



LILIA PATRICIA LEAL DAS NEVES

Licenciada em Engenharia de Energias Renováveis

HIDROGÉNIO: REVISÃO DE TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO, POLÍTICAS ENERGÉTICAS E MERCADO

MESTRADO EM BIOENERGIA E TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro , 2024

HIDROGÉNIO: REVISÃO DE TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO, POLÍTICAS ENERGÉTICA E MERCADO

LILIA PATRICIA LEAL DAS NEVES

Licenciada em Engenharia de Energias Renováveis

Orientadora: Catarina Pereira Nobre,
Investigadora auxiliar, VALORIZA – Instituto Politécnico de Portalegre

Coorientadora: Maria Margarida Boavida Pontes Gonçalves,
Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA)

Júri:

Presidente: José Paulo Barbosa Mota,
Professor Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia | FCT NOVA

Arguente: Diogo Miguel Franco dos Santos,
Investigador Associado, Center of Physics and Engineering of Advanced Materials (CeFEMA) - Instituto Superior Técnico

Orientador: Catarina Pereira Nobre,
Investigadora auxiliar, VALORIZA – Instituto Politécnico de Portalegre

Coorientadora: Maria Margarida Boavida Pontes Gonçalves,
Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA)

MESTRADO EM BIOENERGIA E TECNOLOGIAS SUSTANTÁVEIS

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024

Hidrogénio: Revisão de Tecnologias de Produção, Políticas Energéticas e Mercado

Copyright © <Lilia Patricia Leal das Neves>, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A minha família, que, com amor e paciência esteve presente ao meu lado em cada momento desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Para começar, um agradecimento especial a Faculdade de Ciências e Tecnologias que me acolheram estes últimos 2 anos. Foi um período de grande aprendizagem, tanto académico como pessoal. Agradeço a todos os professores que fizeram parte deste percurso.

Obrigada às professoras Ana Luísa Fernando e Margarida Gonçalves por mostrarem sempre grande disponibilidade e apoio durante este percurso.

Agradeço a minha mãe e ao meu pai, Sónia e Álvaro, a oportunidade de poder prosseguir com os estudos e por me apoiarem incondicionalmente. Obrigada pelo vosso colo e por sempre acreditarem em mim. A minha família, que diferentes formas, me apoia e deseja que eu concretize os meus objetivos e que me sinta realizada. Ao meu namorado, Edmar D’Almeida, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio emocional e encorajamento durante os momentos desafiadores.

Agradeço também a todos os meu colegas com os quais partilhei estes últimos 2 anos, pela vossa colaboração e troca de ideias.

“A excelência não é uma exceção, é uma atitude permanente” (Colin Powell).

RESUMO

A crise climática é um dos maiores desafios atuais, com amplas evidências de que não podemos continuar a explorar os recursos do planeta nem emitir gases que provocam o efeito estufa, como temos feito até nos dias de hoje. Nos últimos anos, no entanto, o mundo parece ter tomado consciência da gravidade das mudanças climáticas, cujos efeitos estão cada vez mais visíveis. Esse despertar global permitiu a criação de acordos visando à redução das emissões de gases de efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global, com o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica.

Este trabalho examina a relevância do hidrogénio na transição energética promovida pela União Europeia (UE). São discutidas as suas propriedades, bem como os diferentes métodos para produção, armazenamento e distribuição, culminando no uso final. Além disso, foi avaliada a estratégia da UE para o hidrogénio, ressaltando seus principais objetivos e metas. As políticas nacionais também foram analisadas, incluindo a estratégia portuguesa, com enfoques variados conforme os setores prioritários e as metas principais. Desta análise crítica conclui-se que apesar de partilharem metas comuns, cada país prioriza aspetos distintos. Contudo, o papel do hidrogénio na transição energética nacional e internacional é evidente, com grande potencial para expansão e aplicação.

Palavras chave: Hidrogénio, Alterações climáticas, Efeito de estufa, Neutralidade carbónica

ABSTRACT

The climate crisis is one of today's biggest challenges, with ample evidence that we cannot continue to exploit the planet's resources or emit greenhouse gases, as we have been doing up until now. In recent years, however, the world seems to have become aware of the seriousness of climate change, the effects of which are becoming increasingly visible. This global awakening has led to the creation of agreements aimed at reducing greenhouse gas emissions, which are responsible for global warming, with the aim of achieving carbon neutrality.

This dissertation examines the relevance of hydrogen in the energy transition promoted by the European Union (EU). Its properties are discussed, as well as the different methods for production, storage and distribution, culminating in end uses. In addition, the EU's hydrogen strategy is evaluated, highlighting its main objectives and targets. National policies were also analyzed, including the Portuguese strategy, with varying approaches depending on the priority sectors and main goals. From this critical analysis it can be concluded that despite sharing common goals, each country prioritizes different aspects. However, the role of hydrogen in the national and international energy transition is evident, with great potential for expansion and application.

Keywords: Hydrogen, Climate change, Greenhouse effect, Carbon neutrality

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e motivação	2
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização da dissertação	2
2	O HIDROGÉNIO	5
2.1	Caraterísticas físicas.....	5
2.1.1	Massa volúmica	5
2.1.2	Volume específico	6
2.1.3	Razão de expansão	6
2.1.4	Poder calorífico.....	7
2.2	Tipos de hidrogénio	7
2.3	Fontes de hidrogénio	9
3	PRODUÇÃO DO HIDROGÉNIO	11
3.1	Métodos de produção de hidrogénio	11
3.2	Produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis.....	12
3.2.1	Reformação / Reforma de vapor	12
3.2.2	Oxidação parcial.....	13
3.2.3	Reforma autotérmica	13
3.2.4	Gaseificação do carvão	14
3.2.5	Pirólise de hidrocarbonetos	14
3.3	Produção de hidrogénio através de biomassa	15
3.3.1	Processos termoquímicos.....	15
3.3.2	Processos biológicos.....	16

3.3.3	Dissociação da água.....	19
3.4	Armazenamento do hidrogénio.....	22
3.5	Distribuição de hidrogénio.....	25
3.6	Aplicações de hidrogénio.....	27
3.6.2	Tipos de células de combustível	28
3.7	Estratégia europeia para o hidrogénio.....	33
3.7.1	Denominação do hidrogénio	34
3.7.2	Metas e prazos	35
3.7.3	Investimento	37
3.7.4	Setor do transporte.....	38
3.8	Estratégia portuguesa para o hidrogénio	41
3.8.1	Iniciativas	41
3.8.2	Fases, metas e objetivos	48
3.8.3	Cadeia de valor do hidrogénio em Portugal.....	50
4	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2:1: As cores de hidrogénio, tendo em conta o tipo de energia e a tecnologia de produção. Adaptado [8].	8
Figura 2:2: Fontes de hidrogénio. Adaptado: [10].	9
Figura 2:3: Caminhos para produção de energia através de fontes primárias de energia verde. Adaptado: [11].	10
Figura 3:1: Processo de reforma a vapor para produção de hidrogénio. Adaptado: [13].	13
Figura 3:2: Estágios do processo de reforma autotérmica para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	14
Figura 3:3: Estágio do processo pirólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	15
Figura 3:4: Processo gaseificação de biomassa para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	16
Figura 3:5: Estágios do processo bio-fotólise direta para produção de hidrogénio. Adaptado: [13].	17
Figura 3:6: Estágios do processo bio-fotólise indireta para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	18
Figura 3:7: Processo Foto Fermentação para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	18
Figura 3:8: Processo Fermentação Escura para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	19
Figura 3:9: Estágios do eletrólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	19
Figura 3:10: Esquema simplificado de um eletrolisador. Adaptado: [19].	20
Figura 3:11: Comparação entre os eletrolisadores do tipo AEC, PEM, SOEC. Adaptado: [20].	21
Figura 3:12: Estágios do processo de termólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	21
Figura 3:13: Estágios do processo de foto eletrólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].	22
Figura 3:14: Modelo simplificado de um hidreto metálico. Adaptado: [22].	25
Figura 3:15: Métodos de transporte de hidrogénio. Adaptado: [23].	25
Figura 3:16: Aplicações do hidrogénio. Adaptada: [27].	27
Figura 3:17: Diagrama de uma célula de combustível. Adaptado: [28].	28
Figura 3:18: Sistema de propulsão em veículos a motor. Adaptado: [32].	32
Figura 3:19: Princípio de operação de um FCEV. Adaptado: [32].	32
Figura 3:20: Eficiência energética de um FCEV. Adaptado: [32].	33

Figura 3:21: Diferentes formas de utilizar o hidrogénio para o processo de descarbonização. Adaptado: [39].	34
Figura 3:22: Infraestrutura de transporte gás natural na Europa (linhas azuis e vermelhas) e novas infraestruturas de transporte de hidrogénio (linhas laranjas). Adaptado:[39].	36
Figura 3:23: Desenvolvimento do hidrogénio na UE. Adaptado: [40].	37
Figura 3:24: Comparação de diversos sistemas de armazenamento para uma autonomia de 500km. Adaptado: [19].	39
Figura 3:25: Velocidade de abastecimento, requisitos de espaço e abastecimento. Adaptado: [40].	40
Figura 3:26: Futuros postos de abastecimento de hidrogénio. Adaptado:[40].	40
Figura 3:27: Evolução do PCS do gás em função a incorporação de hidrogénio. Adaptado: [48].	42
Figura 3:28:Fontes potenciais de água para eletrolise e opções de tratamento necessárias. Adaptado: [47].	43
Figura 3:29: Localização estratégica de Sines. Adaptado:[48].	44
Figura 3:30: Composição do projeto de produção de hidrogénio verde á escala industrial em Sines. Adaptado:[48].	45
Figura 3:31:Estrutura preliminar para a execução do projeto de Sines. Adaptado: [48].	46
Figura 3:32:Central termoelétrica da Tapada do Outeiro. Adaptado: [60].	48
Figura 3:33: Fases de implementação do EN-H2. Adaptado: [47]	49
Figura 3:34: Proposta de metas e objetivos de incorporação, em volume, de hidrogénio nos vários setores. Adaptado: [48].	50
Figura 3:35: Esquema da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção á utilização final. Adaptado: [47].	51
Figura 3:36: Esquema da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção á utilização final. Adaptado: [48].	52
Figura 3:37: Esquema da cadeia de valor P2M. Adaptado:[48].	52
Figura 3:38:Esquema da cadeia de valor P2I. Adaptado:[48].	53
Figura 3:39:Esquema da cadeia de valor P2P. Adaptado: [48].	54
Figura 3:40:Esquema da cadeia de valor P2F.Adaptado: [48].	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 :Densidade de várias substâncias no estado de vapor e líquido. Adaptado:[4].	6
Tabela 2.2: Volume específico do hidrogénio. Adaptado:[4].	6
Tabela 2.3: Poder calorífico para vários combustíveis. Adaptado:[5].	7

LISTA DE ACRÓNIMOS

AEL	Eletrolisador alcalino
ATR	Reforma Autotérmica
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
FCEV	Veículo elétrico movido a células a baterias
H ₂	Hidrogénio
H ₂ O	Água
NO _x	Óxidos de Azoto
PEM	Eletrolisador com membrana de troca de protões
PNEC2030	Plano Nacional Energia Clima 2030
POX	Oxidação Parcial
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
PSA	Pressure Swing Adsorption
SOEC	Eletrolisador de óxido sólido
SR	Reforma a vapor
UE	União Europeia
WGS	Water-Gas Shift

INTRODUÇÃO

Historicamente, os combustíveis fósseis, conhecidos por serem recursos finitos e distribuídos de maneira desigual pelo globo, se consolidaram como a principal fonte de energia mundial, apesar dos seus significativos impactos ambientais. Estes incluem a emissão de dióxido de carbono (CO_2) e gases de efeito estufa (GEE), além do aumento da poluição urbana. Contudo, nas últimas décadas, tem-se observado o avanço de transformações globais, tanto de ordem técnica quanto econômica e ambiental. Essas mudanças, que também envolvem o crescimento das fontes de energia renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, exigem novas formas de energia para garantir segurança energética e a continuidade de um fornecimento sustentável de energia limpa [1].

A transição para um sistema energético baseado em fontes renováveis, essencial para a democratização e segurança energética, é vista como uma transformação estrutural de longo prazo. Essa mudança visa ampliar a participação de fontes renováveis na geração de energia e substituir gradualmente a matriz energética atual, baseada em fontes poluentes. O Acordo de Paris, assinado em 2015, representa um marco importante nesse processo de mitigação das mudanças climáticas, consolidando o desenvolvimento sustentável como uma prioridade para as maiores economias globais [1].

Durante a 21ª Conferência das Partes (COP) 195 países concordaram em trabalhar para limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C, com a meta ideal de não ultrapassar 1,5 °C. Para atingir esses objetivos, são necessárias reduções substanciais nas emissões de GEE, o que implica descarbonizar os sistemas energéticos e aumentar a participação de fontes renováveis. A eletrificação da matriz energética também é uma estratégia crucial, representando, juntas, cerca de 75% da redução necessária de emissões [1].

Considerando que o setor energético é responsável por cerca de dois terços das emissões globais de GEE, para cumprir as metas de descarbonização global, as emissões relacionadas à energia precisam ser reduzidas em 52% em relação aos níveis de 2019 até 2040 [1]. Assim, a descarbonização é o principal motor da transição energética, com esforços globais coordenados nessa direção ao desenvolvimento sustentável [1].

1.1 Contexto e motivação

Atualmente a crise climática se destaca como um dos temas mais relevantes globalmente, devido aos seus impactos tanto ambientais quanto econômicos, é crucial direcionar a atenção para os setores que mais contribuem para o seu agravamento, principalmente por meio da emissão de gases prejudiciais à atmosfera. É necessário reconhecer que começam a surgir alternativas à queima de combustíveis fósseis em setores altamente poluentes, os quais, até recentemente, careciam de opções viáveis.

O setor de geração de energia elétrica é um dos que mais agravam o aquecimento global, dada a significativa emissão de CO₂. Esse segmento é predominantemente controlado por grandes empresas, que frequentemente combinam a geração de eletricidade com a comercialização de combustíveis fósseis, como ocorre com o setor de combustíveis para automóveis. O hidrogénio verde tem se mostrado uma das soluções mais promissoras na descarbonização desse setor, ganhando crescente relevância.

Portanto, é essencial analisar as possíveis estratégias de descarbonização adotadas por grandes empresas de energia, com foco no uso do hidrogénio, especialmente na Península Ibérica, devido à sua localização geográfica estratégica e às políticas governamentais em vigor. Também é importante examinar o impacto dessa adoção para a sustentabilidade do sistema energético, considerando a resiliência e a confiabilidade do sistema, especialmente com o esperado aumento do consumo energético global causado pela eletrificação da economia.

1.2 Objetivos

A dissertação tem como o principal objetivo de analisar de forma abrangente e atualizada a produção de hidrogénio, compreender as suas diferentes tecnologias de produção, examinar os panoramas político e regulatório, e compreender o mercado atual de hidrogénio, incluindo os principais players do mercado, suas estratégias e previsões para o futuro do mercado de hidrogénio.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em 4 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 acerca do 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 corresponde aos 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 União Europeia (UE) para o hidrogénio, identificando as metas a atingir, as iniciativas a implementar e caracterizar as cadeias de valor do hidrogénio.

