC, Setembro 2021. Hyundai wants hydrogen fuel cell versions of all its commercial vehicle models by 2028. Disponível:[www.cnb.com/2021/09/07/hyundai-wants-fuel-cell-versions-of-commercial-vehicles-by-2028.html?fbclid=IwAR10-j3Dz-VAQDIHZJHPF\\_Ks5XlGv4EuSTmVwScrwyyaQ0lWdAsgUp6QUc](http://www.cnb.com/2021/09/07/hyundai-wants-fuel-cell-versions-of-commercial-vehicles-by-2028.html?fbclid=IwAR10-j3Dz-VAQDIHZJHPF_Ks5XlGv4EuSTmVwScrwyyaQ0lWdAsgUp6QUc) [Acesso: 09-09-2021]
- Comissão Europeia, 2019. H2Valley Disponível: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/fch-03-1-2019>
- Comissão Europeia, 2020. COMUNICAÇÃO DA COMISSÃO AO PARLAMENTO EUROPEU, AO CONSELHO, AO COMITÉ ECONÓMICO E SOCIAL EUROPEU E AO COMITÉ DAS REGIÕES - Estratégia do Hidrogénio para uma Europa com Impacto Neutro no Clima. Disponível: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=PT>
- Comissão Europeia, 2021. European Clean Hydrogen Alliance Members' Meeting, 21 May 2021.  
Disponível: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/45791>
- Comissão Europeia, 2021a. Hidrogénio: Comissão lança recolha de projetos para a Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo. Disponível: [https://ec.europa.eu/portugal/news/european-clean-hydrogen-alliance\\_pt](https://ec.europa.eu/portugal/news/european-clean-hydrogen-alliance_pt) [Acesso: 19-06-2021]
- Comissão Europeia, 2021b. European Clean Hydrogen Alliance. Disponível: [https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance\\_pt](https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance_pt) [Acesso: 19-06-2021]
- Comissão Europeia, 2021c. Why the EU supports energy storage research and innovation.  
Disponível: <https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/energy-research-and-innovation/energy-storage-and-distribution> [Acesso: 23-08-2021]
- Comissão Europeia, 2021d. n focus: Hydrogen – driving the green revolution. Disponível: [https://ec.europa.eu/info/news/focus-hydrogen-driving-green-revolution-2021-abr-14\\_en](https://ec.europa.eu/info/news/focus-hydrogen-driving-green-revolution-2021-abr-14_en)
- Comissão Europeia, 2021c. Delfzijl Joint Development of green Water Electrolysis at Large Scale.  
Disponível: <https://cordis.europa.eu/project/id/826089> [Acesso: 27-08-2021]
- Concelho Europeu 2021, Acordo de Paris sobre alterações climáticas. Disponível: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/paris-agreement/> [Acesso: 27-05-2021]
- Deloitte, 2020. Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation.  
Disponível: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>
- Diário da República, 1.ª série – N.º 158, 14 de Agosto de 2020.
- Diário da República, 2.ª série – N.º 217, 6 de Novembro de 2020.
- Diário da República, 2.ª série – N.º 231, 26 de Novembro de 2020.
- Diário da República, 2.ª série – N.º 81, 27 de Abril de 2021.
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- Dincer, I., & Acar, C., 2014. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Dinheiro Vivo, 2021. Projeto de hidrogénio verde em Sines não terá mega-consórcio.  
Disponível: <https://www.dinheirovivo.pt/economia/projeto-de-hidrogenio-verde-em-sines-nao-tera-mega-consorcio--13735113.html> [Acesso: 02-08-2021]
- Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), 2018. O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios de Integração. Disponível: <https://www.dgeg.gov.pt/media/3eshwqnl/p1-o-hidrog%C3%A9nio-no-sistema-energ%C3%A9tico-portugu%C3%AAs.pdf>.

