

# O HIDROGÉNIO

## no Sistema Energético Português





# O Hidrogénio no Sistema Energético Português

## Desafios de integração

Projeto POSEUR-01-1001-FC-000004 “Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade”.

Projeto cofinanciado pelo programa POSEUR – Programa Operacional para a Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos.

## Edição

### Direção-Geral de Energia e Geologia

Elaborado pela Direção-Geral de Energia e Geologia, através da sua Divisão de Estudos Investigação e Renováveis, com revisão da Direção de Serviços de Sustentabilidade Energética, Direção de Serviços de Combustíveis, Direção de Serviços de Energia Elétrica e Direção de Serviços de Planeamento Energético e Estatística.

Cofinanciado por:



## Ficha Técnica

**Título:** O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios de integração

**Edição:** 1ª Edição

**Data:** março de 2018

**Tiragem:** 1000 exemplares

**ISBN:** 978-972-8268-45-9

**Autor:** Direção-Geral de Energia e Geologia

**Suporte:** Impresso

**ISBN:** 978-972-8268-47-3

**Autor:** Direção-Geral de Energia e Geologia

**Suporte:** Eletrónico

**Produção:** Europrint, Lda.

Prefácio .....	1
Enquadramento e Objetivos .....	3
1 - Introdução .....	5
1.1 - O Sistema Energético Português .....	5
1.1.1 - Produção de energia elétrica .....	6
1.1.2 - Transportes .....	7
1.1.3 - Aquecimento e arrefecimento .....	8
1.2 - Enquadramento estratégico para o hidrogénio em Portugal .....	8
2 - Estratégias de produção e utilização do hidrogénio .....	11
2.1 - Produção de hidrogénio .....	13
2.1.1 - Via recursos fósseis .....	14
2.1.2 - Via dissociação da água .....	14
2.1.3 - Via biomassa .....	15
2.2 - Distribuição e armazenamento do hidrogénio .....	16
2.3 - Utilização do hidrogénio .....	17
2.3.1 - Matéria-prima na indústria .....	17
2.3.2 - Matéria-prima para transformação em combustível .....	17
2.3.3 - Combustível em pilhas de combustível .....	18
2.3.4 - Utilização em cadeia no armazenamento de energia .....	21
2.3.5 - Utilização integrada em sistemas autónomos .....	23
3 - Identificação de oportunidades e desafios em Portugal .....	25
3.1 - Introdução .....	25
3.2 - Método .....	25
3.3 - Resultados .....	25
3.4 - Discussão de resultados .....	26
4 – A necessidade de abordagem integrada e sistémica .....	27
5 - Conclusões e recomendações – A necessidade de um roteiro .....	29
Bibliografia .....	31
Anexos .....	33
Anexo 1 - Programa do Workshop “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português” .....	35
Anexo 2 - Entidades participantes no Workshop “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português” .....	36
Anexo 3 - Contributos registados nas sessões paralelas do Workshop “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português” .....	37

## Índice de figuras

Figura 1 – Consumo de energia primária e energia final por fonte, em 2016 .....	5
Figura 2 – Consumo final bruto de energia nos três sectores .....	6
Figura 3 – Contributo relativo por fonte no total de energia eléctrica em 2016. ....	6
Figura 4 – Contributo relativo por fonte no total do sector dos transportes em 2016 .....	7
Figura 5 – Contributo por fonte no sector aquecimento e arrefecimento em 2016 .....	8
Figura 6 – Ciclo do Hidrogénio .....	11
Figura 7 – Estratégias de produção e utilização do hidrogénio .....	12
Figura 8 – Métodos de produção de hidrogénio .....	13
Figura 9 – Esquema simplificado de um eletrolisador .....	15
Figura 10 – Esquema simplificado de uma pilha de combustível a hidrogénio .....	18
Figura 11 – Esquema do protótipo URFC do projeto Unircell .....	19
Figura 12 – Peso e volume de sistemas de armazenamento de energia para diferentes vetores. Comparação para uma autonomia de referência 500 km .....	19
Figura 13 – Custo total de propriedade (TCO) de tecnologias de motorização automóvel .....	20
Figura 14 – Exemplos de casos reais de utilização de hidrogénio em transporte rodoviário .....	21
Figura 15 – Eletrolisador de 1 MW com três pilhas de 350 kW visíveis. Foto do projeto <i>Surf 'n' Turf</i> .....	22
Figura 16 – Proposta de análise SWOT na abordagem do hidrogénio em Portugal .....	26
Figura 17 – Impacto generalizado na sociedade e nas atividades económicas da economia do hidrogénio .....	27



Jorge Seguro Sanches  
Secretário de Estado da Energia

Portugal tem, no campo da transição energética, uma dificuldade de sempre que hoje é uma oportunidade única.

Aproveitando as condições climatéricas generosas, a nossa grande oportunidade como país no sector energético é a aposta na energia renovável, que é um vetor fundamental da transição energética.

Todos reconhecemos que a transição energética é inadiável, dada a urgência climática e a mudança inquestionável do paradigma energético, em particular no que toca aos combustíveis fósseis. A União Europeia estabeleceu um conjunto de metas ambiciosas, no âmbito do Acordo de Paris, que se traduzirão na descarbonização progressiva do sistema energético.

Há mais de 10 anos que Portugal se encontra profundamente comprometido com o objetivo de descarbonizar o setor da energia. Em 2016, atingimos 28,5% de participação de energias renováveis contra uma média de 17% na União Europeia. Nos últimos cinco anos, a produção de eletricidade renovável correspondeu a 54% das necessidades de consumo face à média comunitária de 30%.

Portugal tem assim a sétima melhor quota de renováveis em toda a União Europeia e vamos continuar na liderança desta transição.

Nesse sentido, o XXI Governo constitucional elegeu como prioridade no seu programa a transição energética da economia portuguesa com o objetivo de caminhar para uma economia neutra em carbono e reduzir a dependência energética do exterior.

Empenhados em manter este rumo de ambição, um dos principais desafios que temos de enfrentar é o da integração das energias renováveis intermitentes.

O futuro sistema energético terá de ter a capacidade de gerir as flutuações na produção de eletricidade, bem como os escoamentos em diferentes direções devido à produção tendencialmente mais descentralizada de energia.

Para além da aposta na eficiência energética e no nivelamento entre oferta e procura, importa promover uma maior flexibilidade do sistema energético, apoiando o desenvolvimento das tecnologias de armazenamento da eletricidade e de transformação de energia entre eletricidade e gás.

Passível de ser obtido sem emissões de gases de efeito estufa, o hidrogénio permite o armazenamento de energia e uma multiplicidade de utilizações, facilitando a integração de fontes renováveis variáveis no sistema e o acoplamento energético dos setores da eletricidade, do calor e dos transportes.

Encaramos, pois, o hidrogénio como vetor energético incontornável na transição energética da economia nacional e para a prossecução dos desígnios de redução da dependência energética e descarbonização progressiva da economia.

Neste sentido, saúdo o projeto “Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal”, da responsabilidade da Direção-Geral de Energia e Geologia e envolvendo o Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

O resultado deste projeto é muito importante, não só para informar e esclarecer os cidadãos e as empresas sobre o potencial do hidrogénio verde e implicações da sua utilização, como para indicar o caminho, que consideramos incontornável, para o seu desenvolvimento em Portugal.