O quarto capítulo corresponde às conclusões do trabalho, e é feita uma síntese global do estudo realizado onde são expostas as principais conclusões do trabalho.

O HIDROGÉNIO

O hidrogénio é o elemento mais simples que podemos encontrar, correspondendo ao primeiro elemento da tabela periódica de Mendeleiev, tem a menor massa atómica (1,008) e o menor número atómico[2]. Na tabela periódica, este elemento está localizado no primeiro período e na família dos metais alcalinos, mas não faz parte da mesma, pois apresenta características físicas e químicas que diferem às dos elementos dessa família[3]. 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 0,0899 g/L, ou seja, cerca de 14,4 vezes mais leve que o ar a condições de pressão e temperatura normais (0 °C e 1 atm) [1].

O hidrogénio molecular é um composto químico gasoso, inodoro, insípido, incolor e não possui toxicidade[2]. O H em si não é inflamável[3], mas tem grande capacidade de armazenar energia, sendo que a sua forma mais estável é H₂ (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 [2].

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 constitui um elemento essencial que integra uma vasta gama de substâncias, tanto orgânicas como inorgânicas. Em síntese, está presente em praticamente todos os elementos que nos rodeiam, incluindo a água, os combustíveis, as plantas, os animais, entre outros[2].

Para utilizar o hidrogénio (H₂), é necessário extraí-lo de materiais que o contenham em sua composição. As fontes mais abundantes desse elemento na natureza incluem a água, biomassa, gás natural, etanol, sendo as mais adequadas para processos de produção [3].

2.1 Características físicas

2.1.1 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[4].

Tabela 2.1 :Densidade de várias substâncias no estado de vapor e líquido. Adaptado:[4].

Substância	Massa volúmica de vapor (0 °C, 1 atm) kg/ m ³	Massa volúmica líquida (no ponto de ebulição, 1 atm) kg/ m ³
Hidrogénio	0,08376	70,8
Metano	0,65	422,8
Gasolina	4,4	700

2.1.2 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 m³/kg a uma temperatura de 0 °C e 1 atm, já o volume específico do hidrogénio no estado líquido é de 0,014m³/kg a -253 °C e 1 atm. Na Tabela 2.2 podemos ver o volume específico do hidrogénio no estado gasoso e líquido [4].

Tabela 2.2: Volume específico do hidrogénio. Adaptado:[4].

Substância	Volume específico hidrogénio gasoso m ³ /kg	Volume específico hidrogénio líquido m ³ /kg
Hidrogénio	11,9	0,014

2.1.3 Razão de expansão

A diferença de volume entre o hidrogénio no estado gasoso e o estado líquido pode ser estimada 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 consequente aumento de volume. A razão de expansão do hidrogénio é de 1:848, isto significa que no seu estado gasoso, em 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[4].

2.1.4 Poder calorífico

Os combustíveis liberam uma quantidade específica de energia ao reagirem completamente com o oxigénio. O poder calorífico superior (PCS) refere-se ao calor libertado durante a combustão de um combustível em excesso de ar, quando os gases de exaustão são arrefecidos e o vapor de água neles é condensado. Já o poder calorífico inferior (PCI) corresponde à quantidade de calor gerada quando o combustível queima em excesso de ar, mas o vapor de água nos gases de exaustão permanece em estado gasoso [4].

A energia química dos combustíveis é medida em unidades de energia, como megajoules (MJ) ou quilocalorias (kcal), por unidade de massa (kg). A Tabela 2.3 apresenta os valores de poder calorífico superior e inferior para diferentes combustíveis [4].

Tabela 2.3: Poder calorífico para vários combustíveis. Adaptado:[5].

Combustível	Estado (à temperatura e pressão ambiente)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Hidrogénio	Gasoso	141,9	119,9
Metano		55,5	50
Etano		51,9	47,8
Gasolina	Líquido	47,5	44,5
Gasóleo		44,8	42,5
Metanol		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 de 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 á energia de combustão, fazendo com que os fogos de hidrogénio diminuam mais rapidamente do que o dos hidrocarbonetos [4].

2.2 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_2) 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 como apresentado na Figura 2.1[6, 7].

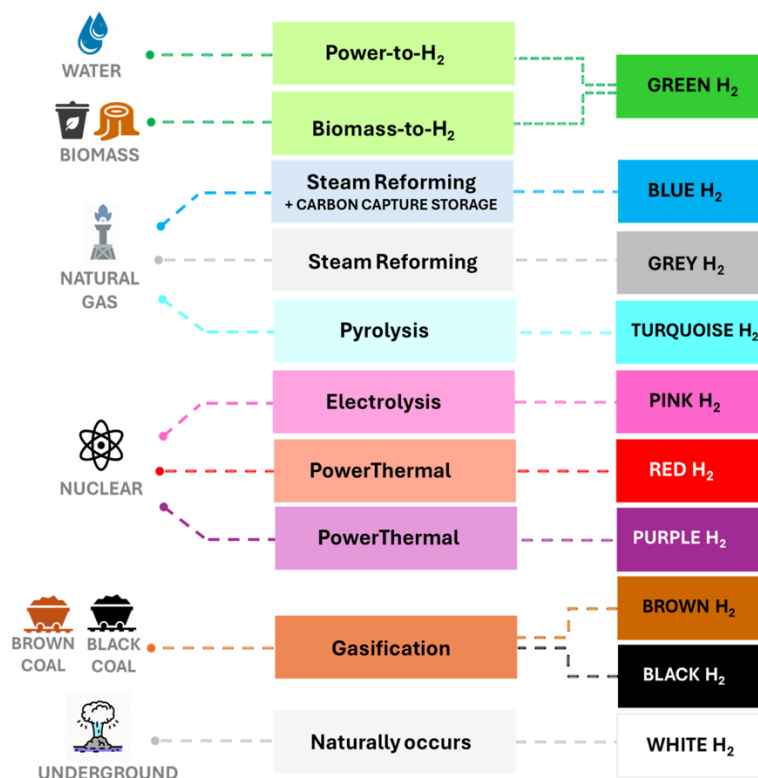


Figura 2.1: As cores de hidrogénio, tendo em conta o tipo de energia e a tecnologia de produção. Adaptado [8].

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 CO₂ 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 reforma do metano a vapor [9]. O hidrogénio castanho e preto é obtido a partir da gaseificação do carvão, um método termoquímico, no qual o carvão é convertido em um gás combustível.

O hidrogénio turquesa é obtido através da pirólise de gás natural a altas temperaturas. Neste processo, além de hidrogénio, também é produzido negro de fumo, também designado por "carbon black" [9].

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. 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 [9].

2.3 Fontes de hidrogénio

O hidrogénio pode ser encontrado em inúmeras substâncias, tanto orgânicas quanto inorgânicas, o que proporciona diversas opções para sua extração. Exemplos dessas fontes incluem a água, biomassa, biogás, biodiesel, amónia, algas, compostos químicos como hidretos, além do gás natural e outros hidrocarbonetos como podemos ver na Figura 2.2 [10].

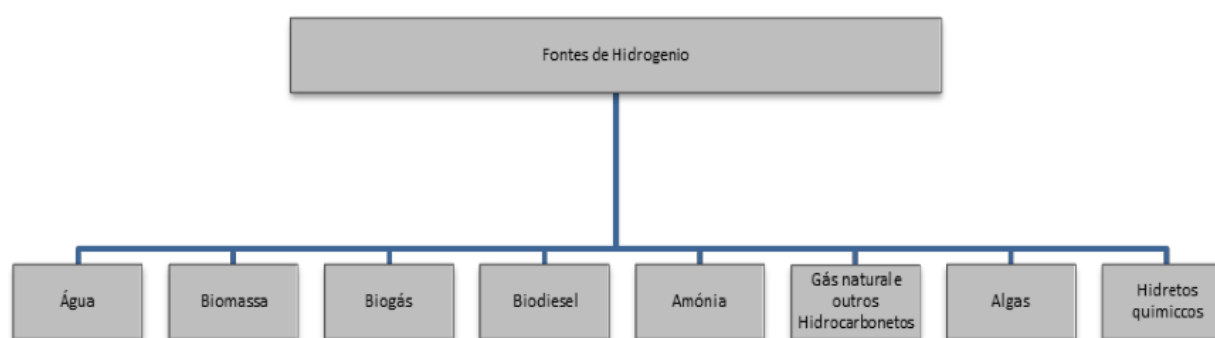


Figura 2.2: Fontes de hidrogénio. Adaptado: [10].

Existem diversas formas de obtenção de hidrogénio que utilizam diversas fontes de energia, sendo estas de origem renovável ou não renovável [8].

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 [8].

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, como podemos observar na figura 2.3 [11].

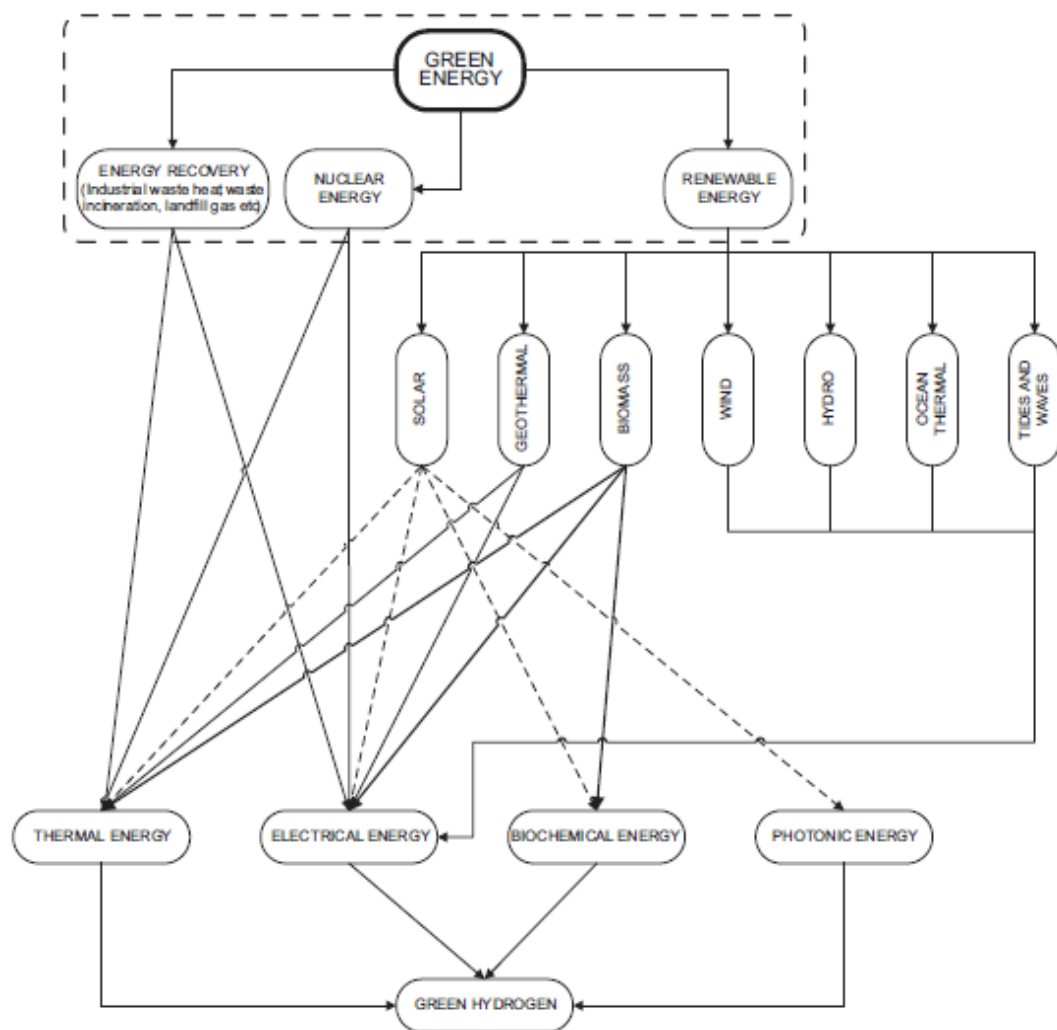


Figura 2.3: Caminhos para produção de energia através de fontes primárias de energia verde. Adaptado: [11].

Na Figura 2.3 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 [11].

PRODUÇÃO DO HIDROGÉNIO

Um dos principais desafios assumidos pela comunidade internacional é a transição energética, que se baseia numa redução das emissões de GEE no sistema energético [12]. O hidrogénio pode ser eficientemente convertido em energia para transporte ou utilização industrial sem emissões de CO₂, 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 conjunto das fontes energéticas numa economia livre de carbono [13, 14].

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-las mais baratas e acessíveis, e assim permitir que se dissemine no mercado sendo economicamente viáveis [7].

3.1 Métodos de produção de hidrogénio

O hidrogénio pode ser produzido por diferentes tecnologias, com recurso a diferentes matérias-primas [7]. 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 [5, 10, 13].

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

Para além destas tecnologias termoquímicas para produção do hidrogénio a partir de biomassa podem ainda utilizar-se processos biológicos como a biofotólise ou a fermentação

no escuro, mas estas tecnologias não apresentam um grau de maturidade tecnológica muito avançado [5]-:

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 [5].

3.2 Produção de hidrogénio através de combustíveis fósseis

3.2.1 Reformação / Reforma de 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 3.1. 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) [5, 13].

Primeiramente são retiradas as impurezas do hidrocarboneto (que normalmente são compostos 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_2) e monóxido de carbono (CO). A reforma é dada a temperaturas elevadas (850 a 900 °C), a pressões até 3.5MPa e com uma razão de vapor para carbono de 3.5 [5]. 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_2). Por fim, dessa mistura é retirado o dióxido de carbono através de um sequestrador de CO_2 utilizando um sistema de PSA (*Pressure Swing Adsorption*), que permite obter hidrogénio com elevado grau de pureza, a rondar os 100 % [5, 10].

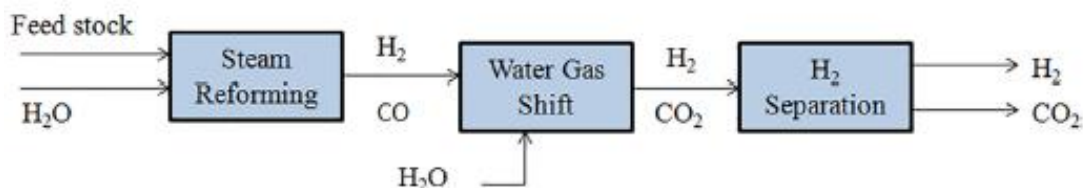


Figura 3.1: Processo de reforma a vapor para produção de hidrogênio. Adaptado: [13].

A reforma de metano a vapor apresenta eficiência de conversão entre os 74-85 % [5]. Atualmente, este método é o que possui menores custos e é o mais aplicado para a produção de hidrogênio utilizando combustíveis fósseis [10, 15].

3.2.2 Oxidação parcial

A oxidação parcial é outro caminho para a produção de hidrogênio, este método envolve a conversão de vapor, oxigênio e hidrocarbonetos em hidrogênio e óxidos de carbono. Durante oxidação parcial são formados alguns produtos como o *syngas* ($H_2 + CO$), uma mistura de CO_2 , N_2 (azoto) e H_2O (água) e uma pequena porção de CH_4 (metano). A oxidação parcial do metano consiste numa reação de duas etapas. Na primeira etapa da reação o oxigênio é utilizado para a oxidação parcial do hidrocarboneto. Na segunda etapa o *syngas* é tratado da mesma forma do gás resultante do processo de reforma a vapor [5, 13].