- Direção-Geral de Energia e Geologia,(DGEG), 2019). INTEGRAÇÃO DO HIDROGÉNIO NAS CADEIAS DE VALOR. Disponível: <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>  
Disponível: <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/evora-vai-ter-producao-de-hidrogenio-verde-com-tecnologia-portuguesa-pioneira>[Acesso: 05-08-2021]
- eCycle 2021. “O que é hidrogénio e quais suas características?”. Disponível: <https://www.ecycle.com.br/8325-hidrogenio.html> [Acesso: 26-03-2021]
- EDP, 2018. As cores do hidrogénio: verde é a cor do futuro. Disponível: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/cores-do-hidrogenio> [Acesso:15-04-2021]
- EDP, 2019. EDP prepara projeto para testar hidrogénio na Central do Ribatejo. Disponível:<https://www.edp.com/pt-pt/noticias/2019/12/11/edp-prepara-projeto-para-testar-hidrogenio-na-central-do-ribej>o [Acesso: 07-08-2021]
- ENGIE 2021, Para a UE, hidrogênio produzido com energia nuclear é de baixo carbono. Disponível: <https://www.alemenergia.com.br/para-a-ue-hidrogenio-produzido-com-energia-nuclear-e-de-baixo-carbono/> [Acesso: 05-05-2021]
- Engie, 2021a. Disponível: [www.engie.com/en](http://www.engie.com/en)
- European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A),2021. Mission & Vision. Disponível: <https://www.ech2a.eu/missionandvision> [Acesso: 18-06-2021]
- Eurostat, 2020. Renewable energy statistics. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics) .[Acesso: 07-05-2021]
- Everfuel, 2021. Everfuel is Leading the flagship project HySynergy involving the establishment of a 20 MW PtX facility in 2022 aiming for + 1 GW before 2030. Disponível:<https://www.everfuel.com/projects-archive/hysynergy/> [Acesso: 30-08-2021]
- Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020. The National Hydrogen Strategy. Disponível:[https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6)
- Fi group, 2021. Plano Nacional do Hidrogénio. Disponível: <https://pt.fi-group.com/plano-nacional-do-hidrogenio/> [Acesso: 02-08-2021]
- Flanders Investment & Trade, 2021. THE GREEN HYDROGEN ENERGY IN SPAIN Disponível: [https://www.flandersinvestmentandtrade.com/export/sites/trade/files/market\\_studies/2021-Spanje-The%20green%20hydrogen%20energy%20in%20Spain-Website.pdf](https://www.flandersinvestmentandtrade.com/export/sites/trade/files/market_studies/2021-Spanje-The%20green%20hydrogen%20energy%20in%20Spain-Website.pdf)
- Fuel Cell Electric Buses,2021. JIVE 2. Disponível: [www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2](http://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2) [Acesso: 23-08-2021]
- Fuel Cells and Hydrogen 2021. Disponível: <https://www.fch.europa.eu/page/fch-ju-projects> [Acesso: 27-08-2021]
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH), 2019. Hydrogen Roadmap Europe. <https://doi.org/10.2843/249013>
- Fuel Cells Bulletin, 2020. Barcelona buys eight CaetanoBus buses [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30433-8](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30433-8)
- Fuel Cells Bulletin, 2020a. Djewels consortium wins EU backing for green hydrogen project [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30073-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30073-0)
- Fuel Cells Bulletin, 2020b. Verbund developing trans-European green hydrogen value chain. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30591-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30591-5)
- Fuel Cells Bulletin, 2020c. Iberdrola, Fertiberia plan large-scale green hydrogen plant in Spain [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30356-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30356-4)
- Fuel Cells Bulletin, 2020d. Funding for two large-scale Power-to-X projects in Denmark. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30024-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30024-9)
- Fuel Cells Bulletin, 2020l. Nel in framework deal with Lhyfe to deliver electrolyzers in France. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30201-7](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30201-7)
- Fuel Cells Bulletin, 2021. ESWE Verkehr orders 10 CaetanoBus FCEBs [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00062-6)
- Fuel Cells Bulletin, 2021b. First Solaris fuel cell bus delivered to RVK [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00121-8)
- Fuel Cells Bulletin, 2021c. First Solaris buses delivered to Bolzano in Italy [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00246-7](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00246-7)
- Fuel Cells Bulletin, 2021d. HyTrucks consortium plans 300 hydrogen powered trucks on the road in Belgium by 2025. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00245-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00245-5)
- Fuel Cells Bulletin, 2021e. Elogen tech in German SmartQuart project [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00277-7](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00277-7)