A avaliação do potencial e impacto do hidrogénio em Portugal e a definição de um roteiro para o seu desenvolvimento e aproveitamento é uma das medidas do Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER). Este Plano Nacional reconhece as potencialidades do hidrogénio para o sistema energético nacional e estabelece a necessidade de elaboração do roteiro em articulação com instituições do sistema tecnológico e científico nacional. Por outro lado, no quadro da prossecução das políticas atuais com vista a uma transição global para uma economia hipocarbónica estão em curso iniciativas de carácter sectorial a nível nacional, comunitário e internacional, que reforçam a necessidade de análise e avaliação da oportunidade deste vetor energético a nível sistémico.

Sendo um objetivo temático do POSEUR apoiar a transição para uma economia de baixo teor carbónico em todos os sectores de atividade, o projeto “Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade” (POSEUR-01-1001-FC-000004) visa contribuir para este desafio. O objetivo deste projeto consiste em avaliar o potencial e impacto do hidrogénio tendo em consideração as especificidades do país a nível dos recursos e das características do sistema energético nacional. A concretização deste objetivo irá resultar na elaboração do roteiro português neste domínio.

Este Projeto enquadra-se nas prioridades do POSEUR para a promoção das fontes de energia renováveis, contribuindo para:

- A diversificação das fontes de abastecimento energético, dado que o hidrogénio pode ser obtido a partir de diferentes fontes de energia renováveis (FER), utilizadas ou não atualmente, e a sua disponibilização diversificará ainda os combustíveis disponíveis para consumo final;
- O aproveitamento de recursos energéticos endógenos, dado que as tecnologias de hidrogénio poderão facilitar o aproveitamento quer de recursos de biomassa quer da eletricidade resultante de períodos com excesso de produção decorrente da intermitência de algumas FER;
- A redução da dependência energética ao usar na sua produção fontes endógenas como sejam a biomassa ou a eletrólise da água, com valorização de excedentes de energia elétrica a partir de FER, servindo assim como tecnologia de armazenamento de energia que de outra forma seria desperdiçada.

A publicação é estruturada em capítulos, a seguir resumidos.

O capítulo 1 caracteriza sucintamente o sistema energético em Portugal, bem como o enquadramento disponível para o equacionamento de uma economia para o hidrogénio, nas perspetivas das iniciativas de política pública existentes e da estratégia em curso para a energia. O capítulo 2 faz uma abordagem de carácter sistémico no âmbito da produção e utilização do hidrogénio, na qual são descritas diferentes tecnologias e cadeias de valor e se assumem duas perspetivas complementares: os processos de conversão, e as cadeias de valor em função da aplicação final. O capítulo 3 descreve o processo e apresenta os resultados da primeira análise às oportunidades e barreiras ao hidrogénio que foi realizada no projeto, em colaboração com diferentes grupos de atores que podem afetar a economia do hidrogénio ou ser afetados por ela. O capítulo 4 aponta para a necessidade de soluções integradas intra- e intersectoriais de baixo carbono, bem como para a necessidade do planeamento estratégico e de um roteiro nacional que facilite o processo de inovação ao longo do tempo neste domínio. Por último, o capítulo 5 faz uma síntese do trabalho elaborado e apresenta um conjunto de conclusões e recomendações.



## 1.1 - O Sistema Energético Português

O sistema energético português tem-se caracterizado por uma elevada dependência energética e uma elevada intensidade energética do PIB, fruto da inexistência de produção nacional de fontes de energia fósseis, como o petróleo ou o gás natural, que têm um peso muito significativo no *mix* de consumo de energia (ver Figura 1).

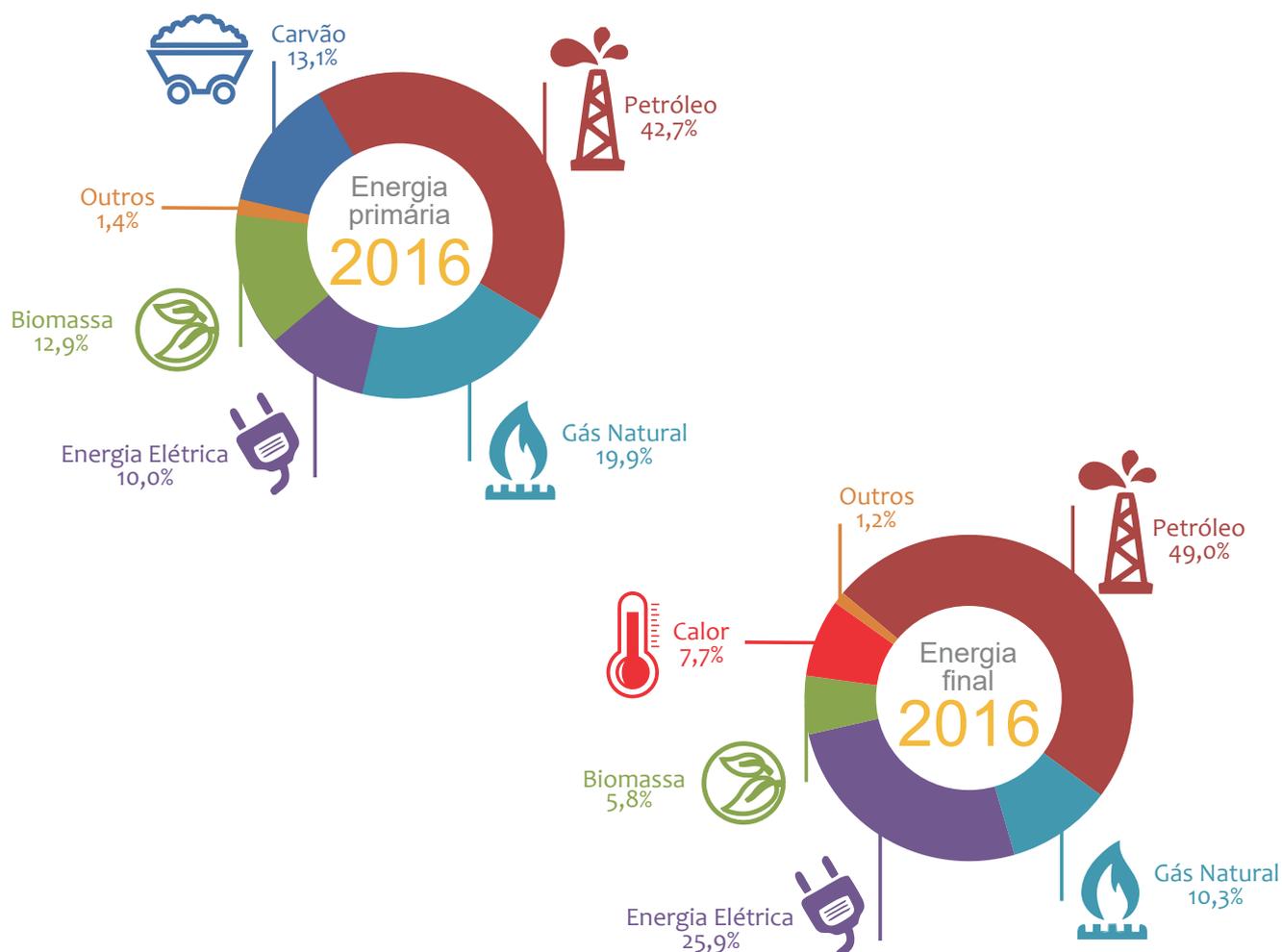


Figura 1 - Consumo de energia primária e energia final por fonte, em 2016 [1]

A aposta nas renováveis e na eficiência energética tem contribuído para uma redução significativa da dependência energética externa, para níveis próximos dos 70% em 2016, para além de constituírem um motor de desenvolvimento económico, social e tecnológico.