O oxigênio oxida parcialmente o metano sendo necessário 0,5 mol de O_2 para cada mol de metano produzindo uma mistura gasosa de *syngas* na razão de 2:1 de H_2/CO . Também são produzidos produtos indesejados devido a combustão total do metano como o CO_2 e H_2O [16]. Este processo produz menos quantidade de H_2 a partir da mesma quantidade de matéria-prima [13].

3.2.3 Reforma autotérmica

A reforma autotérmica combina o processo de reforma a vapor e oxidação parcial num reator adiabático [13]. 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 hidrogênio. Vapor e oxigênio, ou ar, são introduzidos no reformador, resultando na ocorrência simultânea da reformação e das reações de oxidação, como demonstrado na Figura 3.2.

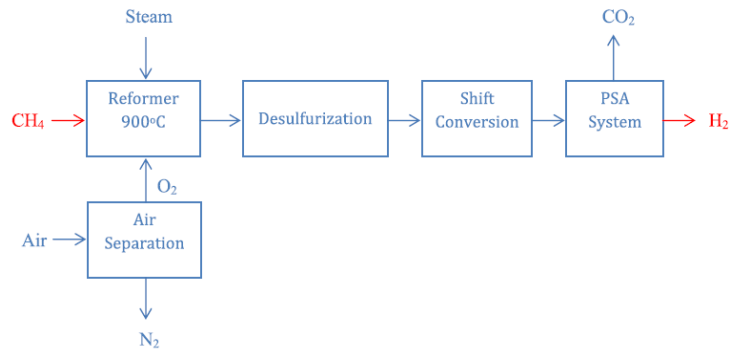


Figura 3:2: Estágios do processo de reforma autotérmica para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

3.2.4 Gaseificação do carvão

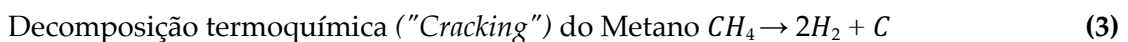
Existem diversas formas de utilizar o carvão como fonte de combustível sendo que uma delas é a gaseificação, que é um processo químico que converte o carvão sólido em um gás combustível, conhecido como gás de síntese. Esse gás, pode ser utilizado como combustível em aplicações industriais, produção de energia elétrica, ou como matéria-prima para a síntese de produtos químicos, representando uma alternativa eficiente e flexível ao uso direto do carvão em combustão. O carvão é oxidado parcialmente com vapor e oxigénio num reator a altas pressões e temperaturas. Noutra etapa, o monóxido reage com o vapor de água, formando hidrogénio e dióxido de carbono, e assim sofrendo um processo de purificação do hidrogénio 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 [10].

3.2.5 Pirólise de hidrocarbonetos

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



A 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 hidrogénio e carbono simples. Caso o ponto de ebulição seja superior a 350 °C o hidrogénio é produzido em duas fases, hidrogaseificação e decomposição termoquímica ("cracking") do metano [5].



3.3 Produção de hidrogénio através de 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 [5].

Os processos biológicos não têm tanto impacto a nível ambiental e não são tão energeticamente exigentes, mas possuem baixas taxas de rentabilidade, ou seja, (mol H_2 / mol matéria-prima) dependendo da matéria-prima utilizada. Os processos termoquímicos são mais rápidos e permitem um maior rendimento estequiométrico na obtenção do hidrogénio [5].

3.3.1 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 reforma a vapor e WGS. Existem outros processos tais como a combustão e a liquefação, mas estes são menos adequados, 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 [5].

3.3.1.1 Pirólise

Este processo termoquímico permite obter óleos, carvão e composições gasosas através do aquecimento da biomassa, a certas condições de temperatura (376.85°C - 526.85°C) e pressão (1- 5 atm). Na figura 3.3 demonstra como este processo acontece completamente sem oxigénio, a não ser em situações em que ocorre combustão parcial. O metano e outros hidrocarbonetos podem sofrer reforma a vapor e WGS para produzir mais hidrogénio [5].

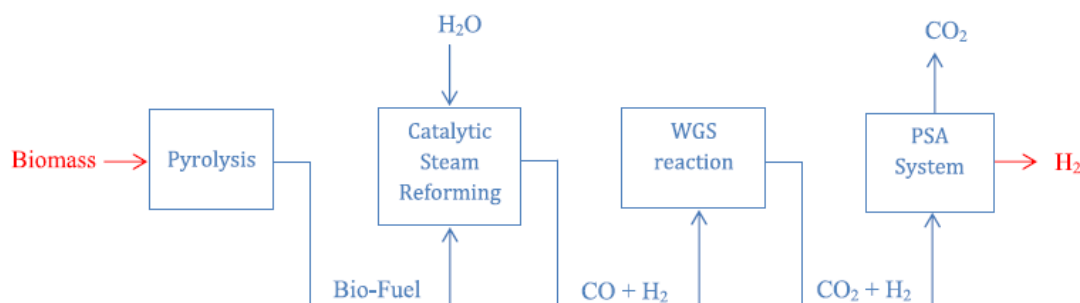
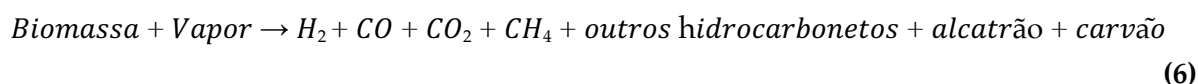
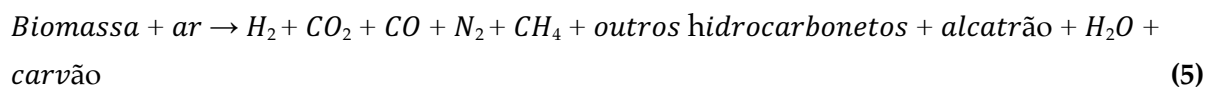


Figura 3.3: Estágio do processo pirólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

3.3.1.2 Gaseificação

Este processo termoquímico converte a queima de biomassa num combustível gasoso denominado gás de síntese ou *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, 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 [5].



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, do tamanho, da temperatura e da razão de vapor para biomassa. Se for utilizado vapor no processo de gaseificação, a produção de hidrogénio é muito superior ao processo de pirólise [5]. 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 [15].

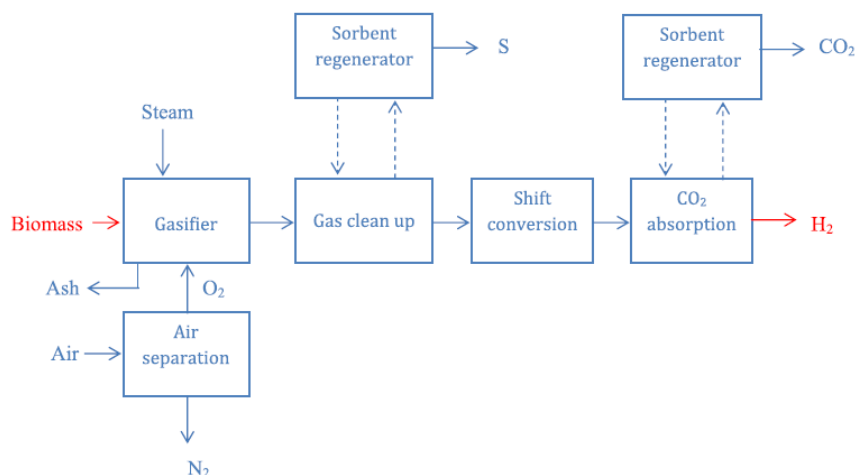


Figura 3:4: Processo gaseificação de biomassa para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

3.3.2 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 [17].

Os processos biológicos mais aplicados 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 contém carboidratos são convertidas em ácidos orgânicos e em seguida em hidrogénio por sistema de bio processamento [5, 15].

3.3.2.1 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 utilizando bio-fotólise direta e indireta [5, 13].

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 3.5. Os iões de hidrogénio são convertidos em hidrogénio gasoso devido à ação de enzimas hidrogenase [13, 17].



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

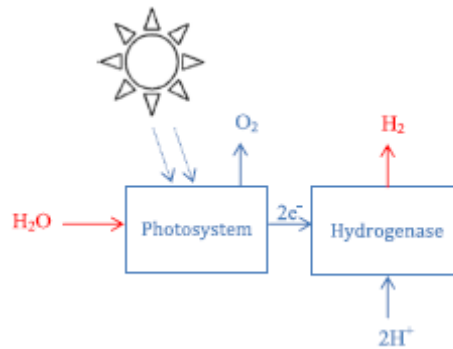
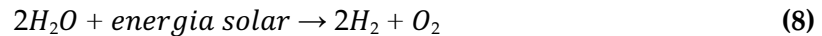
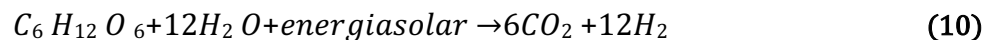
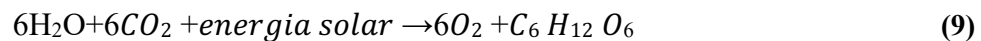


Figura 3:5: Estágios do processo bio-fotólise direta para produção de hidrogénio. Adaptado: [13].

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 [13].



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 [15].

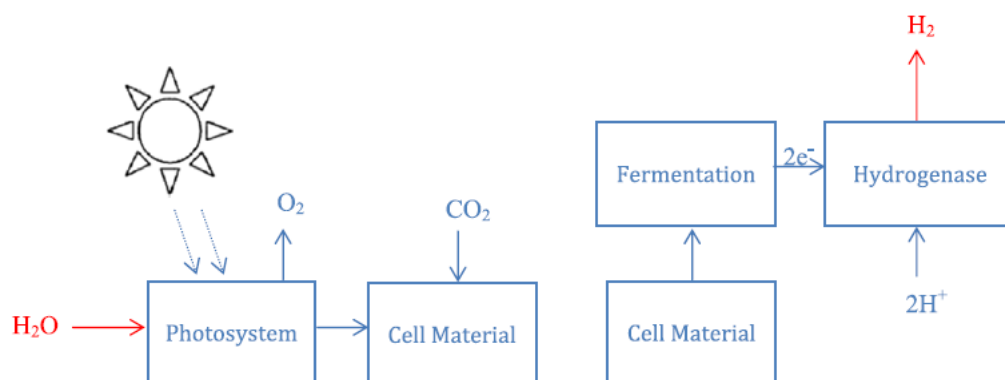


Figura 3.6: Estágios do processo bio-fotólise indireta para produção de hidrogênio. Adaptado: [5].

3.3.2.2 Foto fermentação

A foto fermentação ocorre num ambiente com condições deficientes de azoto utilizando ácidos orgânicos e energia solar [13]. Devido à presença de enzimas nitrogenase, bactérias fotossintéticas como identificadas figura 3.7, são capazes de converter ácidos orgânicos como ácido acético ou láctico em hidrogênio e dióxido de carbono [5].

A conversão e hidrogênio é dada pela seguinte formula utilizando ácido acético como reagente [5, 15].

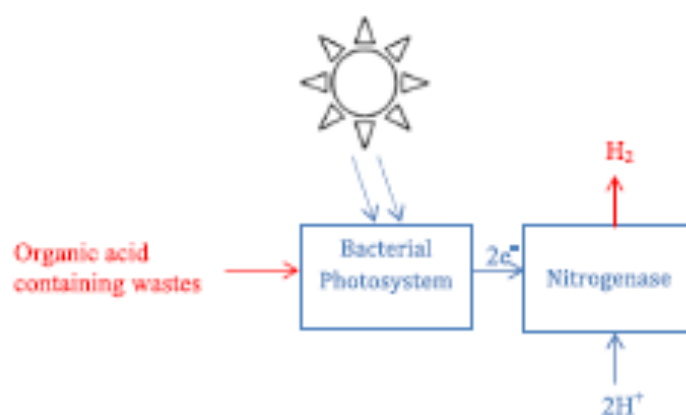
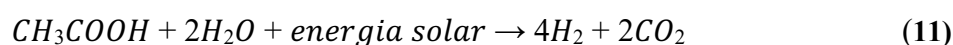


Figura 3.7: Processo Foto Fermentação para produção de hidrogênio. Adaptado: [5].

3.3.2.3 Fermentação escura

Este processo de fermentação é realizado por bactérias anaeróbias em substratos ricos em carboidratos e algas verdes num ambiente na ausência de energia solar [13]. As fontes de carbono para o processo de fermentação preferencial é a glicose que dão origem a ácido acético e butírico [15]. Este processo pode ocorrer com presença ou ausência de oxigênio com a formação de dióxido de carbono, hidrogênio, acetona e outros álcoois [13]. De acordo com as reações, 1 mol de glicose produz 4 mol de hidrogênio, 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 [13, 15].

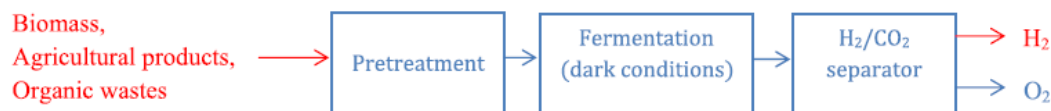


Figura 3:8: Processo Fermentação Escura para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

À medida que as concentrações de hidrogénio aumentam, este tem de ser removido, pois caso contrário levaria a um aumento de pressão e uma consequente diminuição da sua síntese [5, 15]. Este método é relativamente simples e não necessita de energia solar, podendo haver a produção constante durante a totalidade do dia [5].

3.3.3 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 está energia resultar de energias renováveis, então a produção de hidrogénio será livre de emissões de carbono [5].

3.3.3.1 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, consequentemente o hidrogénio verde no final do mesmo [5, 15].

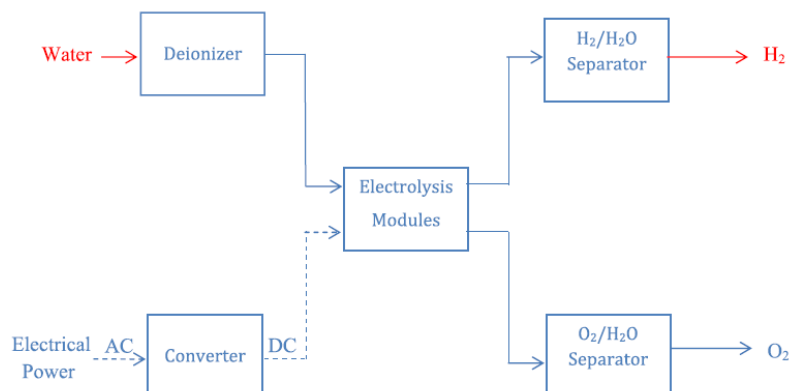


Figura 3:9: Estágios do eletrólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

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 3.10 [15, 18]. O oxigénio gerado pode ser libertado na atmosfera ou utilizado como gás em hospitais ou indústrias. Por outro lado, o hidrogénio é armazenado como gás comprimido ou liquefeito para utilização industrial ou em pilhas de combustível [18].