Fuel Cells Bulletin, 2021f. H2B2 electrolyzers for Port of Malaga project [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00278-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00278-9)

Fuel Cells Bulletin, 2021g. GET H2 alliance plans green hydrogen infra-structure for Europe [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00214-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00214-5)

Fuel Cells Bulletin, 2021h. Linde for hydrogen production, refueling station in Herten [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00271-6](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00271-6)

Fuel Cells Bulletin, 2021i. Ørsted H2RES green hydrogen project under way in Copenhagen [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00325-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00325-4)

Fuel Cells Bulletin, 2021j. Ørsted chooses GHS electrolyzers for wind-to-hydrogen project [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00093-6)

Fuel Cells Bulletin, 2021k. Nel wins Iberdrola 20 MW electrolyser deal [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00092-4)

Fuel Cells Bulletin, 2021n. GHS partners with Eurowind and Lhyfe for 24 MW electrolysis [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00327-8](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00327-8)

Fuel Cells Bulletin, 2021o. AquaVentus for North Sea offshore green hydrogen production [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00033-X)

Fuel Cells Bulletin, 2021p. NorthH2 project adds RWE and Equinor. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00033-X)

Fuel Cells Bulletin, 2021q. Siemens plans offshore green H2 production. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00090-0)

Fuel Cells Bulletin, 2021r. Everfuel plans 300 MW HySynergy electrolyser for Fredericia refinery [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00324-2](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00324-2)

Fuel Cells Bulletin, 2021s. Total, Engie to develop 40 MW green hydrogen production in France. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00091-2)

FUSION-FUEL 2021. GreenGas Project in Évora. Disponível: <https://fusion-fuel.eu/projects/> [Acesso: 05-08-2021]

GETH2, 2021. The initiative – GET H2. Disponível: GET H2 initiative: [www.get-h2.de/en](http://www.get-h2.de/en) [Acesso: 27-08-2021]

Gouvernement, 2020. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France. Disponível: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP%20-%20Strat%C3%A9gie%20nationale%20pour%20le%20d%C3%A9veloppement%20de%20l%27hydrog%C3%A8ne%20d%C3%A9carbon%C3%A9%20en%20France.pdf>

Green Hydrogen Systems, 2021m. Accelerating the global energy transition with green hydrogen. Disponível: <https://greenhydrogen.dk/> [Acesso: 30-08-2021]

H2, 2021. Hydrogen cars: All models at a glance. Disponível: <https://h2.live/en/wasserstoffautos/> [Acesso: 09-09-2021]

H2B2, 2021. Disponível: [www.h2b2.es](http://www.h2b2.es) [Acesso: 23-08-2021]

HONDA, 2021. 2021 CLARITY FUEL CELL. Disponível: <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell> [Acesso: 09-09-2021]

HORIZON 2020, 2014. Technology readiness levels (TRL). Disponível: [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf)

HUNGARY'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY, 2021. Disponível: <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/a/a2/a2b/a2b2b7ed5179b17694659b8f050ba9648e75a0bf.pdf>

Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. (2001). Module 1: Hydrogen Properties. *Hydrogen Fuel Cell Engines*, 41. Disponível: [https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech\\_validation/pdfs/fcm01r0.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf)

Hydrogen Tools 2021. HYDROGEN COMPARED WITH OTHER FUELS Disponível: <https://h2tools.org/hydrogen-compared-other-fuels> [Acesso: 05-04-2021]

Hydrogen Tools, 2021a. LIQUID HYDROGEN PROPERTIES AND BEHAVIORS. Disponível: <https://h2tools.org/bestpractices/liquid-hydrogen-properties-and-behaviors> [Acesso: 05-04-2021]

Hydrogen Tools, 2021b. HANDLING CRYOGENIC LIQUID Disponível: <https://h2tools.org/bestpractices/cryogenic-liquid> [Acesso: 05-04-2021]

Hydrogen Tools, 2021c. LIQUID PIPING SYSTEMS Disponível: <https://h2tools.org/bestpractices/piping-systems-0> [Acesso: 05-04-2021]

Hydrogenious, 2021. Welcome to the Hydrogen World of Tomorrow. Disponível: [www.hydrogenious.net](http://www.hydrogenious.net) [Acesso: 28-08-2021]