Em 2016, a contribuição das fontes de energia renováveis (FER) no consumo de energia primária foi de 25,4%. Os principais contributos para as FER, foram da biomassa com 46%, da eólica com 19% e da hidroeletricidade com 26%. Os biocombustíveis contribuíram com 5% para as FER.

No quadro da Diretiva Europeia para a promoção das energias renováveis, o consumo final bruto de energia proveniente de fontes renováveis foi de 28,5% nos três sectores: eletricidade, transportes e aquecimento e arrefecimento. Os valores referentes ao consumo final bruto de energia em cada um dos três sectores são apresentados na Figura 2.

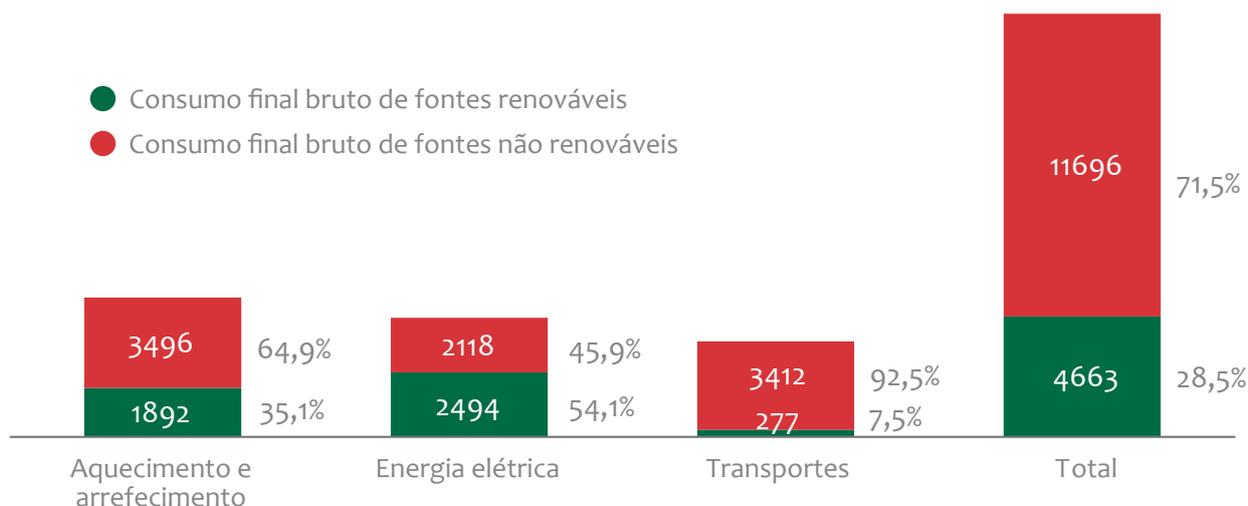


Figura 2 - Consumo final bruto de energia nos três sectores [1]

### 1.1.1 - Produção de energia eléctrica

No sector de produção de energia eléctrica, como apresentado na Figura 2, 54% da produção nacional teve origem renovável. Entre as fontes renováveis de energia, a energia eólica e hídrica representam as maiores parcelas, tendo contribuído cada uma delas com cerca de 23% para o total de produção eléctrica em 2016 (Figura 3).

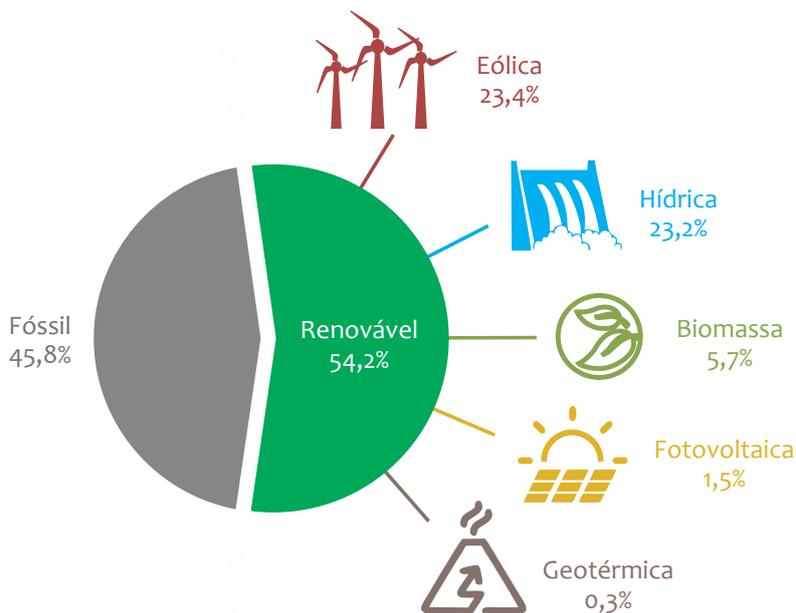


Figura 3 - Contributo relativo por fonte no total de energia eléctrica em 2016 [1]

Tendo em conta a importância destas duas fontes, salienta-se que a energia hídrica apresenta ciclos de variação intra-annuals e ao longo dos diferentes anos, de acordo com os meses e anos de maior pluviosidade. Por outro lado, a energia eólica, apesar de apresentar médias mensais relativamente constantes ao longo do ano, apresenta fortes variações horárias e diárias.

Considerando as estratégias assumidas ao nível da UE e ao nível global, Portugal tem como objetivo aumentar a percentagem de uso de fontes renováveis. À semelhança do que presentemente acontece noutras regiões do globo, a energia solar é a fonte que apresenta maior potencial de crescimento para potenciar o cumprimento destes objetivos. No entanto, a energia solar é também uma fonte intermitente com importantes variações horárias, diárias e entre estações do ano. Assim, em Portugal, onde já existe um mix energético com elevado contributo de fontes intermitentes na produção de energia elétrica e que se prevê continuar a aumentar, é previsível que um maior aproveitamento da energia fotovoltaica se traduza num acréscimo das variações com ciclos de carácter sazonal, devido às variações da radiação solar disponível nas diferentes estações do ano, pelo que o armazenamento de longa duração se poderá revelar uma peça essencial.

### 1.1.2 - Transportes

A nível global, o sector dos transportes é onde se regista maior dificuldade de penetração de fontes renováveis no consumo energético. Em Portugal, apenas 7,5% do consumo final deste sector é proveniente de fontes renováveis, como se apresenta na Figura 2. A integração de energia proveniente de fontes renováveis neste sector deve-se à incorporação de biocombustíveis e à contribuição crescente da eletricidade através da progressiva introdução do veículo elétrico no mercado automóvel (Figura 4).