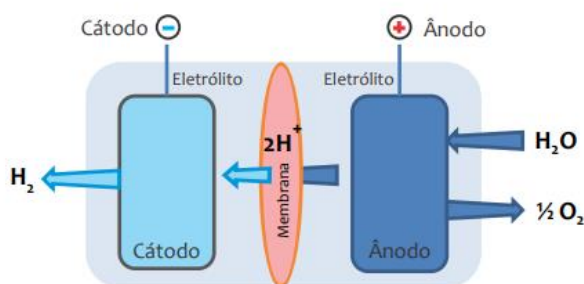


Figura 3.10: Esquema simplificado de um eletrolisador. Adaptado: [19].

Existem vários tipos de eletrolisadores tais como o [5].

- 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 [18].

Os eletrolisadores PEM utilizam uma membrana de troca de protões de um eletrólito polimérico sólido, quando a corrente elétrica é aplicada, a água se decompõe em hidrogénio e oxigénio sendo que os protões de hidrogénio atravessam a membrana em direção ao cátodo formando hidrogénio gasoso. Estes eletrolisadores são fáceis de refrigerar e produzem hidrogénio com altos níveis de pureza, sendo os mais adaptados para ajustarem á variabilidade das energias renováveis [18].

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. Esse processo envolve a eletrólise do vapor de água, utilizando um eletrólito sólido cerâmico. No cátodo, os eletrões do circuito externo se combinam com a água, resultando na produção de gás hidrogénio e iões com carga negativa. Por outro lado, o oxigénio atravessa a membrana cerâmica e reage no ânodo, formando gás oxigénio e gerando eletrões para o circuito externo. Na Figura 3.11, podemos observar uma comparação entre os três tipos de eletrólitos [18].

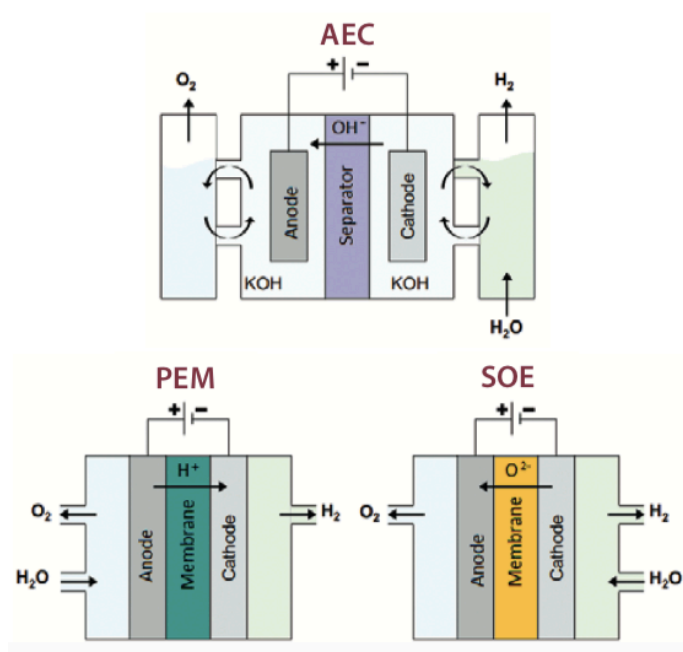


Figura 3:11: Comparação entre os eletrolisadores do tipo AEC, PEM, SOEC. Adaptado:[20].

3.3.3.2 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 [5].

A necessidade de atingir temperaturas elevadas pode ser atingida pela utilização de energia nuclear ou obtida através de coletores solares [5].

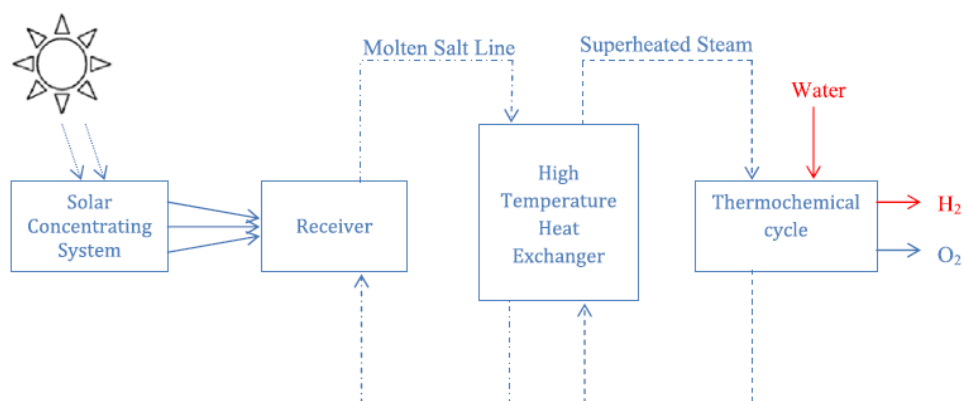


Figura 3:12: Estágios do processo de termólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

3.3.3.3 Foto eletrólise

A foto eletrólise é um processo em que a energia solar é capturada com a ajuda de alguns foto catalisadores permitindo a decomposição da água em hidrogénio e oxigénio. Na foto eletrólise os materiais semicondutores absorvem a energia solar e o processo de dissociação da água ocorre de maneira análoga com o processo de eletrólise [5].

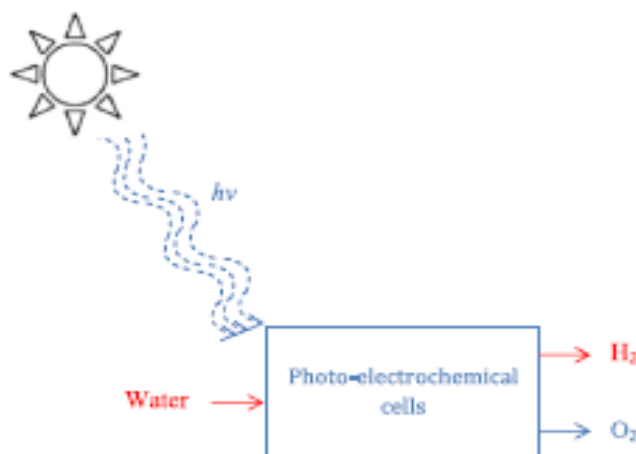


Figura 3:13: Estágios do processo de foto eletrólise para produção de hidrogénio. Adaptado: [5].

3.4 Armazenamento do hidrogénio

A utilização do hidrogénio irá ganhar uma nova relevância nos próximos tempos na UE [21] sendo utilizado como combustível e vetor energético de modo a cumprir as metas tanto na proteção ambiental como no crescimento económico [5].

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 o uso das células de combustível aumente e substitua os motores a combustão visto que, alteram a energia química do hidrogénio em energia elétrica sendo que, o exclusivo 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 [22].

O hidrogénio tem uma alta densidade energética por massa e baixa densidade energética por volume [13], fazendo com que, em sistemas de armazenamento móveis sejam importantes as capacidades gravimétricas e volumétricas do sistema [22].

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 [22].

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

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

3.4.1.1 Sistema de armazenamento no estado gasoso

O sistema de armazenamento mais instituído é o que armazena o hidrogénio como gás pressurizado [5], o hidrogénio tem uma densidade muito baixa de $0,089\text{kg/m}^3$, o que requer pressões muito altas para o seu armazenamento [22].

Para comprimir o hidrogénio de modo a armazená-lo é necessário utilizar pressões até 77 MPa, utilizando para isso compressores mecânicos (tipo pistão) [13], as células de combustível necessitam que o hidrogénio seja pressurizado a pressões entre os 35 e 70 MPa. Estima-se que pressurização do hidrogénio leva a uma perda de 11 a 13 % do seu conteúdo energético [22]. 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 [22].

Atualmente, existem tecnologias em desenvolvimento que permitem o armazenamento de grandes quantidades de hidrogénio em cavidades subterrâneas com pressões até 200 bar (20 MPa) [19].

3.4.1.2 Sistema 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 [22]. O hidrogénio líquido pode ser armazenado em reservatórios criogénicos no estado líquido ($-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), à pressão atmosférica ou segundo um processo de duas etapas, compressão e liquefação (arrefecimento) utilizando um permutador de calor [5]. O hidrogénio armazenado neste estado tem uma densidade de aproximadamente 71 g/L no seu ponto de ebulição de ($-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esta densidade é cerca de 1,8 vezes a densidade do hidrogénio pressurizado a $690,69\text{ atm}$ e ($14,85\text{ }^{\circ}\text{C}$) 288 K . 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 [22].

Para reduzir a perda de calor, os recipientes de armazenamento possuem bons sistemas de isolamento e parede dupla [22]. Os recipientes de armazenamento criogénicos são mais leves e compactos que os de hidrogénio gasoso comprimido, sendo assim mais seguros [22].

3.4.1.3 Sistema 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 [22]. 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 potencial gravimétrico e volumétrico [22].

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 [13, 22].

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 reversivelmente libertado sempre que necessária à sua utilização através de estimulação térmica [5, 22]. Os nanotubos em carbono permitem armazenar o hidrogénio a baixas temperaturas (-196,15 °C) e pressões (59,05 atm) [5]. 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 3.14 [22]. Os hidretos metálicos são compostos formados pela reação de metais ou ligas metálicas com hidrogénio, resultando na formação de hidretos sólidos. Eles são reconhecidos por sua capacidade de armazenar hidrogénio de forma segura e eficiente. Metais de transição, como o magnésio, podem formar hidretos que armazenam hidrogénio em densidades volumétricas significativas. Por exemplo, o hidreto de magnésio é capaz de armazenar até 7,6% em peso de hidrogénio. No entanto, a liberação de hidrogénio desses materiais geralmente requer temperaturas elevadas, o que pode limitar sua aplicação prática [5].

Os hidretos complexos, como os boro hidretos e alanatos, são compostos nos quais o hidrogénio está ligado a metais leves, como lítio, sódio ou alumínio, formando estruturas cristalinas complexas. Por exemplo, o boro hidreto de sódio e o alanato de lítio são estudados por sua alta capacidade de armazenamento de hidrogénio. Contudo, a reversibilidade desses materiais, ou seja, a capacidade de absorver e liberar hidrogénio de forma cíclica, ainda enfrenta desafios significativos, como a necessidade de condições severas para a liberação de hidrogénio e a degradação do material após múltiplos ciclos [62].

Os LOHCs são compostos orgânicos líquidos que podem absorver e liberar hidrogénio através de reações químicas reversíveis. Um exemplo é o sistema tolueno/metilciclohexano, onde o tolueno é hidrogenado para formar metilciclohexano, armazenando hidrogénio, e posteriormente desidrogenado para liberar hidrogénio quando necessário. Este método permite

o armazenamento de hidrogénio em condições ambientais moderadas, facilitando o transporte e manuseio. No entanto, as reações de hidrogenação e desidrogenação geralmente requerem catalisadores específicos e temperaturas elevadas, o que pode impactar a eficiência energética do processo [63].

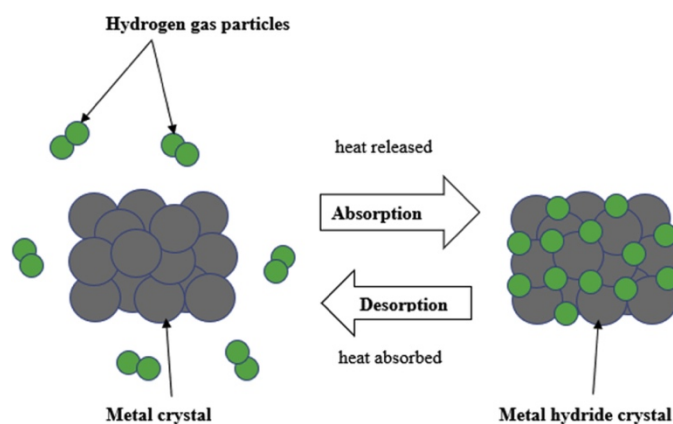


Figura 3:14: Modelo simplificado de um hidreto metálico. Adaptado: [22].

3.5 Distribuição de 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 3.15 [23]. 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 [24].

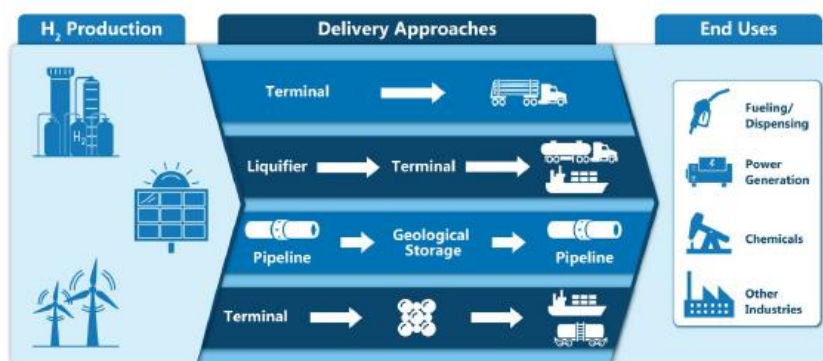


Figura 3:15: Métodos de transporte de hidrogénio. Adaptado: [23].

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. Contudo, devido às características únicas do hidrogénio, como a menor densidade, a maior difusividade e a tendência de causar fragilização em materiais metálicos, essas redes podem necessitar de modificações significativas quando utilizadas para transportar percentagens mais elevadas de

hidrogénio. Essas adaptações incluem a substituição de materiais suscetíveis à fragilização, como certos aços, por alternativas mais resistentes, bem como o uso de revestimentos internos que minimizem fugas e aumentem a durabilidade da rede.

Além disso, os sistemas de compressão e válvulas podem precisar ser atualizados para lidar com as pressões necessárias ao transporte eficiente de hidrogénio. Em situações em que essas adaptações são inviáveis, uma estratégia alternativa é o loteamento ("blending"), que consiste em misturar o hidrogénio ao gás natural em proporções controladas, permitindo sua utilização em infraestruturas existentes com poucas ou nenhuma modificação. Já para distâncias curtas, de até 200 km, e pequenas quantidades de hidrogénio pressurizado (até 200 bar), o transporte é geralmente feito por camiões com estruturas individuais de armazenamento[24].

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 900 km [24, 25]. 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[24, 25]. 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 que consome muita energia e que reduz em cerca de 30 % o seu conteúdo energético[22, 24].

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 como 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 20% de hidrogénio [25, 26].

As condutas são uma opção em grandes quantidades e distâncias, sendo já utilizadas em rede para fornecer refinarias e estações químicas, em território europeu [24]. 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 tão 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 [26].

3.6 Aplicações de hidrogénio

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 [19]. A utilização de fontes de energia renovável para a obtenção de hidrogénio é um fator fundamental para a descarbonização, por exemplo a siderurgia é uma das maiores emissoras de CO_2 devido ao uso intensivo de carvão coque no processo de redução do minério de ferro. Uma solução emergente é o uso de hidrogénio verde como agente redutor, tecnologia que elimina as emissões de carbono associadas ao processo tradicional de alto-forno. Além disso, o uso de fornos de arco elétrico alimentados por energia renovável pode complementar essa transição, tornando o setor mais sustentável.

O hidrogénio pode ser utilizado como combustível em diversos dispositivos, de modo a obter energia elétrica, mecânica ou térmica como apresenta a Figura 3.16 [27].