- Iberdrola, 2020. Iberdrola obtains a favourable EIS for the Puertollano photovoltaic plant which will supply power to Europe's largest green hydrogen plant. Disponível: <https://www.iberdrola.com/press-room/news/detail/iberdrola-obtains-favourable-puertollano-photovoltaic-plant-which-will-supply-power-europe-s-largest-green-hydrogen-plant> [Acesso: 29-08-2021]
- IBERDROLA, 2021. “O que é um eletrolisador e por que é essencial para o fornecimento de hidrogênio verde?”. Disponível: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador> [Acesso: 03-05-2021]
- Iberdrola, 2021b. Iberdrola builds the largest green hydrogen plant for industrial use in Europe. Disponível: <https://www.iberdrola.com/about-us/lines-business/flagship-projects/puertollano-green-hydrogen-plant> [Acesso: 29-08-2021]
- Jornal de Negócios, 2021. Évora vai ter produção de hidrogénio verde com tecnologia portuguesa pioneira.
- Kakoulaki, G., Kougiass, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., & Jäger-Waldau, A. (2021). Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 228(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
- Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016–10035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>
- Kumar, R., Kumar, A., & Pal, A. (2020). An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 5353–5359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.793>
- LBST, 2015. Study on hydrogen from renewable resources in the EU. Disponível: [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/GHyP-Final-Report\\_2015-07-08\\_5%20%28ID%202849171%29.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/GHyP-Final-Report_2015-07-08_5%20%28ID%202849171%29.pdf)
- Linde Engineering, 2021. Disponível: [www.linde-engineering.com](http://www.linde-engineering.com) [Acesso: 28-08-2021]
- Martin, A., Agnoletti, M. F., & Brangier, E. (2020). Users in the design of Hydrogen Energy Systems: A systematic review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(21), 11889–11900. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.163>
- Mitsui & Co., 2020. GERMANY'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY Disponível: [https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2021/02/19/2012\\_fu\\_hrmann\\_e.pdf](https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2021/02/19/2012_fu_hrmann_e.pdf)
- Nel, 2021. Containerized PEM Electrolyser. Disponível: [www.nelhydrogen.com/product/m-series-c](http://www.nelhydrogen.com/product/m-series-c) [Acesso: 28-08-2021]
- NFPA, 2021. Tendências Emergentes: Abastecimento de Veículos. Disponível: [www.nfpajla.org/pt/arquivos/material-inflamavel-combustivel/1277-tendencias-emergentes-suministro-de-combustible-a-vehiculos](http://www.nfpajla.org/pt/arquivos/material-inflamavel-combustivel/1277-tendencias-emergentes-suministro-de-combustible-a-vehiculos) [Acesso: 29-07-2021]
- Nikolaïdis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- NorthH2, 2021. Large-scale green hydrogen production. Disponível: <https://www.north2.eu/en> [Acesso: 30-08-2021]
- Nunes, M. (2015). Produção biológica integrada de Hidrogénio e Metano a partir de resíduos da Indústria do Biodiesel. *Dissertacao de Mestrado, Universidade Lisboa*. Disponível: [https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/20202/1/ulfc115789\\_tm\\_Margarida\\_Nunes.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/20202/1/ulfc115789_tm_Margarida_Nunes.pdf)
- Observador, 2021. Toyota faz motor que queima hidrogénio (e não é bom). Disponível: <https://observador.pt/2021/04/25/toyota-faz-motor-que-queima-hidrogenio-e-nao-e-bom/> [Acesso: 30-08-2021]
- ODigital, 2021. Projeto pioneiro vai produzir em Évora hidrogénio verde com tecnologia portuguesa (c/fotos). Disponível: <https://odigital.sapo.pt/projeto-pioneiro-vai-produzir-em-evora-hidrogenio-verde-com-tecnologia-portuguesa-c-fotos/> [Acesso: 05-08-2021]
- Opeyemi, B. (2021). Path to sustainable energy consumption: The possibility of substituting renewable energy for non-renewable energy. *Energy*, 228, 120519. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120519>
- Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepu, V., & Borse, P. H. (2020). Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>
- Parlamento Europeu, 2021. RELATÓRIO sobre uma estratégia da UE para o hidrogénio (2020/2242(INI)) Disponível: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116\\_PT.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_PT.pdf)