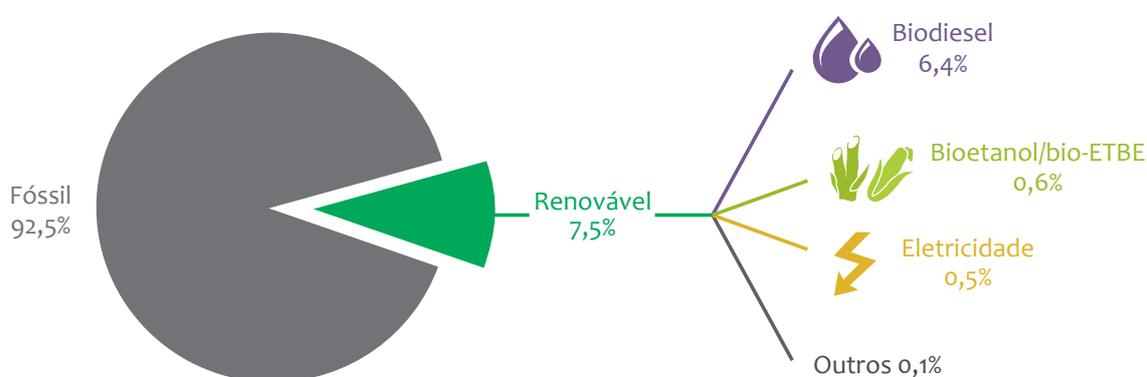


Figura 4 - Contributo relativo por fonte no total do sector dos transportes em 2016 [1]

A mobilidade elétrica constitui cada vez mais uma aposta para a descarbonização do sector. O sector dos transportes públicos, nomeadamente o transporte ferroviário, comboio e metropolitano, já utiliza uma quantidade significativa de energia elétrica mas que, apesar de tudo, representa apenas 0,5% do consumo total de energia.

Os veículos elétricos constituem uma oportunidade para integrar eletricidade produzida a partir de fontes renováveis no sector dos transportes e, assim, aumentar a taxa de utilização de energias renováveis. Em particular, os veículos elétricos integrando pilhas de combustível a hidrogénio como fonte de energia vêm reforçar esta tendência.

### 1.1.3 - Aquecimento e arrefecimento

No sector do aquecimento e arrefecimento a taxa de utilização de fontes renováveis foi de 35,1% no ano de 2016 (Figura 5).

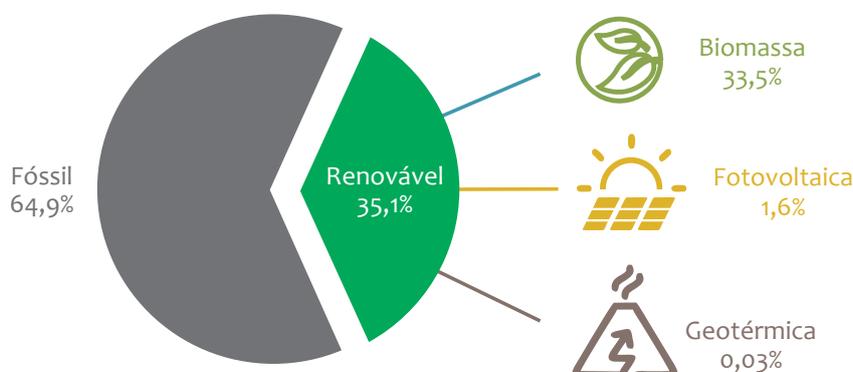


Figura 5 - Contributo por fonte no sector aquecimento e arrefecimento em 2016 [1]

A biomassa foi responsável por grande parte da energia proveniente de fontes renováveis neste sector, tendo uma utilização significativa quer no aquecimento doméstico (14,2%) quer na produção de calor para a indústria (19,4%).

### 1.2 - Enquadramento estratégico para o hidrogénio em Portugal

A segurança do abastecimento e as alterações climáticas posicionam-se no quadro da estratégia energética nacional como vetores centrais que obrigam a uma forte aposta na energia proveniente de fontes renováveis e no uso racional da energia em todos os sectores da economia.

Na última década Portugal tem apostado na promoção das energias renováveis, o que lhe permitiu posicionar-se num dos lugares cimeiros do *ranking* da produção de energia proveniente de fontes renováveis ao nível da União Europeia. Este processo de transição exigiu uma mudança do paradigma de produção de energia, tornando-se fundamental o desenvolvimento de políticas e medidas de apoio à geração de energia descentralizada, através do estabelecimento de estratégias de investigação, inovação e competitividade, de modo a facilitar o investimento em tecnologias de baixo carbono e de redes inteligentes que permitam o desenvolvimento e cooperação entre todos os intervenientes no mercado, tirando o máximo partido da concorrência transnacional e apoiando a criação de empresas inovadoras em serviços energéticos.

No quadro dos compromissos assumidos a nível da União da Energia, da necessidade de responder aos desafios criados pelas alterações climáticas e da redução da dependência de combustíveis fósseis, e na sequência da Diretiva “FER”, Portugal assumiu um compromisso de incorporar 31% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia até 2020. Para o período 2020-2030, Portugal está ainda vinculado a uma nova estratégia comum e abrangente na Europa que visa atingir, pelo menos, 27% de incorporação de renováveis e uma redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em 80-95% para 2050 em relação aos níveis de 1990. Considerando que a meta da UE para 2030 é de crescimento, é expectável que a meta nacional acompanhe o desafio de incremento.

Prosseguir estes objetivos obriga à redução do consumo de energia, ao incremento das melhorias

tecnológicas, à utilização de tecnologias energeticamente eficientes e à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, conjuntamente com a implementação de medidas de eficiência energética e necessariamente à incessante procura de alternativas aos combustíveis fósseis e de apostas fortes em soluções inovadoras ao nível do sistema energético.

É neste contexto que, numa opção de médio e longo prazo, os novos combustíveis, incluindo o hidrogénio, se poderão assumir como vetores energéticos e contribuir para um sistema energético mais limpo e sustentável, para o cumprimento dos objetivos nacionais em termos de energia e clima e para a redução da dependência energética externa a nível nacional.

O hidrogénio, que a Agência Internacional de Energia considera ter um elevado potencial como vetor energético [2], constitui-se como um combustível alternativo aos hidrocarbonetos fósseis na transição para um novo paradigma energético nacional, permitindo desenvolver novas oportunidades e reforçar a competitividade do País.

Porém, a materialização desta orientação enfrenta desafios que é necessário ultrapassar, implicando mudanças de comportamentos, esforços coordenados ao nível da investigação e desenvolvimento, de educação e formação, de financiamento, mas sobretudo, uma grande sensibilização dos vários agentes intervenientes no sistema.

Por outro lado, o desenvolvimento estratégico de longo prazo, para além de colocar desafios de natureza económica, tecnológica e regulamentar, terá necessariamente de ultrapassar barreiras relacionadas com os elevados custos das tecnologias e com a criação de uma rede que vai da produção, ao transporte, à distribuição e ao consumo, para além da adaptação legislativa e regulamentar com vista à sua integração no sistema energético nacional.

A importância estratégica do hidrogénio deverá ser equacionada na política energética nacional no quadro da evolução que se tem verificado ao nível da diversificação de alternativas de origem renovável e do trabalho de análise para a adaptação legislativa e regulamentar, de forma a serem criadas condições para garantir a oferta e distribuição de novos combustíveis.

Com o projeto “Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade”, a Direção-Geral de Energia e Geologia tem desenvolvido um trabalho de análise e avaliação do potencial e de identificação de necessidades de investimento em infraestruturas, promovendo o debate sobre o interesse e a oportunidade do hidrogénio enquanto vetor energético em Portugal, no sentido de propor, a médio e longo prazo, um roteiro para a sua introdução de forma sustentável, para além de proceder à adaptação legislativa e regulamentar criando as condições para a oferta e distribuição de novos combustíveis de origem renovável no sistema energético nacional.