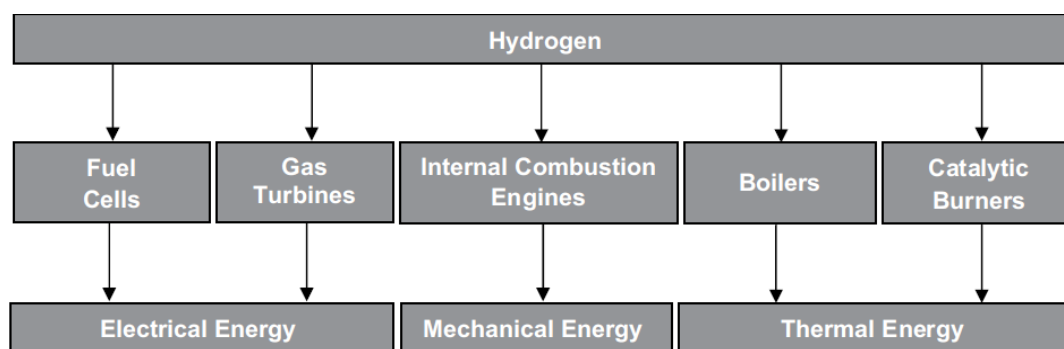


Figura 3.16: Aplicações do hidrogénio. Adaptada: [27].

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 [21, 27]. 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 [26].

Na indústria automóvel, o hidrogénio pode ser diretamente utilizado como combustível em motores de combustão interna ou em células de combustível [26].

3.6.1.1 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 [23, 26]. O processo é o inverso da eletrólise visto que, requiere o fornecimento contínuo de combustível (hidrogénio), para manter uma reação eletroquímica e produzir um fluxo de elétrons num circuito externo, ou seja, a corrente elétrica, sendo os subprodutos resultantes a água e algum calor [19, 28].

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 3.17. 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 eletrões do átomo de hidrogénio formando iões positivos. O eletrólito promove o deslocamento de iões do ânodo para o cátodo, mas bloqueia a passagem dos eletrões que são forçados a seguirem o circuito exterior a célula, gerando a corrente elétrica. Quando os iões de hidrogénio chegam ao cátodo, eles combinam-se com os eletrões que retornam do circuito externo, com os átomos de oxigénio fornecidos do cátodo formando água [19, 28].

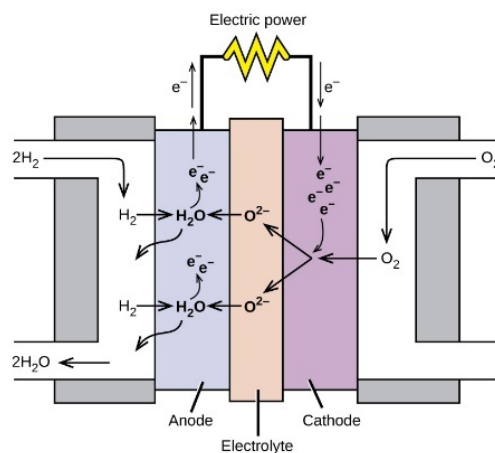


Figura 3.17: Diagrama de uma célula de combustível. Adaptado: [28].

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 combustíveis são montadas em série de modo a aumentar a tensão elétrica [29]. 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 [29].

3.6.2 Tipos de células de combustível

3.6.2.1 Célula de combustível alcalina ("*alkaline fuel cell*")

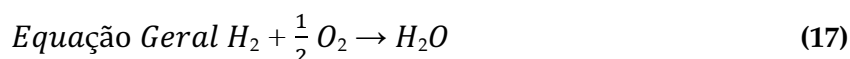
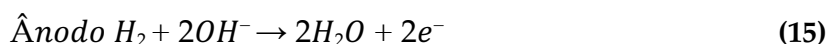
As células eletrolíticas alcalinas aquosas de baixa temperatura têm a vantagem de serem capazes de iniciar facilmente a frio e operar geralmente a 60-80 °C, onde a pressão de vapor de água do eletrólito é apropriadamente alta para uma taxa de remoção controlada. Nessas temperaturas, são necessários catalisadores altamente ativos, geralmente da família da platina. Prata e níquel de alta superfície têm sido usados, no entanto, como catalisadores nesses sistemas; O níquel é convencionalmente usado como material estrutural condutor.

Catalisadores mais baratos normalmente requerem temperaturas de operação mais altas; a célula de Bacon é um exemplo de catalisador de níquel usado a 200-250 °C. Nessas temperaturas, uma alta pressão deve ser aplicada ao sistema ou soluções altamente concentradas

devem ser usadas para evitar a perda de água. Os sistemas de alta pressão não são adequados para operação a ar, devido à alta energia de bombeamento necessária, enquanto a alta concentração pode causar corrosão, o que restringe a escolha dos materiais de construção.

A intolerância desse tipo de célula ao dióxido de carbono é um grande problema; restringe a escolha do combustível ao hidrogênio puro da hidrazina e exige que o filtro de ar remova 0,04% do CO₂ presente no ar. A célula de reforma interna é uma tentativa de se livrar desse problema: o eletrodo de combustível é feito de paládio mais prata, e o combustível é álcool ou um hidrocarboneto que é reformado com vapor em um catalisador de níquel em um lado do eletrodo. O hidrogênio formado passa pelo eletrodo e reage com o eletrólito, mas o paládio impede que o CO₂ passe e entre no eletrólito [30].

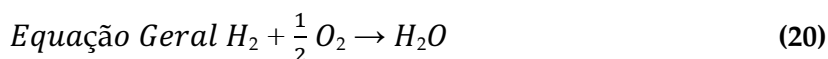
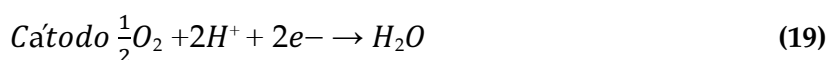
Reações na célula de combustível alcalina [30]:



3.6.2.2 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 [29, 31].

Reações na célula de combustível de ácido fosfórico [30]:



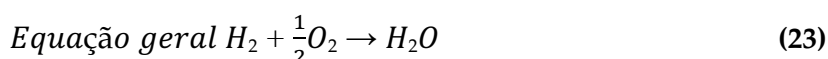
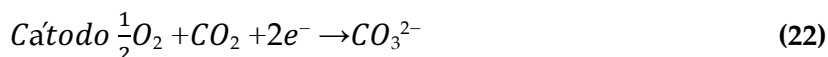
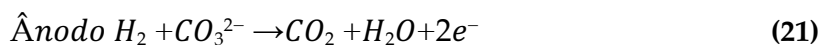
3.6.2.3 Células de combustível de carbonatos fundidos ("*molten carbonate fuel cell*")

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 [29, 31].

Neste tipo de células, devido a 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 [29, 31].

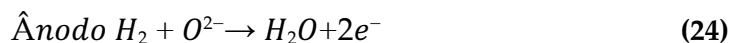
Reações na célula de combustível de carbonatos fundidos [30]:



3.6.2.4 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 óxido metálico, sólido e não poroso, normalmente dióxido de zircónio estabilizado com óxido de ítrio. Os materiais cerâmicos que estão presentes nesta célula envolvem custos elevados sendo necessários equipamentos extras para produzir energia elétrica [29, 31].

Reações na célula de combustível de óxido sólido [30]:

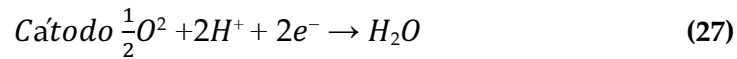


3.6.2.5 Células de combustível de membrana protónica (*"proton exchange membrane fuel cell"*)

Esta célula de combustível possui um eletrólito que é uma membrana de permuta iónica, formada por um polímero sólido que permite a passagem de protões 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 [29, 31].

Reações na célula de combustível de membrana protónica

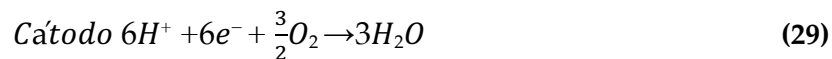
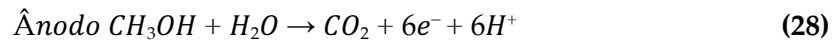




3.6.2.6 Células de combustível de metanol ("*direct methanol fuel cell*")

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 [31].

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, como apresentado na figura 3.18[32]. 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 [32].

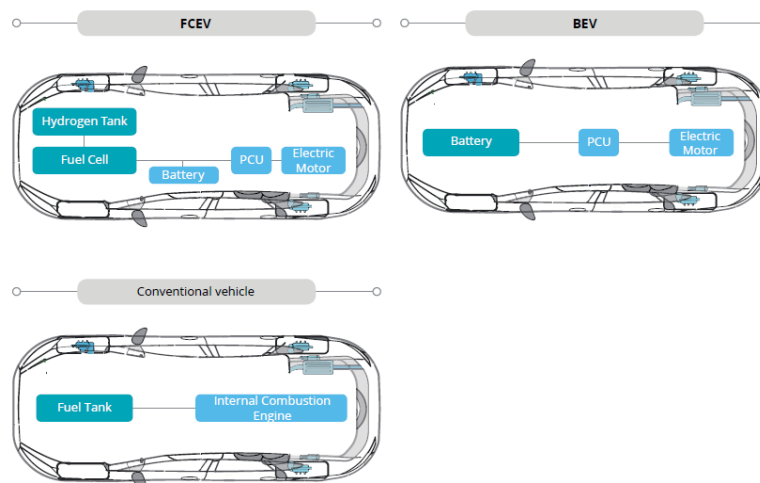


Figura 3:18: Sistema de propulsão em veículos a motor. Adaptado: [32].

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 3.19 [32]:

- 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 [32].

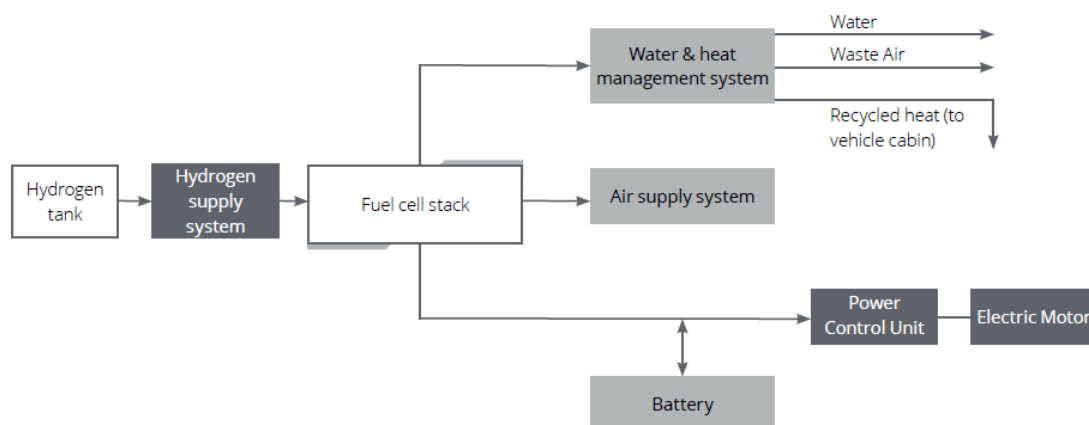


Figura 3:19: Princípio de operação de um FCEV. Adaptado:[32] .

Durante o funcionamento de um FCEV, o hidrogénio é convertido em energia elétrica sendo que depois esta é convertida em energia mecânica, como mostrado na Figura 3.20. O motor elétrico 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% [32].

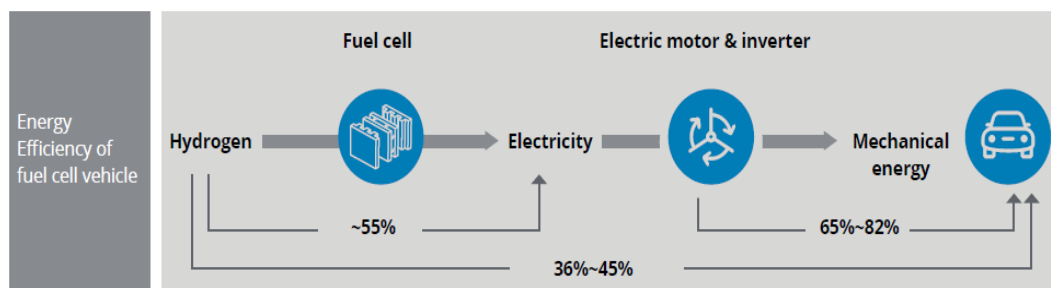


Figura 3:20: Eficiência energética de um FCEV. Adaptado: [32].

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) [33]. O hidrogénio possui um poder calorífico elevado, sendo necessárias adaptações ao motor de combustão interna para que este seja utilizado como combustível [34, 35, 36].

3.7 Estratégia europeia para o hidrogénio

O hidrogénio é visto como um elemento crucial para a descarbonização, podendo ser utilizado como matéria-prima, combustível ou como 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 [37, 38].

Atualmente o hidrogénio simboliza apenas uma pequena parcela do "mix" energético da União Europeia, com 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 CO₂ anualmente na UE. De modo que o hidrogénio seja solução para a neutralidade carbónica é fundamental 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 [37, 38].

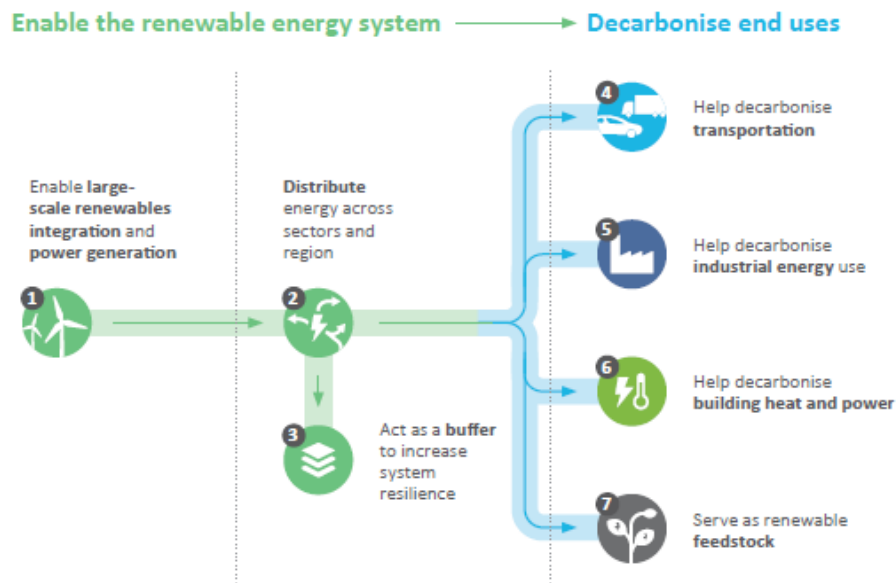


Figura 3:21: Diferentes formas de utilizar o hidrogénio para o processo de descarbonização. Adaptado: [39].

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 [37, 38].

3.7.1 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 [37].

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 [38]:

- Hidrogénio eletrolítico - Produção através da eletrólise da água sem depender da fonte elétrica renovável [38];
- Hidrogénio renovável - Produção através da eletrólise da água em que a fonte de energia elétrica é renovável [38];
- Hidrogénio limpo – Também denominado de hidrogénio renovável [38];
- Hidrogénio fóssil – Este tipo de hidrogénio é gerado a partir de processos que recorrem a combustíveis fósseis como insumo principal [38];
- Hidrogénio fóssil com captura de carbono – Trata-se de uma subcategoria do hidrogénio fóssil que incorpora a tecnologia de captura dos gases de efeito estufa gerados durante seu processo de produção [38];

- Hidrogénio hipocarbónico – Este termo abrange tanto o hidrogénio fóssil que utiliza captura de carbono quanto o hidrogénio eletrolítico[38] .