- Pelegrin, D. C., 2017. *OXIDAÇÃO PARCIAL CATALÍTICA DO METANO PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE UTILIZANDO CATALISADORES SUPORTADOS EM FIBRAS DE FeCrAlloy®*. Pag.115. Disponível: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/182881/349699.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Petrofac, 2021. THE DIFFERENCE BETWEEN GREEN HYDROGEN AND BLUE HYDROGEN. Disponível: <https://www.petrofac.com/en-gb/media/our-stories/the-difference-between-green-hydrogen-and-blue-hydrogen/> [Acesso: 15-04-2021]
- PNEC030, 2019. PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030). Disponível: <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2020/12/PNEC-2030-Plano-Nacional-Energia-e-Clima.pdf>
- Portal Energia, 2019. Células de Combustível: Principais tipos e características. Disponível: <https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-tipos/> [Acesso: 25-05-2021]
- PRF, 2021. A PRF Gas Solutions apresentou o posto DRHYVE: um posto portátil de abastecimento de Hidrogénio, o 1º em Portugal. Disponível: <https://www.prf.pt/pt/303/a-prf-gas-solutions-apresentou-o-posto-drhyve-um-posto-portatil-de-abastecimento-de-hidrogenio-o-1-em-portugal> [Acesso: 10-08-2021]
- Razão Automóvel, 2021. Motor a hidrogénio da Deutz AG chega em 2024, mas não aos automóveis. Disponível: <https://www.razaoautomovel.com/2021/08/motor-a-hidrogenio-deutz-ag> [Acesso: 30-08-2021]
- Razão Automóvel, 2021a. Já testámos o Toyota Mirai. O primeiro carro a hidrogénio em Portugal. Disponível: <https://www.razaoautomovel.com/2021/01/toyota-mirai-carro-a-hidrogenio-portugal> [Acesso: 09-09-2021]
- Reddy, S. N., Nanda, S., Vo, D.-V. N., Nguyen, T. D., Nguyen, V.-H., Abdullah, B., & Nguyen-Tri, P. (2020). Hydrogen: fuel of the near future. In *New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819553-6.00001-5>
- Refhyne 2021. Disponível: [www.refhyne.eu](http://www.refhyne.eu). [Acesso: 27-08-2021]
- REN, 2021. Apresentação de Resultados 2020. Disponível: [https://www.ren.pt/files/2021-03/2021-03-18190815\\_4c65f7f1-2e56-4968-a1af-585420fa64e0\\$\\$c7d6162a-77f8-4bdc-a17a-b1844dde87f6\\$\\$dc3c13e0-fe38-4275-85c6-5ec56074458d\\$\\$pt\\_pt\\_file\\$\\$pt\\$\\$1.pdf](https://www.ren.pt/files/2021-03/2021-03-18190815_4c65f7f1-2e56-4968-a1af-585420fa64e0$$c7d6162a-77f8-4bdc-a17a-b1844dde87f6$$dc3c13e0-fe38-4275-85c6-5ec56074458d$$pt_pt_file$$pt$$1.pdf)
- Renault Group 2021. ALL THERE IS TO KNOW ABOUT THE HYDROGEN-POWERED CAR. Disponível: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/all-there-is-to-know-about-the-hydrogen-powered-car/> [Acesso: 09-09-2021]
- República Portuguesa, 2020. EN-H2 ESTRATÉGIA NACIONAL PARA O HIDROGÉNIO. Disponível: <https://participa.pt/contents/consultationdocument/Estrate%CC%81gia%20Nacional%20para%20o%20Hidrogeno%CC%81nio%20DRAFT%20publicac%CC%A7ao.pdf>
- S&PGLOBALPLATTS, 2021. Hydrogen fever in EU puts 2024 target of 6-GW electrolyzer capacity in reach. Disponível: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/070721-hydrogen-fever-in-eu-puts-2024-target-of-6-gw-electrolyzer-capacity-in-reach>
- SAPO, 2020. “Do cinzento ao verde, passando pelo azul. Porque tem o hidrogénio tantas cores?” Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/07/30/do-cinzento-ao-verde-passando-pelo-azul-porque-tem-o-hidrogenio-tantas-cores/> [Acesso: 15-04-2021]
- SAPO, 2020a. Há dois projetos de hidrogénio verde prestes a arrancar até fim do ano. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/11/20/ha-dois-projetos-de-hidrogenio-verde-prestes-a-arrancar-ate-fim-do-ano/> [Acesso: 03-08-2021]
- SAPO, 2020b. Bondalti: Hidrogénio verde precisa de mercado europeu regulado para ser competitivo. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/11/10/bondalti-hidrogenio-verde-precisa-de-mercado-europeu-regulado-para-ser-competitivo/> [Acesso: 03-08-2021]
- SAPO, 2020c. Hidrogénio verde já arrancou na central térmica da EDP no Ribatejo. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/04/27/hidrogenio-verde-ja-arrancou-na-central-termica-da-edp-no-ribatejo/> [Acesso: 09-08-2021]
- SAPO, 2020d. Turbogás quer criar rede regional de hidrogénio verde no Grande Porto. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/06/26/turbogas-quer-criar-rede-regional-de-hidrogenio-verde-no-grande-porto/> [Acesso: 09-08-2021]
- SAPO, 2020e. Primeiro posto de abastecimento de hidrogénio ficará em Gaia. Vai custar 1,5 milhões. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/07/06/primeiro-posto-de-abastecimento-de-hidrogenio-ficara-em-gaia-vai-custar-15-milhoes/> [Acesso: 10-08-2021]
- SAPO, 2020f. Governo quer 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogénio até 2030. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/08/14/governo-quer-50-a-100-postos-de-abastecimento-de-hidrogenio-ate-2030/> [Acesso: 14-08-2021]