Desde 2009, com a adoção da Diretiva “FER” 2009/28/CE, de 23 de abril, transposta para o direito interno por um vasto conjunto de diplomas dos quais se destacam o Decreto-Lei nº 141/2010, de 31 de dezembro e o Decreto-Lei nº 117/2010, de 25 outubro, foi criado um quadro regulamentar para a promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, estabelecendo objetivos nacionais vinculativos para a quota de fontes de energias renováveis no consumo final de energia nos sectores eletricidade, aquecimento e arrefecimento e nos transportes, a alcançar até 2020.

Em 2013, Portugal procedeu à revisão da estratégia para as Energias Renováveis e definiu um novo Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis – PNAER 2020, tendo em conta os novos cenários macroeconómicos e as previsões de evolução do sistema energético nacional, procedendo a um reajustamento da oferta face aos novos cenários de procura de energia e revendo as metas de contribuição das várias fontes de energia renovável no mix energético nacional, pondo especial ênfase na utilização das tecnologias em função da sua maturidade e da sua competitividade.

O PNAER estabeleceu as trajetórias de introdução de FER de acordo com o ritmo da implementação das medidas e ações previstas para os sectores eletricidade, aquecimento e arrefecimento e transportes, identificando as medidas gerais e específicas a nível sectorial necessárias para alcançar os compromissos globais nacionais, entre as quais está prevista a avaliação do potencial do hidrogénio em Portugal e a definição de uma estratégia para a sua integração.

Em 2014, a Diretiva 2014/94/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de outubro, relativa à criação de uma infraestrutura para combustíveis alternativos, visou estabelecer um quadro comum de medidas e de requisitos mínimos para a implantação desta infraestrutura a nível europeu, remetendo a sua aplicação, designadamente no que se refere aos objetivos e metas nacionais, para quadros nacionais de ação, a adotar em cada um dos Estados-Membros. Esta Diretiva foi transposta pelo Decreto-Lei n.º 60/2017, de 9 de junho, no qual se determina a elaboração de um Quadro de Ação Nacional.

Em 2017, é publicada a Resolução do Conselho de Ministros n.º 88/2017, de 26 julho, que aprova o Quadro de Ação Nacional (QAN) para o desenvolvimento do mercado de combustíveis alternativos no sector dos transportes, que inclui, designadamente, a avaliação da situação atual e do desenvolvimento futuro do mercado no que se refere aos combustíveis alternativos para o sector dos transportes, incluindo a eletricidade, o gás natural, o gás de petróleo liquefeito, os biocombustíveis e o hidrogénio. O QAN reconhece o papel do hidrogénio na estabilização e integração das fontes de energia renovável no sistema de produção de energia elétrica, em particular quando existe contributo significativo de fontes intermitentes. De igual forma, também já o Roteiro Nacional de Baixo Carbono 2050 (RCM 93/ 2010 de 26 de novembro) assinalava o hidrogénio como um vetor energético de papel relevante na descarbonização do sector dos transportes, em cenários de elevado desenvolvimento económico mas com fortes restrições a emissões de GEE.

Além da transposição para o quadro nacional da definição das condições infraestruturais para os combustíveis alternativos, serão de sinalizar outros domínios estratégicos quer à escala Europeia quer Nacional, designadamente:

- a) A estratégia Europeia para a mobilidade com baixas emissões – publicada na COM(2016) 501 final de 20 Julho de 2016 – que vem reforçar a facilitação do quadro regulamentar para a transição para um sistema de mobilidade mais eficiente e com emissões-zero, e que procura incluir naquela transição a ligação dos transportes e da mobilidade com baixas emissões aos sistemas de energia, a integração da mobilidade elétrica, bem como a redução de barreiras ao autoconsumo, ao armazenamento e ao consumo de eletricidade renovável;
- b) O Plano de Ação para as Energias Renováveis Oceânicas – publicado no Anexo II da Resolução de Conselho de Ministros n.º 174/2017 de 24 de novembro – na medida 3.2 “Produção de informação estratégica sobre novos mercados”, inclui a produção de hidrogénio na lista de oportunidades de investimento dos mercados secundários das energias renováveis oceânicas.

## 2 - Estratégias de produção e utilização do hidrogénio

O hidrogénio é utilizado como matéria-prima para produzir bens industriais e como combustível para a produção de energia (calor, eletricidade). É considerado um vetor energético limpo, seguro e versátil, embora ocorram emissões ao longo do seu ciclo de vida, que dependem das vias de produção escolhidas, enquanto outras alternativas apresentam impactes significativos sobretudo na fase de utilização. Se acresce por um lado ser o carácter renovável da fonte de energia uma condição necessária, mas não suficiente, para a sustentabilidade ambiental do sistema energético, acresce por outro a necessidade, de acordo com o estado-da-arte a nível internacional, da avaliação de impactes ambientais e económicos do hidrogénio em Portugal ter em consideração a análise comparativa entre alternativas, tendo em conta os impactes negativos potenciais das opções consideradas [3].

Face ao exposto, a abordagem nacional deve ser projetada e monitorizada num quadro de sustentabilidade económica transversal às dimensões energética, ambiental e social, tendo em consideração todo o sistema e o ciclo de vida da energia, desde a sua produção à sua utilização.

Do ponto de vista sistémico, ainda que não seja uma fonte primária de energia, o hidrogénio como vetor energético apresenta a grande vantagem de possibilitar a transformação, com elevada eficiência e de forma limpa (sem emissões poluentes), da energia incorporada noutra forma de energia (ver Figura 6, adaptada de [4]). Esta característica pode tornar interessante a sua utilização abrangente em todo o sector energético, permitindo-lhe desempenhar um papel importante na produção de energia elétrica com elevada contribuição de fontes de energia renovável (intermitentes, sazonais), como é o caso em Portugal.