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 [37].

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 [12, 38]. Na economia do hidrogénio que a UE quer implementar, o hidrogénio limpo deve ser a sua base, sendo que o hidrogénio hipocarbónico terá um papel de transição visto que, o hidrogénio limpo ainda não é abundante e competitivo [37].

3.7.2 Metas e prazos

O objetivo da UE consiste em implementar o hidrogénio renovável usando preferencialmente energia eólica e solar no seu processo de produção através da eletrólise. Até ao ano de 2050, espera-se que hidrogénio renovável deve seja gradualmente implementado em larga 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 UE [38]. 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 [12].

1ª Fase: Entre 2020 e 2024, a meta é implantar uma capacidade eletrolítica mínima de 6 GW, possibilitando a produção de até 1 milhão de toneladas de hidrogénio renovável na União Europeia. Essa iniciativa visa iniciar a descarbonização da produção de hidrogénio fóssil em vários setores, incluindo o químico [12, 38]. Neste período será preciso aumentar a produção de eletrolisadores incluído os de grande dimensão (100 MW), que serão instalados em refinarias e complexos químicos de grande dimensão, preferencialmente alimentados a eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis [38].

De 2025 a 2030, o hidrogénio deve se tornar uma componente essencial do sistema energético europeu, com a meta de estabelecer uma capacidade eletrolítica de, no mínimo, 40 GW em território europeu até 2030. Essa capacidade instalada deverá possibilitar a produção de até 10 milhões de toneladas de hidrogénio renovável na União Europeia [12, 38]. Prevê-se que o hidrogénio renovável se torne progressivamente mais competitivo em termos de custos em

comparação com outras formas de produção. Assim, o hidrogénio renovável terá um papel importante no sistema elétrico com base em origem de energia renováveis. Quando existir abundância de energia elétrica vindo de origem 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 [38].

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 formação de uma rede de estações de abastecimento de hidrogénio. A rede de gás natural que existe poderá ser uma solução pois se for sujeita a adaptações permitirá transportar hidrogénio em distâncias longas de acordo com a Figura 3.22 [39].



Figura 3.22: Infraestrutura de transporte gás natural na Europa (linhas azuis e vermelhas) e novas infraestruturas de transporte de hidrogénio (linhas laranjas). Adaptado:[39].

2ª Fase: A segunda fase decorrerá partir do ano de 2030 até ao de 2050, neste período espera-se que a tecnologia de produção de hidrogénio renovável alcance a maturidade e que estejam implantadas em larga escala em todos os sectores, inclusive nos de difícil descarbonização [12].

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 [12].

Como apresentado na Figura 3.23, 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, 675 TWh 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, 237 TWh

em energia na indústria e 112 TWh na produção de energia [12, 40]. Atingir estes valores permitiria à UE reduzir cerca de 560 milhões de toneladas de CO₂ até 2050 [12] .

No panorama mais conservador, prevê-se que no ano de 2050, o hidrogénio represente 8 % da procura de energia correspondendo a 780 TWh, demonstrado na figura 3.23. 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, 1 TWh em nova matéria-prima industrial, 53 TWh em energia na indústria e 43 TWh na produção de energia [40].

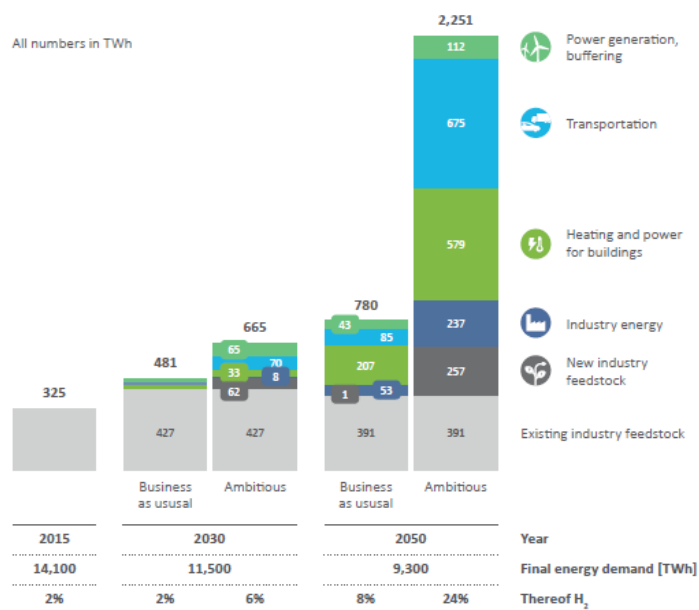


Figura 3.23: Desenvolvimento do hidrogénio na UE. Adaptado: [40].

3.7.3 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 [38].

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 120 GW) 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 [38].

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 40 GW de hidrogénio renovável e 5 Mt de hidrogénio hipocarbónico até 2030, e ainda 500 GW de capacidade eletrolítica até 2050 [38].

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 [41, 42, 43].

3.7.4 Setor do transporte

O setor dos transportes emite cerca de 32 % das emissões de GEE 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 [40].

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 [22]. 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, gases de petróleo liquefeito (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 [40].

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 [19, 40, 44].

Comparação para uma autonomia de 500 km

Sistema de armazenamento de energia	Diesel	Hidrogénio comprimido a 700 bar 6 kg H ₂ = 200 kWh de energia química	100 kWh de energia elétrica Bateria de íões de lítio
Peso do sistema de armazenamento de energia	43 kg	125 kg	830 kg
Peso do combustível / baterias	33 kg	6 kg	540 kg
Peso do sistema de armazenamento de energia	46 L	260 L	670 L
Peso do combustível / baterias	37 kg	170 L	360 L

Figura 3:24: Comparação de diversos sistemas de armazenamento para uma autonomia de 500km. Adaptado: [19].

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 [45].

A infraestrutura de abastecimento do hidrogénio possui algumas vantagens em relação as 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 [40, 46].

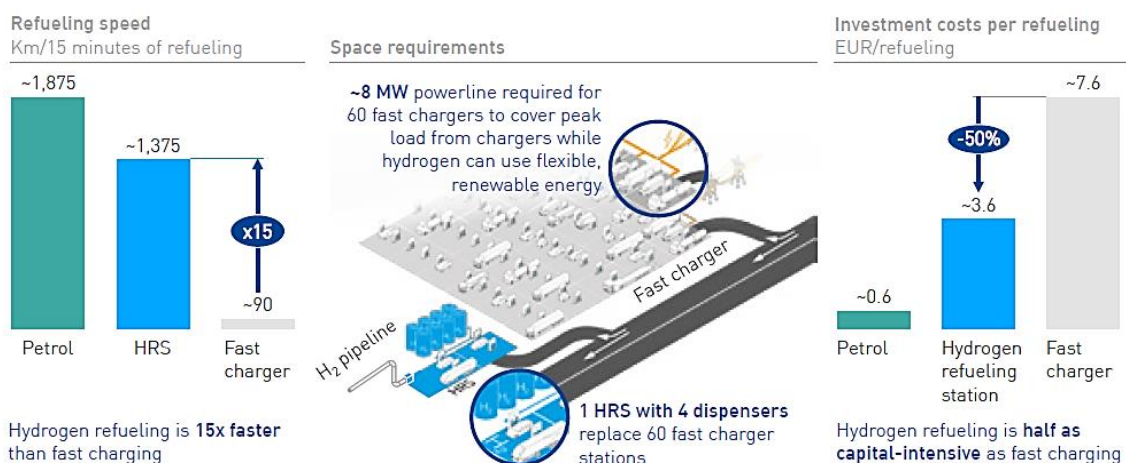


Figura 3:25: Velocidade de abastecimento, requisitos de espaço e abastecimento. Adaptado: [40].

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 [40, 46]. 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 [40].

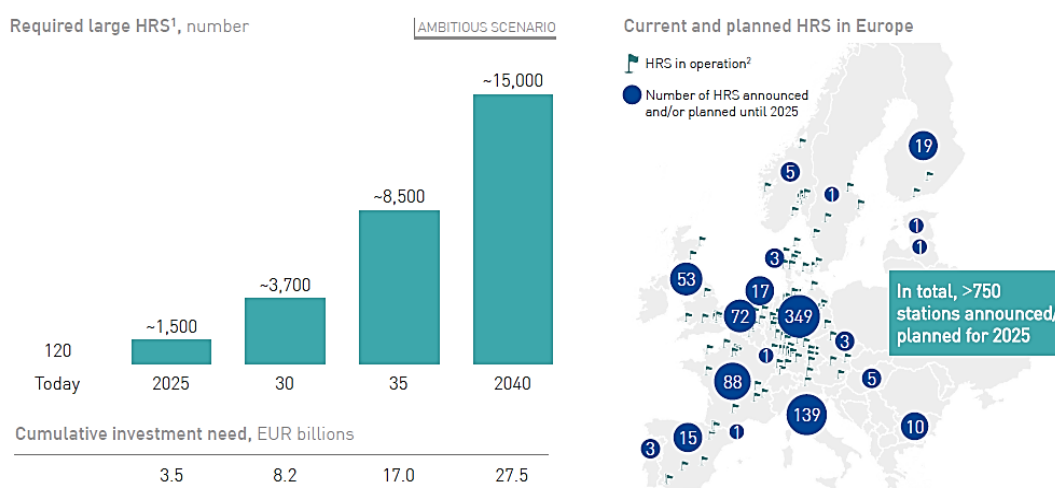


Figura 3:26: Futuros postos de abastecimento de hidrogénio. Adaptado:[40].

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 [32].

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 [32, 40].

3.8 Estratégia portuguesa para o hidrogénio

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, tendo sido criado o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) [47, 48, 49].

De acordo como RNC2050, para se atingir a neutralidade carbónica tem de 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 CO₂ [47, 48, 49].

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 desempenha 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 [47, 48, 49].

3.8.1 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 á 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 [48].

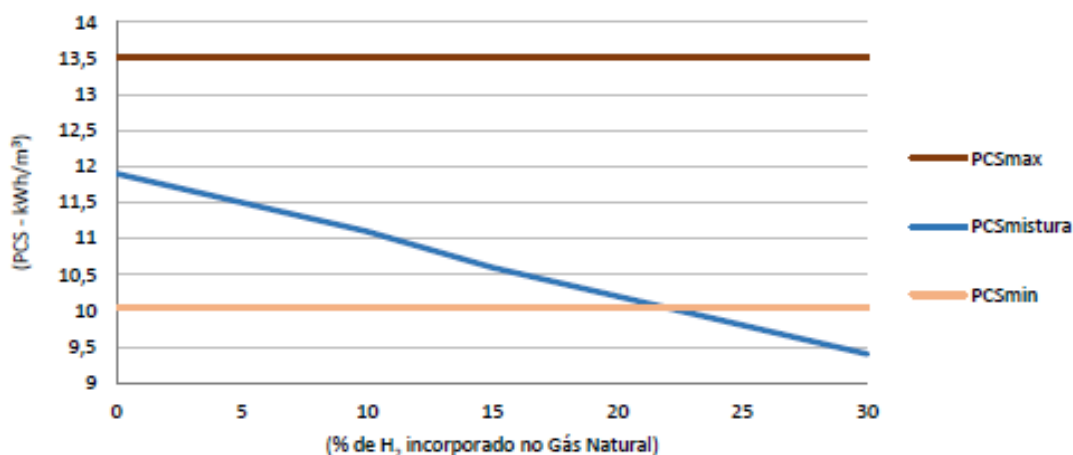


Figura 3.27: Evolução do PCS do gás em função a incorporação de hidrogénio. Adaptado: [48].

De momento, a legislação ainda não permite introduzir hidrogénio na rede de gás natural. Como podemos ver na Figura 3.27, 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 [48].

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 [50].

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 [51].

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 [47];
- Descarbonizar o sector da indústria química que tem um peso elevado nas emissões de gases com efeito de estufa [47];
- Utilização de águas residuais para a produção de hidrogénio verde através da eletrólise [47];
- Implementar um laboratório colaborativo de investigação e desenvolvimento das tecnologias relacionadas com o hidrogénio [47].

Na figura 3.28 podemos ver as fontes potenciais de água para o processo de produção hidrogénio através da eletrolise e qual o tratamento necessário para que essas fontes de água possam ser utilizadas.

Fonte potencial de água	Principais poluentes e parâmetros de qualidade da água	Operações de tratamento necessárias antes da eletrólise
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.

Figura 3:28:Fontes potenciais de água para eletrólise e opções de tratamento necessárias. Adaptado: [47].

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 [47, 48, 52].

3.8.1.1 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, como demonstrado na figura 3.29. 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 [48].



Figura 3:29: Localização estratégica de Sines. Adaptado:[48].

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, como podemos ver na figura 3.30 [47].

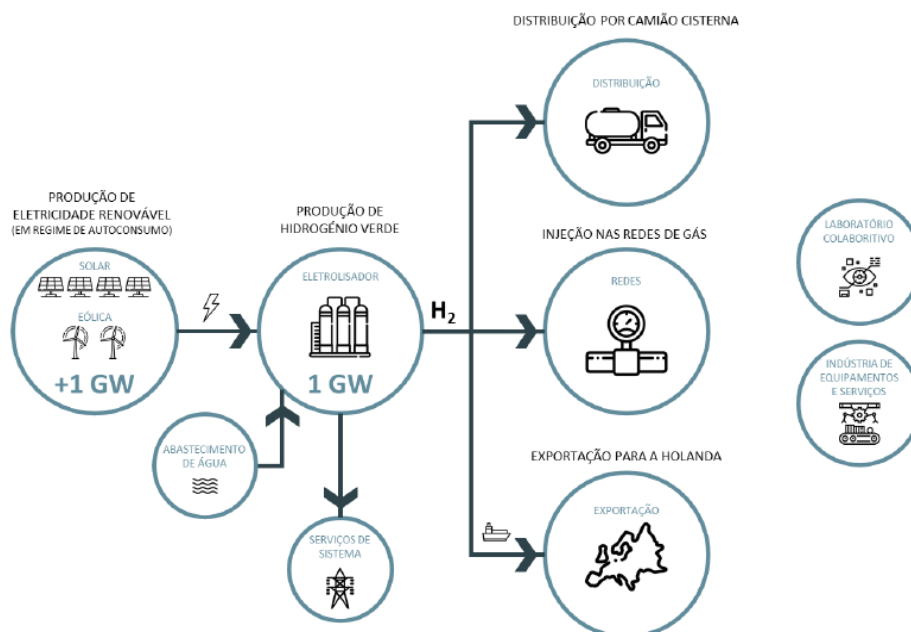


Figura 3:30: Composição do projeto de produção de hidrogénio verde á escala industrial em Sines. Adaptado:[48].

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 Baixes), ao abrigo do memorando assinado entre os dois países. Inicialmente, espera-se que o hidrogénio produzido seja utilizado na totalidade em Portugal, e á medida que a capacidade de produção aumenta, a exportação irá ganhar mais preponderância, como mostra na figura 3.31. A exportação de hidrogénio verde para os Países Baixos servirá como alavanca para outras parcerias com países vizinhos, contribuindo para a economia de hidrogénio verde na UE, e consolidando assim, a estratégia europeia para atingir a neutralidade carbónica [48].

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 [48].