- Tribunal de Contas Europeu, 2019. Relatório Especial - Energias eólica e solar para a produção de eletricidade: é necessário tomar medidas significativas para cumprir as metas da UE. Disponível: [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR19\\_08/SR\\_PHOTOVOLTAIC\\_PT.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR19_08/SR_PHOTOVOLTAIC_PT.pdf)
- U.S. Department of Energy (USDOE), 2010. Fuel Cells Technologies Program. Disponível: [https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/files/fc%20fuelcell\\_factsheet.pdf](https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/files/fc%20fuelcell_factsheet.pdf)
- U.S. Department of Energy (USDOE), 2020. Department of Energy Hydrogen Program Plan. Disponível: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>
- U.S. Department of Energy (USDOE)a, 2020. HYDROGEN STRATEGY-Enabling A Low-Carbon Economy. *Pag: 24.* Disponível: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/USDOE\\_FE\\_Hydrogen\\_Strategy\\_July2020.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/USDOE_FE_Hydrogen_Strategy_July2020.pdf)
- UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, 2021. Types of Fuel Cells. Disponível: <https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/fuelcells/types-of-fuel-cells> [Acesso: 25-05-2021]
- UTiS, 2021. TECNOLOGIA UC3. Disponível: <https://www.utis.pt/pt-pt/uc3-ultimate-cell>[Acesso: 07-08-2021]
- Wang, M., Wang, G., Sun, Z., Zhang, Y., & Xu, D. (2019). Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation. *Global Energy Interconnection*, 2(5), 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2019.11.019>
- World Energy Council – Germany, 2020. INTERNATIONAL HYDROGEN STRATEGIES. Disponível: [https://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC\\_H2\\_Strategies\\_Executive-Summary\\_final.pdf](https://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2020/10/WEC_H2_Strategies_Executive-Summary_final.pdf)
- World Energy Council, 2021. HYDROGEN ON THE HORIZON: READY, ALMOST SET, GO? WORKING PAPER, NATIONAL HYDROGEN STRATEGIES. Disponível: [https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working\\_Paper\\_-\\_National\\_Hydrogen\\_Strategies\\_-\\_September\\_2021.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf)
- Yilanci, A., Dincer, I., & Ozturk, H. K. (2009). A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(3), 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.07.004>
- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21261–21273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- Zhang, B., Zhang, S. X., Yao, R., Wu, Y. H., & Qiu, J. S. (2021). Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology*, 19(2), 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.JNLEST.2021.100080>
- Zivar, D., Kumar, S., & Foroozesh, J. (2021). Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45), 23436–23462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>