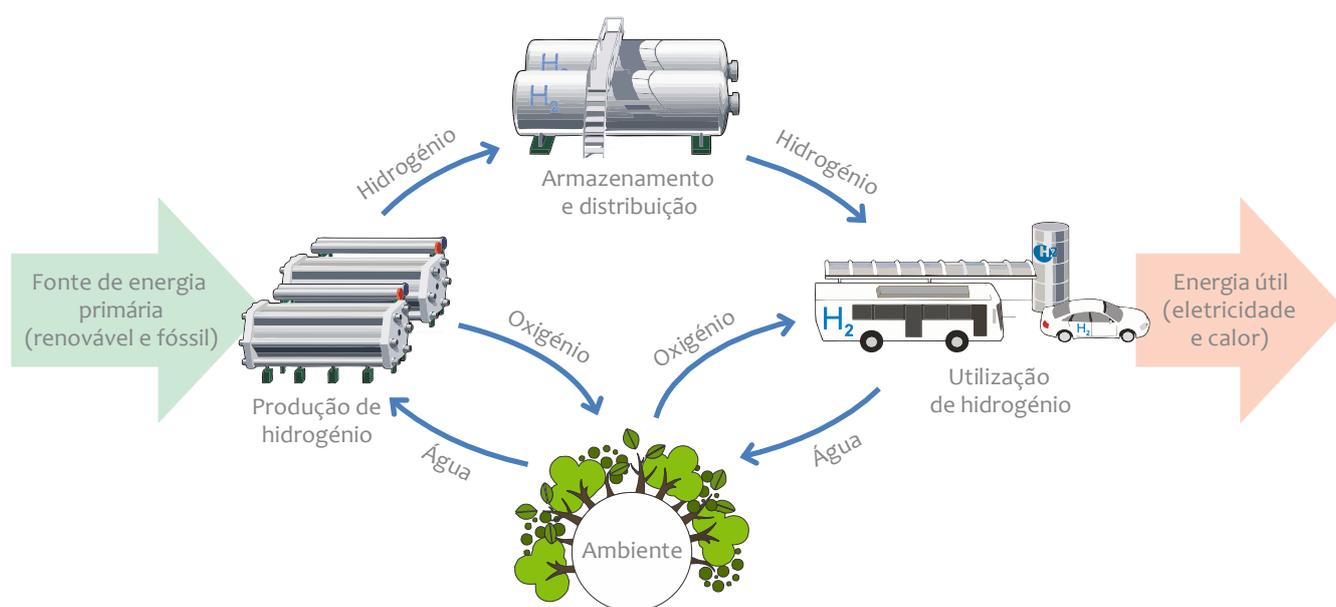


Figura 6 - Ciclo do Hidrogénio

A este potencial acrescem diversas aplicações que são impulsionadoras na intensificação e diversificação da integração de renováveis no sistema energético, potenciando a flexibilidade decorrente dessas fontes intermitentes, transversais à economia, criando novas ligações entre a oferta e a procura de energia de forma centralizada e descentralizada. A capacidade de poder ser utilizado como forma de armazenamento de energia, num espaço de tempo curto ou médio (horas, dias ou meses), oferece uma elevada flexibilidade de utilização, para a geração de eletricidade e calor, para introdução na rede de gás natural – diretamente ou após conversão em metano –, para ser transformado em combustível líquido sintético ou para ser usado em pilhas de combustível no sector dos transportes e em sistemas estacionários.

Face ao exposto, considerou-se oportuno assumir uma abordagem na qual se analisam as cadeias de valor que se prevê possam vir a favorecer a utilização do hidrogénio nos diferentes sectores económicos e que – em resultado dos processos de inovação, das oportunidades de negócio, e da iniciativa de agentes privados – possam vir a ser propostas para apreciação e eventual implantação. Esta abordagem tem por base duas perspetivas complementares:

- Os processos de conversão;
- As cadeias de valor subsequentes, face à aplicação final.

Em alinhamento com esta lógica de abordagem, são considerados o estado-da-arte para o hidrogénio e pilhas de combustível [5][6][2][7] e também a experiência anterior da equipa em abordagens integradas para a sustentabilidade de sistemas e o design de produtos abordando cadeias de produção-consumo. A análise do estado-da-arte permitiu identificar diferentes opções para conversão de hidrogénio e subsequentes aplicações, incluindo ou não a produção de energia eléctrica. A Figura 7 representa estas diferentes estratégias e as cadeias de valor associadas.

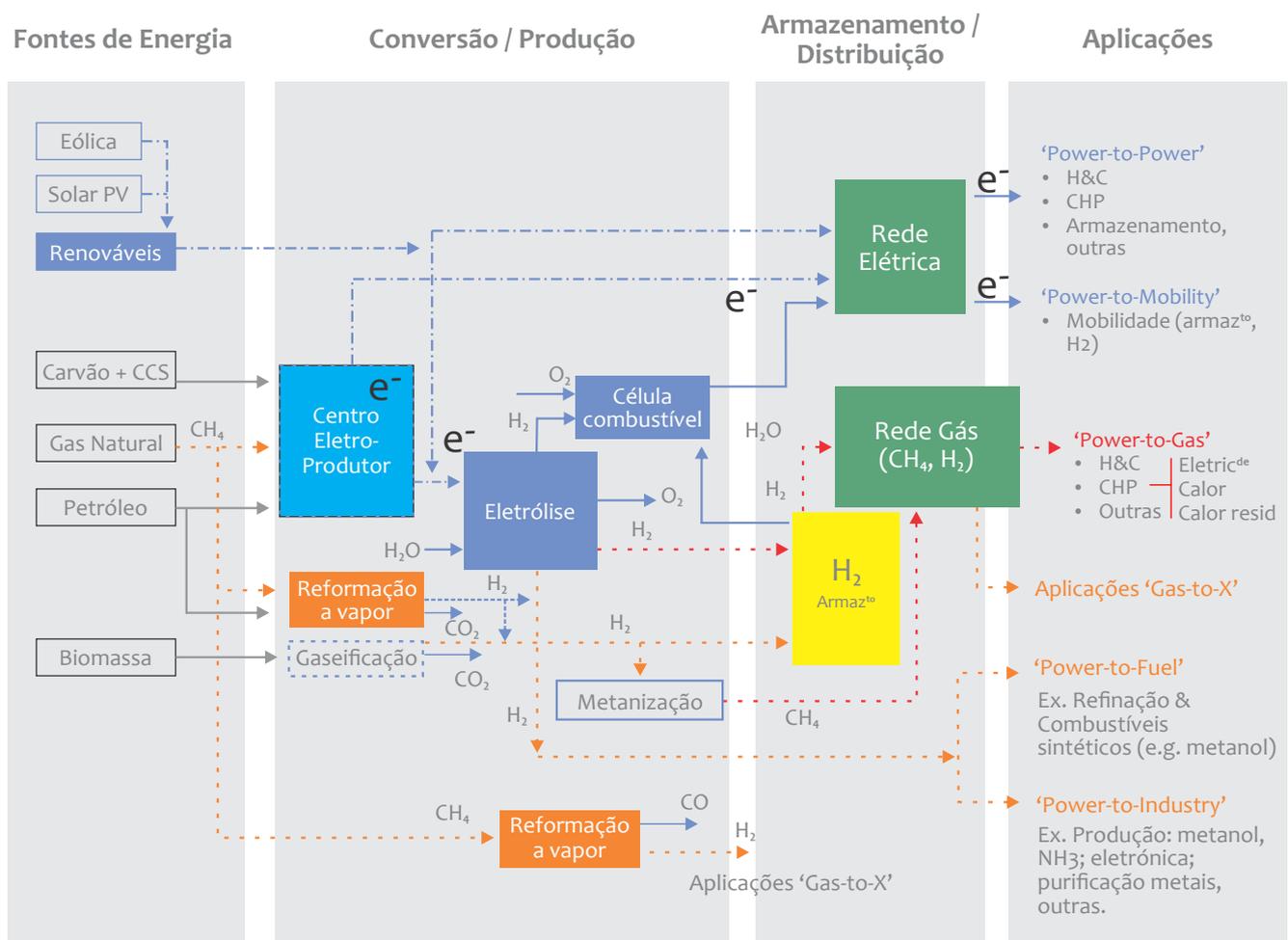


Figura 7 - Estratégias de produção e utilização do hidrogénio (Esquema DGEG)

A seguir apresentam-se resumidamente as etapas que integram as cadeias de valor relacionadas com o hidrogénio.

## 2.1 - Produção de hidrogénio

Considerando que o hidrogénio é extremamente raro na sua forma isolada, mas muito abundante quando combinado, como na água e em compostos orgânicos, é necessário recorrer a processos físico-químicos para sintetizar e isolar o hidrogénio molecular ( $H_2$ ).