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 ₂ . 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 ₂ e otimizada para maximizar a produção ao mais baixo custo possível.
	PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO	Produção de H ₂ verde. Inclui o desenvolvimento, construção e operação da unidade de produção de H ₂ 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 ₂ , podendo incluir o aproveitamento e reconversão de ativos de gás natural para H ₂ .
	EXPORTAÇÃO	Construção, supervisão e operação de infraestruturas associadas à logística de exportação de H ₂ , que inclui a infraestrutura necessária para a conversão de H ₂ para o transporte por via marítima (ex.: H ₂ liquefeito ou comprimido, amónia, LOHC ²⁴ , entre outros).
OUTRAS ÁREAS	MERCADO NACIONAL	Dinamização de um mercado competitivo, nível nacional e europeu, para a comercialização de H ₂ 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.

Figura 3:31:Estrutura preliminar para a execução do projeto de Sines. Adaptado: [48].

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 [48, 53, 54, 55, 56].

3.8.1.2 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 [48, 57].

3.8.1.3 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, como ilustrado na figura 3.32. 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 [48, 58, 59]. 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 provinda da rede nacional com certificados de origem e garantia [48, 60].



Figura 3:32: Central termoelétrica da Tapada do Outeiro. Adaptado: [60]

3.8.1.4 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 [48]. Até ao ano de 2030, Portugal prevê ter instalados 50 a 100 postos de abastecimento a hidrogénio [61].

3.8.2 Fases, metas e objetivos

A estratégia portuguesa para o hidrogénio divide-se em três (Figura 3.33) [47]:

- 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 [47];
- Fase 2: decorrerá de 2024 a 2030 e prevê uma consolidação do enquadramento dos projetos a nível nacional, em várias dimensões da cadeia de calor [47];
- 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[47] ;

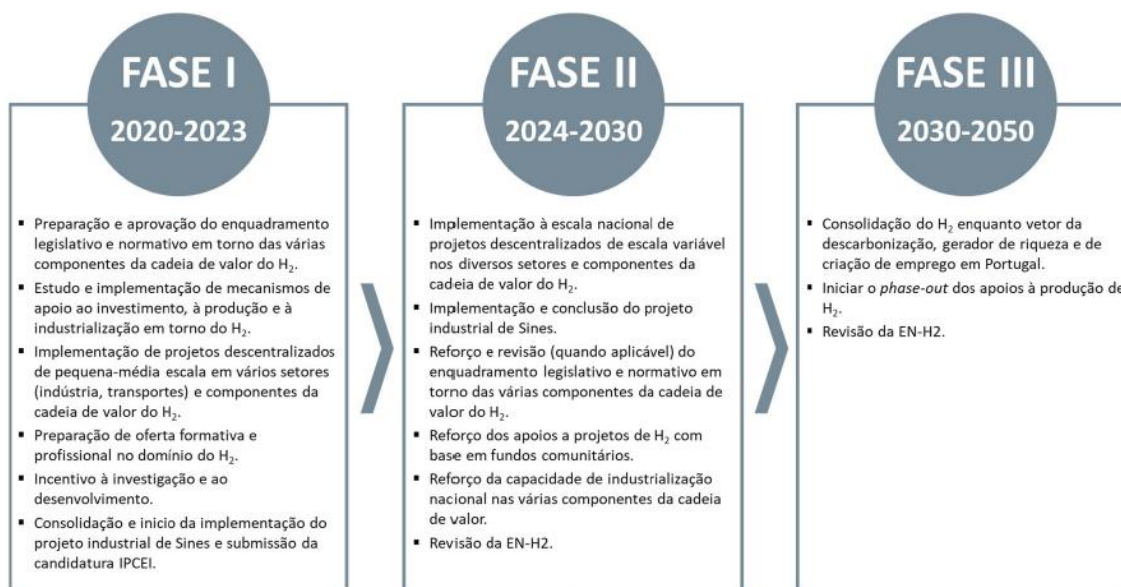


Figura 3:33: Fases de implementação do EN-H2. Adaptado: [47]

Até ao ano de 2050, é necessária a descarbonização de diversos sectores, nomeadamente descarbonizar toda a rede de gás natural, as centrais termoelétricas a gás natural, o sector dos transportes e da indústria com a complementação de eletricidade de origem renovável. Na Figura 3.29 podemos ver a incorporação de hidrogénio em diversos setores [48].

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 um dos transportes apresentado na figura 3.34, 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 2,5 GW até 2030 [48].

	2025	2030	2040	2050
 H ₂ NA REDE DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL ²⁰	1% - 5%	10% - 15%	40% - 50%	75% - 80%
 H ₂ NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL ²¹	1% - 5%	10% - 15%	40% - 50%	75% - 80%
 H ₂ NO CONSUMO DA INDÚSTRIA ²²	0,5% - 1%	2% - 5%	10% - 15%	20% - 25%
 H ₂ NO CONSUMO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO	0,1% - 0,5%	1% - 5%	5% - 10%	20% - 25%
 H ₂ NO TRANSPORTE MARÍTIMO DOMÉSTICO	0%	3% - 5%	10% - 15%	20% - 25%
 H ₂ NO CONSUMO TOTAL FINAL DE ENERGIA	1% - 2%	2% - 5%	7% - 10%	15% - 20%
 H ₂ NAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS A GÁS NATURAL	1% - 5%	5% - 15%	40% - 50%	75% - 80%
 CAPACIDADE PARA PRODUÇÃO DE H ₂	250 - 500 MW	1,75 - 2 GW	3 GW	5 GW
 CAPACIDADE PARA PRODUÇÃO DE H ₂ UPP ²³ (<5 MW)	50 MW	100 MW	250 MW	500 MW
 N.º DE PONTOS DE ABASTECIMENTO	10 - 25	50 - 100	500 - 700	1000 - 1500

Figura 3.34: Proposta de metas e objetivos de incorporação, em volume, de hidrogénio nos vários setores. Adaptado: [48].

3.8.3 Cadeia de valor do 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, como ilustrado na figura 3.35 [5].

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 [47].

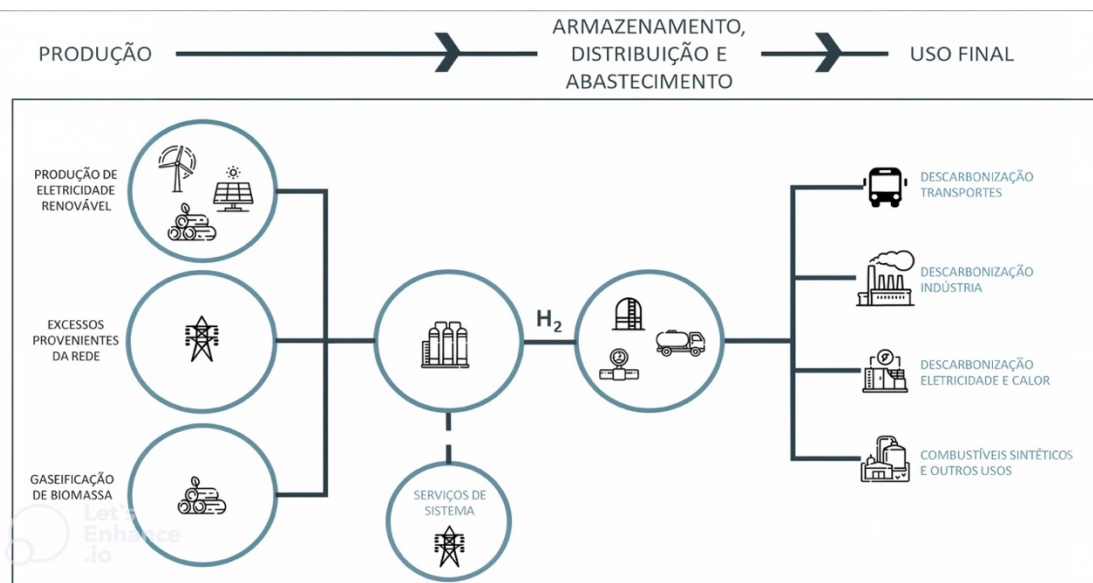


Figura 3:35: Esquema da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção á utilização final. Adaptado: [47].

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 pode ser injetado, em determinadas proporções, diretamente na rede de gás natural ou ser transformado em metano sintético através de um processo conhecido como metanação (ver figura 3.36). Esta cadeia de valor visa descarbonizar a rede de gás natural por meio da adição de uma mistura de gases renováveis com o gás natural convencional. Existem duas abordagens principais nesta cadeia, que envolvem o uso de hidrogénio, obtido via eletrólise, e metano, produzido através da metanação [48] .

A percentagem de hidrogénio que pode ser injetada na rede de gás natural é limitada pelas especificações dos equipamentos finais e pelas características da própria rede. A adoção desta cadeia de valor possibilita a conversão de eletricidade em gases, facilitando o armazenamento de energia, além de permitir o uso de uma infraestrutura de gás natural já existente, o que ajuda a reduzir os custos de investimento e a promover a descarbonização. Em Portugal, já existem projetos em andamento ou em fase de desenvolvimento nessa área, incluindo a construção de uma central solar para a produção de hidrogénio e estudos de viabilidade para a injeção deste gás na rede de gás natural [19, 48, 52].

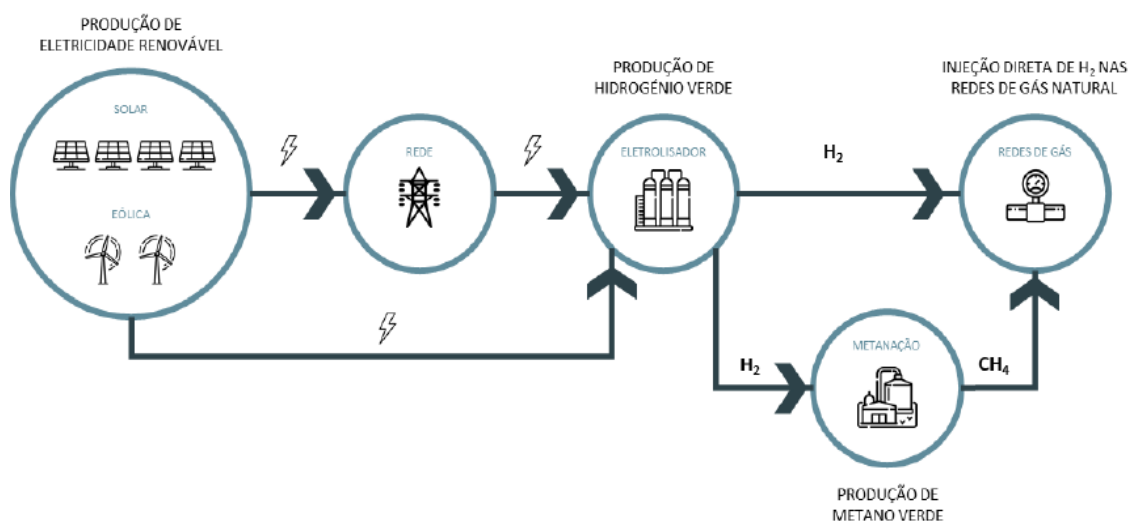


Figura 3.36: Esquema da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção á utilização final. Adaptado: [48].

Power-to-Mobility (P2M): O hidrogénio pode ser produzido localmente ou transportado para abastecer postos de combustível para veículos. Esta cadeia de valor está relacionada à mobilidade e ao setor de transportes, fundamentando-se na utilização de células de combustível em veículos pesados, de passageiros e em ferrovias não eletrificadas, ver figura 3.37. A infraestrutura de abastecimento desempenha um papel crucial nesta cadeia, e já existem diversos projetos em andamento voltados para o fornecimento de hidrogénio a veículos ligeiros e pesados, conectados a centros de logística, frotas de transporte e navios de cruzeiro que utilizam hidrogénio verde [19, 48, 52].

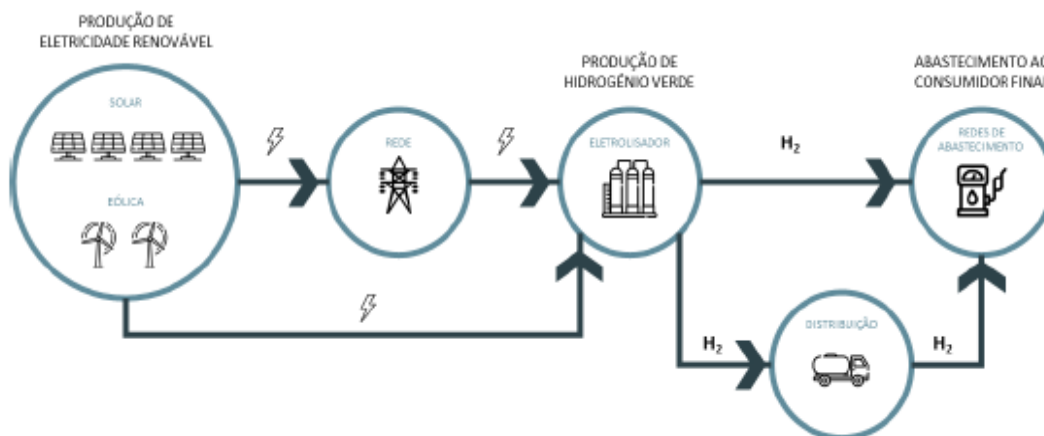


Figura 3.37: Esquema da cadeia de valor P2M. Adaptado:[48].

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, ver figura 3.38. 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 [19, 48, 52].

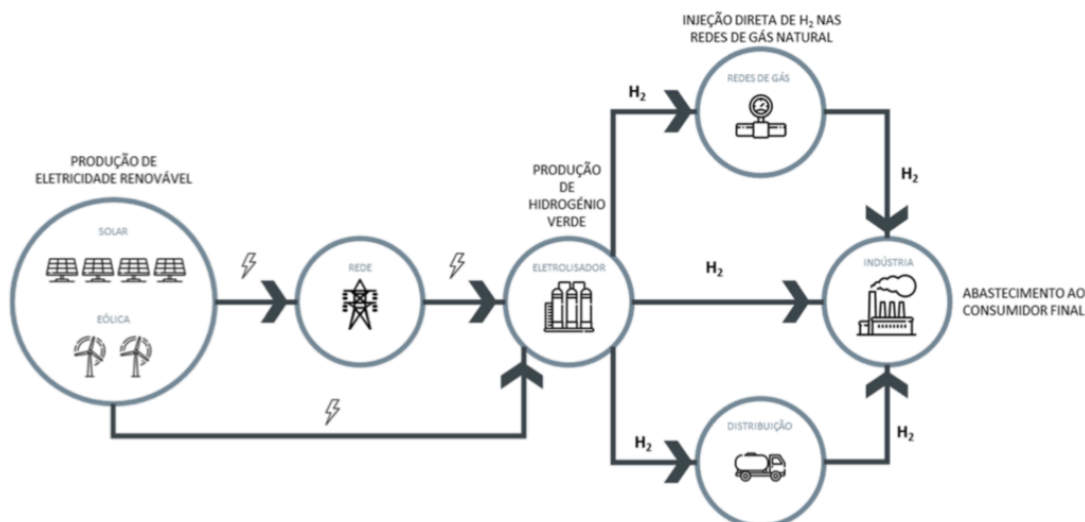


Figura 3:38:Esquema da cadeia de valor P2I. Adaptado:[48].

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, ver figura 3.39. A 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 [19, 48, 52].