Atualmente, cerca de 96% do  $H_2$  utilizado a nível mundial é obtido através da reformação de combustíveis fósseis (48% via gás natural; 30% via petróleo/nafta; 18% via carvão), sendo os restantes 4% produzidos através da eletrólise da água [8]. A eletrólise da água, utilizando exclusivamente eletricidade de fontes renováveis, produz  $H_2$  com baixas emissões de carbono, o chamado hidrogénio 'verde'. Por oposição, o hidrogénio produzido com base em combustíveis fósseis é conhecido como hidrogénio 'castanho' e o hidrogénio produzido como subproduto de processos industriais é o chamado hidrogénio 'cinzento'.

A produção de hidrogénio pode realizar-se através de tecnologias bastante diversificadas, conforme se ilustra na Figura 8, as quais necessitam sempre de energia, sob a forma de calor, luz ou eletricidade, para assegurar o processo.

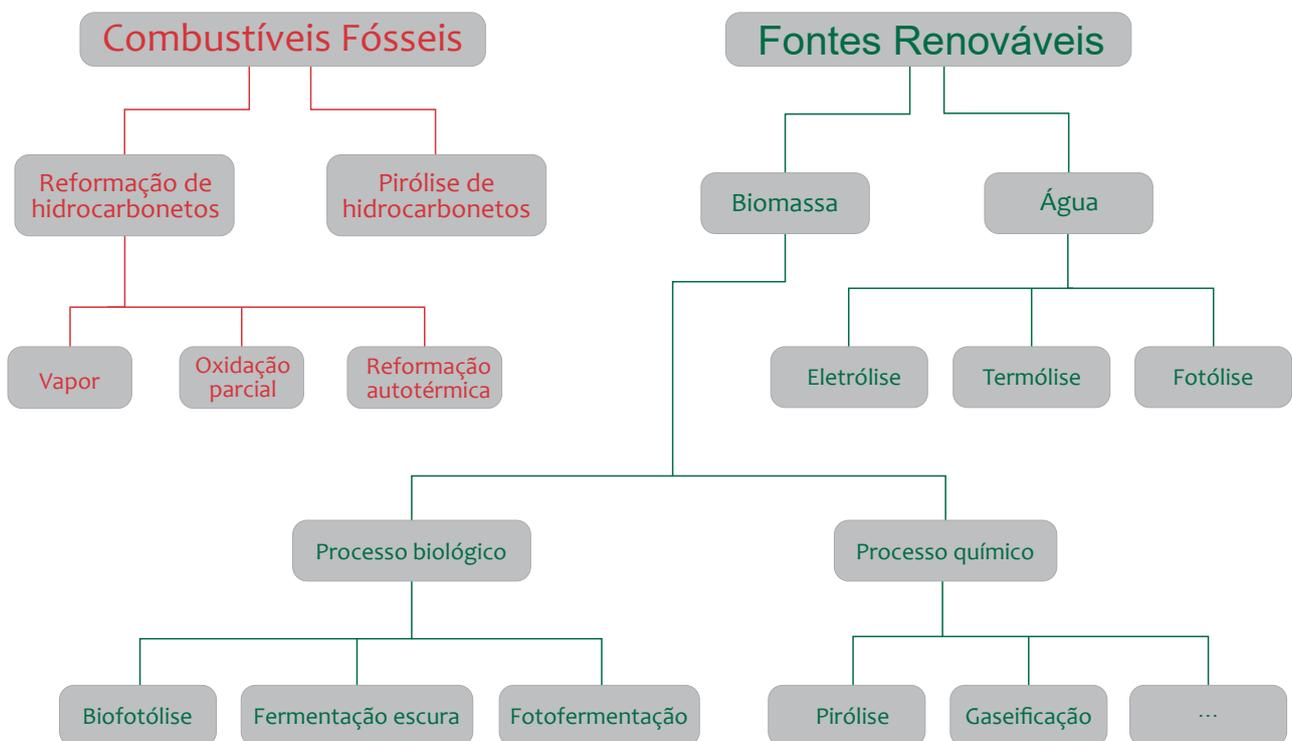


Figura 8 - Método de produção de hidrogénio [6]

### 2.1.1 - Via recursos fósseis

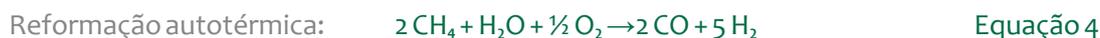
Atualmente, a principal via para produção do hidrogénio utiliza hidrocarbonetos fósseis, maioritariamente o gás natural, através de um processo denominado reformação. Este processo consome como matéria-prima um hidrocarboneto leve, como o metano, ou um álcool, como o metanol [9], que reage com vapor de água (reformação a vapor) em condições de elevada pressão e temperatura (850-900 °C) e na presença de um catalisador, normalmente à base de níquel, produzindo, num processo em duas fases, hidrogénio molecular e dióxido de carbono:



Na globalidade do processo, por cada molécula de metano consumida, utilizam-se duas moléculas de água, e produzem-se quatro moléculas de hidrogénio e uma molécula de dióxido de carbono.

Para além da reformação a vapor, em que a água é a fonte do oxigénio, existe também a possibilidade de utilização direta de oxigénio, sendo neste caso denominada reformação por oxidação parcial, ou uma combinação destas duas, sendo neste caso uma reformação autotérmica.

Os processos de reformação são utilizados em larga escala precisamente porque são a forma mais económica de produzir hidrogénio, conseguindo-se valores inferiores a 2 €/kg H<sub>2</sub> [6].



A pirólise de hidrocarbonetos é um processo que utiliza unicamente hidrocarbonetos como fonte de hidrogénio, que necessita de alta temperatura (980 °C), pressão atmosférica e ausência de ar ou água, produzindo hidrogénio molecular e carbono. Por exemplo, a pirólise do metano é expressa pela equação seguinte:



Os processos de pirólise de hidrocarbonetos têm a vantagem de produzirem diretamente carbono, sem necessidade de processos energeticamente exigentes de captura e armazenamento de emissões de carbono (*carbon capture and storage* – CCS). No entanto, têm eficiências limitadas pelo processo de separação do hidrogénio e da durabilidade das membranas submetidas a temperaturas elevadas [6].

No processo, também conhecido como *coal-to-liquid*, que produz combustíveis líquidos a partir de carvão, o primeiro passo é uma gaseificação dos materiais de carbono em monóxido de carbono e hidrogénio. Entre os materiais que são gaseificados com este propósito salientam-se o petróleo, coque de petróleo, biomassa e carvão [10]. O gás resultante deste processo é conhecido como gás de síntese e pode ser transformado, através do processo de Síntese Fisher-Tropsch (um processo tecnologicamente maduro para produzir hidrocarbonetos a partir de monóxido de carbono e hidrogénio), em combustíveis (gasosos) líquidos, como gasolina, gasóleo ou querosene.

### 2.1.2 - Via dissociação da água

A utilização da água como fonte do hidrogénio possibilita a produção de hidrogénio de forma limpa, ou seja, isenta de emissões poluentes diretas. A dissociação da água em hidrogénio e oxigénio pode fazer-se através de eletrólise, termólise ou fotólise.

Entre estes, a eletrólise é o processo que tem sido mais utilizado e consiste em utilizar energia eléctrica para dissociar os componentes da água, utilizando equipamentos denominados eletrolisadores e que de forma simplificada são constituídos como se apresenta na Figura 9.