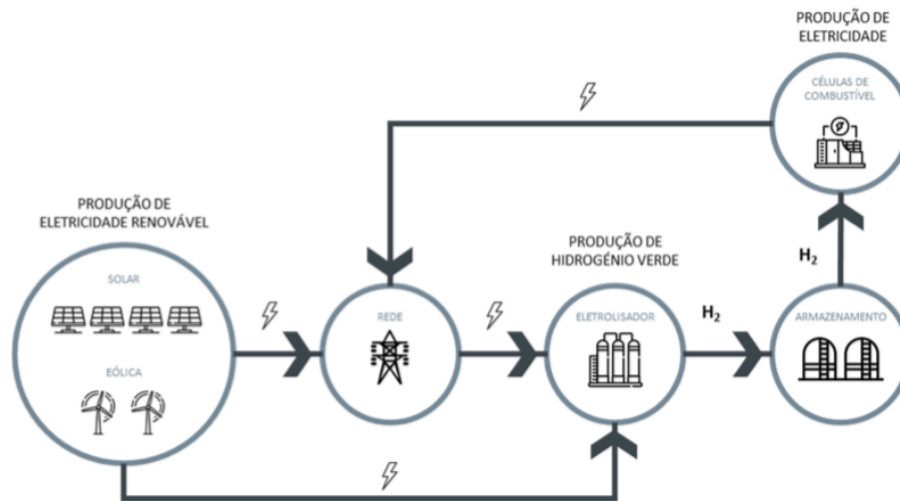


Figura 3:39:Esquema da cadeia de valor P2P. Adaptado: [48].

Power-to-Synfuel (P2Fuel): a utilização de hidrogénio verde tem potencial para des-carbonizar 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 á escala industrial para utilização no sector da aviação com base em hidrogénio verde [19, 48, 52].

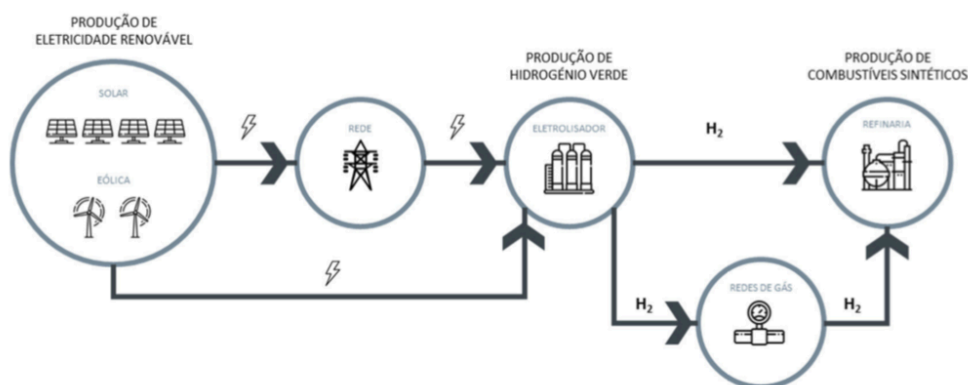


Figura 3:40:Esquema da cadeia de valor P2F.Adaptado: [48].

CONCLUSÕES

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

- [1] S. Leal Braga, F. Pradelle, A. C. Chaves, and C. Chantre, “Nivalde de Castro | A Economia do Hidrogênio Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil,” 2023. Accessed: Oct. 27, 2024. [Online]. Disponível: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf
- [2] AP2H2, “SOBRE O HIDROGÊNIO.” Accessed: Oct. 27, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.ap2h2.pt/sobre-h2.php>
- [3] ECycle, “O que é hidrogénio e quais suas características?” Accessed: Oct. 27, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.ecycle.com.br/hidrogenio/>
- [4] Hydrogen Properties, “Hydrogen Fuel Cell Engines MODULE 1: HYDROGEN PROPERTIES CONTENTS,” 2001. Disponível: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf
- [5] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, “A comparative overview of hydrogen production processes, Jan. 01, 2017, Elsevier Ltd. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- [6] Petrofac, “THE DIFFERENCE BETWEEN GREEN HYDROGEN AND BLUE HYDROGEN.” Accessed: Oct. 27, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.petrofac.com/media/stories-and-opinion/the-difference-between-green-hydrogen-and-blue-hydrogen/>
- [7] M. Yu, K. Wang, and H. Vredenburg, “Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 41, pp. 21261–21273, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>
- [8] J. R. C. Rey *et al.*, “Renewable Hydrogen from Biomass: Technological Pathways and Economic Perspectives,” Jul. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. <https://doi.org/10.3390/en17143530>
- [9] EDP, “As cores do hidrogénio: verde é a cor do futuro.” Accessed: Oct. 27, 2024. [Online]. Disponível : <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/cores-do-hidrogenio>
- [10] C. Acar and I. Dincer, “Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources,” Jan. 02, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.060>
- [11] I. Dincer, “Green methods for hydrogen production,” in *International Journal of Hydrogen Energy*, Jan. 2012, pp. 1954–1971. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- [12] G. Kakoulaki, I. Kougiyas, N. Taylor, F. Dolci, J. Moya, and A. Jäger-Waldau, “Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with

- electrolysis powered by renewables,” *Energy Convers Manag*, vol. 228, Jan. 2021.<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
- [13] R. Kumar, A. Kumar, and A. Pal, “An overview of conventional and non-conventional hydrogen production methods,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 5353–5359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.793>
- [14] B. Zhang, S. X. Zhang, R. Yao, Y. H. Wu, and J. S. Qiu, “Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges,” *Journal of Electronic Science and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 1–15, 2021.<https://doi.org/10.1016/J.JNLEST.2021.100080>
- [15] A. Pareek, R. Dom, J. Gupta, J. Chandran, V. Adepu, and P. H. Borse, “Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects,” *Mater Sci Energy Technol*, vol. 3, pp. 319–327, Jan. 2020.<https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.12.002>
- [16] D. C. , Pelegrin, “OXIDAÇÃO PARCIAL CATALÍTICA DO METANO PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE UTILIZANDO CATALISADORES SUPORTADOS EM FIBRAS DE FeCrAlloy®,” 2017.Disponível:<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/182881/349699.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] M. Alexandra Ferreira Nunes and D. Paula Alexandra Soares Marques Santino Eugénio Di Berardino, “Produção biológica integrada de Hidrogénio e Metano a partir de resíduos da Indústria do Biodiesel,” 2015.
- [18] IBERDROLA, “O que é um eletrolisador e por que é essencial para o fornecimento de hidrogénio verde?” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador>
- [19] Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), “O HIDROGÉNIO no Sistema Energético Português Desafios de Integração,” 2018.Disponível:<https://www.dgeg.gov.pt/media/3eshwqnl/p1-o-hidrogénio-no-sistema-energético-português.pdf>
- [20] E. Karatairi and S. Sartori, “Reviving hydrogen as an energy carrier,” Jun. 01, 2020, *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1557/mrs.2020.157>
- [21] S. Apak, E. Atay, and G. Tuncer, “Renewable hydrogen energy regulations, codes and standards: Challenges faced by an EU candidate country,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 7, pp. 5481–5497, Apr. 2012.<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.005>
- [22] J. O. Abe, A. P. I. Popoola, E. Ajenifuja, and O. M. Popoola, “Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation,” Jun. 07, 2019, *Elsevier Ltd*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- [23] U.S. Department of Energy (USDOE), “Department of Energy Hydrogen Program Plan,” 2020.Disponível:<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>

- [24] M. Ball and M. Weeda, "The hydrogen economy - Vision or reality?," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25, pp. 7903–7919, Jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032>
- [25] U.S. Department of Energy (USDOE)a, "HYDROGEN STRATEGY Enabling A Low-Carbon Economy," 2020.Disponível: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/USDOE_FE_Hydrogen_Strategy_July2020.pdf
- [26] S. N. , N. S. , V. D.-V. N. , N. T. D. , N. V.-H. , A. B. , & N.-T. P. Reddy, "Hydrogen: fuel of the near future. In New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen." 2020. Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128195536000015>
- [27] A. Yilanci, I. Dincer, and H. K. Ozturk, "A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications," Jun. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.07.004>
- [28] A. & M. P. Almeida, "Hydrogen and Fuel Cells to Distributed Energy Generation. ," pp. 50–55, 2006.
- [29] U.S. Department of Energy (USDOE), "FUEL CELL TECHNOLOGIES PROGRAM Fuel Cells," 2010. [Online].Disponível: https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/files/fc_fuelcell_factsheet.pdf
- [30] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, "Types of Fuel Cells." Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/fuelcells/types-of-fuel-cells>
- [31] Portal Energia, "Células de Combustível: Principais tipos e características." Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-tipos/>
- [32] Deloitte, "Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation Volume 1 Deloitte China," 2020.Dispoível: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>
- [33] AVTOTACHKI, "MOTOR A HIDROGÊNIO. COMO FUNCIONA E DESVANTAGENS." Accessed: Oct. 30, 2024. [Online].Disponível : <https://avtotachki.com/pt/vodorodnyj-dvigatel-kak-rabotaet-i-nedostatki/#1058108010871099-10741086107610861088108610761085108610751086-107610741080107510721090107710831103>
- [34] Observador, "Toyota faz motor que queima hidrogénio (e não é bom)." Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://observador.pt/2021/04/25/toyota-faz-motor-que-queima-hidrogenio-e-nao-e-bom/>

- [35] Razão Automóvel, “Motor a hidrogénio da Deutz AG chega em 2024, mas não aos automóveis.” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.razaoautomovel.com/2021/08/motor-a-hidrogenio-deutz-ag>
- [36] 0aos100, “Toyota desenvolve motor de combustão alimentado a hidrogénio.” Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://0aos100.pt/pt/5087/toyota-desenvolve-motor-de-combustao-alimentado-a-hidrogenio>
- [37] Parlamento Europeu, “RELATÓRIO sobre uma estratégia da UE para o hidrogénio (2020/2242(INI)),” 2021, Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0116_PT.pdf
- [38] Comissão Europeia, “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,” 2020. Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Disponível: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=PT>
- [39] A. van Wijk Jorgo Chatzimarkakis, “Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative,” 2020. Disponível: https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/WIC/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper-1.pdf
- [40] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH), “A SUSTAINABLE PATHWAY FOR THE EUROPEAN ENERGY TRANSITION HYDROGEN ROADMAP EUROPE,” 2019. Disponível: <https://doi.org/10.2843/249013>
- [41] Comissão Europeia, “Hidrogénio: Comissão lança recolha de projetos para a Aliança Europeia para o Hidrogénio Limpo.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível : https://ec.europa.eu/portugal/news/european-clean-hydrogen-alliance_pt
- [42] Comissão Europeia, “European Clean Hydrogen Alliance.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance_pt
- [43] European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A), “Mission & Vision.”
- [44] TOYOTA UK MAGAZINE, “PHEV, BEV, FCEV? Hybrid, electric and fuel cell powertrains explained.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível : <https://mag.toyota.co.uk/phev-bev-fcev-powertrains-explained/>
- [45] Transport&Environment, “Comparison of hydrogen and battery electric trucks Methodology and underlying assumptions,” 2020. Disponível: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf
- [46] NFPA, “Tendências Emergentes: Abastecimento de Veículos.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <http://www.nfpajla.org/pt/arquivos/material-inflamavel-combustivel/1277-tendencias-emergentes-suministro-de-combustible-a-vehiculos>

- [47] “Diário da República, 1.ª série PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS,” 2020.
- [48] República Portuguesa, “EN-H 2 ESTRATÉGIA NACIONAL PARA O HIDROGÉNIO,” 2020. Disponível: <https://participa.pt/contents/consultationdocument/Es-trate%CC%81gia%20Nacional%20para%20o%20Hi-droge%CC%81nio%20DRAFT%20publicac%CC%A7ao.pdf>
- [49] PNEC, “PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030),” 2019. Accessed: Oct. 20, 2024. [Online]. Disponível: <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2020/12/PNEC-2030-Plano-Nacional-Energia-e-Clima.pdf>
- [50] Dinheiro Vivo, “Projeto de hidrogénio verde em Sines não terá mega-consórcio.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.dinheirovivo.pt/economia/projeto-de-hidrogenio-verde-em-sines-nao-tera-mega-consorcio--13735113.html>
- [51] Fi group, “Plano Nacional do Hidrogénio.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://pt.fi-group.com/plano-nacional-do-hidrogenio/>
- [52] Direção-Geral de Energia e Geologia, “INTEGRAÇÃO DO HIDROGÉNIO NAS CADEIAS DE VALOR,” 2019.
- [53] SAPO, “EDP lidera consórcio de investigação sobre produção offshore de hidrogénio verde.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2021/07/13/edp-lidera-consorcio-de-investigacao-sobre-producao-offshore-de-hidrogenio-verde/>
- [54] SAPO, “Fragmentação do H2Sines ‘vai fazer com que surjam mais projetos, diz Governo.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2021/06/09/fragmentacao-do-h2sines-vai-fazer-com-que-surjam-mais-projetos-diz-governo/>
- [55] SAPO, “Galp sai do H2Sines para ‘ir mais rápido’. Engie fica a liderar e Governo não está preocupado.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível : <https://eco.sapo.pt/2021/06/02/galp-sai-do-h2sines-para-ir-mais-rapido-engie-fica-a-liderar-e-governo-nao-esta-preocupado/>
- [56] SAPO, “Saída de EDP e Galp do H2Sines não é revés, consórcio mantém acordo com Holanda e Porto de Roterdão.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível : <https://eco.sapo.pt/2021/06/02/galp-quer-por-refinaria-de-sines-na-rota-do-hidrogenio-verde/>
- [57] SAPO, “Há dois projetos de hidrogénio verde prestes a arrancar até fim do ano.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/11/20/ha-dois-projetos-de-hidrogenio-verde-prestes-a-arrancar-ate-fim-do-ano/>
- [58] EDP, “EDP prepara projeto para testar hidrogénio na Central do Ribatejo.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://www.edp.com/pt-pt/noticias/2019/12/11/edp-prepara-projeto-para-testar-hidrogenio-na-central-do-ribatejo>

- [59] SAPO, “Hidrogénio verde já arrancou na central térmica da EDP no Ribatejo.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/04/27/hidrogenio-verde-ja-arrancou-na-central-termica-da-edp-no-ribatejo/>
- [60] SAPO, “Turbogás quer criar rede regional de hidrogénio verde no Grande Porto.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/06/26/turbogas-quer-criar-rede-regional-de-hidrogenio-verde-no-grande-porto/>
- [61] SAPO, “Governo quer 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogénio até 2030.” Accessed: Oct. 31, 2024. [Online]. Disponível: <https://eco.sapo.pt/2020/08/14/governo-quer-50-a-100-postos-de-abastecimento-de-hidrogenio-ate-2030/>
- [62] M. dos Santos Puga e Y. J. Olortiga Asencios, “Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde”, *Lat. Am. J. Energy Res.*, vol. 10, nº 2, p. 74–93, dez. 2023. Disponível: <https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n2.p74-93>
- [63] Wikipedia contributors. (2024, November 25). Liquid organic hydrogen carrier. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 09:46, December 21, 2024. Disponível: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Liquid_organic_hydrogen_carrier&oldid=1259480999



2024

LILIA NEVES

HIDROGÉNIO: REVISÃO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO, POLÍTICAS ENERGÉTICAS E MERCADO