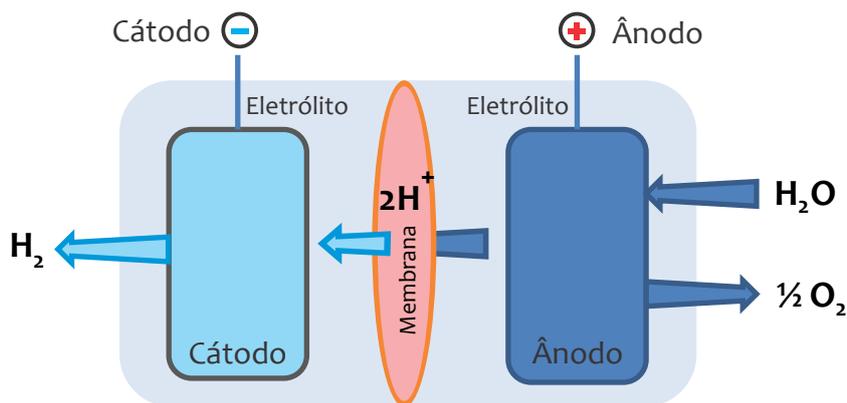


Figura 9 - Esquema simplificado de um eletrolisador (Ilustração DGEG)

Os eletrolisadores que até esta altura têm tido maior utilização e cujo funcionamento está mais desenvolvido são de três tipos: eletrolisadores alcalinos, eletrolisadores de membrana de troca de prótons (*proton exchange membrane – PEM*) e eletrolisadores de óxidos sólidos (*solid oxide electrolyzers Cell – SOEC*).

A reação global da eletrólise da água está expressa na seguinte equação:



O processo de eletrólise realiza-se de forma separada no cátodo e no ânodo e, nos eletrolisadores de membrana, de acordo com as equações seguintes:



A eficiência típica de um eletrolisador de membrana é de 60-70% e o custo médio do hidrogénio produzido é normalmente superior a 4 €/kg H<sub>2</sub> [6], sendo este valor muito dependente do preço da energia elétrica utilizada.

### 2.1.3 - Via biomassa

Os processos de produção de hidrogénio a partir de biomassa (vegetal ou animal, resíduos industriais ou municipais) podem seguir duas vias, a via biológica ou a via termoquímica. Apesar de a via biológica (biofotólise, fermentação escura ou fotofermentação) ser comparativamente melhor em termos de impactos ambientais e menos intensiva em termos energéticos, estes processos têm rendimentos e velocidades de produção ainda muito baixos. Por outro lado, os processos termoquímicos (pirólise, gaseificação, combustão ou liquefação) oferecem rendimentos elevados e são muito mais rápidos, apresentando elevado potencial do ponto de vista económico e ambiental [6].

Entre os processos termoquímicos, a pirólise e a gaseificação são os processos com maior potencial e tecnologicamente mais desenvolvidos.

A pirólise de biomassa consiste no seu aquecimento até uma temperatura de 377-527 °C, com pressão de 1-5 bar e na ausência de oxigénio. Os produtos da pirólise são óleos líquidos, carvão sólido e gases contendo monóxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos leves. A componente gasosa resultante do processo de pirólise pode ser submetida a reformação a vapor para produção de hidrogénio. Os custos de produção do hidrogénio via pirólise, dependendo do tipo de biomassa e da dimensão da instalação de produção, são da ordem de 1-2 €/kg H<sub>2</sub> [6].

A gaseificação de biomassa realiza-se a temperaturas mais elevadas, 500-1400 °C, com pressão de 1-33 bar, e na presença de ar, oxigénio e/ou vapor. O resultado da gaseificação inclui uma fase gasosa, o chamado gás de síntese, e uma fase líquida ou semi-sólida (alcatrão). O gás de síntese pode ser processado para produzir hidrogénio, da mesma forma que os gases resultantes da pirólise, tendo neste caso um rendimento e eficiências superiores. Os custos de produção do hidrogénio via gaseificação de biomassa, que também dependem do tipo de biomassa e da dimensão da instalação de produção, são da ordem de 1,5-1,7 €/kg H<sub>2</sub> [6].

## 2.2 - Distribuição e armazenamento do hidrogénio

A distribuição do hidrogénio pode ser realizada em conjugação com a forma de armazenamento, como gás comprimido, gás liquefeito ou adsorvido em hidretos metálicos, dependendo das quantidades a transportar e das distâncias a percorrer. Para quantidades e distância elevadas o transporte de hidrogénio liquefeito é mais eficiente do que como gás comprimido.

O meio de transporte pode ser rodoviário, ferroviário ou marítimo, mas também em casos específicos recorrendo a infraestrutura própria com utilização de gasodutos dedicados. O transporte rodoviário é utilizado para quantidades e distâncias menores, enquanto o transporte ferroviário ou marítimo é mais adequado para quantidades mais elevadas e maiores distâncias. Uma rede de gasodutos poderá ser a opção mais adequada para quantidades muito elevadas, quer para distâncias curtas quer para distâncias mais longas.

O armazenamento de hidrogénio pode ser realizado sob a forma de gás comprimido (350-700 bar), crio-comprimido ou no estado líquido (-252,8 °C) ou adsorvido superficialmente num material, formando um líquido orgânico, constituindo um hidreto intersticial, formando um hidreto complexo ou através de uma ligação química [11].

Atualmente, as tecnologias com maior potencialidade para armazenamento do hidrogénio são:

- Depósitos (contentores) de hidrogénio como gás comprimido (350-700 bar)
- Depósitos (contentores) de hidrogénio liquefeito (-252,8 °C)
- Armazenamento no subsolo em grutas como gás comprimido
- Armazenamento em hidretos metálicos

O armazenamento em pequenas quantidades, em condições normais, é realizado em contentores, pressurizados a 100-300 bar ou na forma líquida, mas também através da tecnologia dos hidretos metálicos. Atualmente, a tecnologia com maior desenvolvimento para armazenamento de grandes quantidades passa pelo armazenamento em cavidades subterrâneas com pressões até 200 bar e que em alguns casos podem armazenar até 500.000 m<sup>3</sup>, ou 167 GWh de hidrogénio. Existem pelo menos 3 exemplos de armazenamento em cavidades subterrâneas nos Estados Unidos e outros 3 no Reino Unido [12].

O hidrogénio pode ser utilizado diretamente como combustível através da injeção na rede de gás natural, em percentagens limitadas, para ser consumido em mistura com o gás natural.

A injeção de hidrogénio na rede de gás natural representa uma possibilidade de integração no sistema energético que acrescenta alguns benefícios, mas também algumas limitações principalmente relacionadas com a adequabilidade dos materiais da rede de transportes ao hidrogénio e à menor densidade energética deste face ao gás natural. Desta forma, a mistura do hidrogénio terá de ser limitada. No entanto, em países com boa cobertura de rede de gás natural, a mistura com pequenas percentagens de hidrogénio representa um enorme potencial de integração de eletricidade que de outra forma seria desperdiçada. Estudos mostram que misturas até 2% seriam possíveis sem necessidade de qualquer ajuste nas infraestruturas de transporte e utilização do gás natural [8]. Esta é uma hipótese de integração também a ser considerada, sendo ainda necessário desenvolver e harmonizar normas técnicas ao longo de toda a cadeia, incluindo estações de compressão, tanques, turbinas a gás e veículos a gás natural.

## 2.3 - Utilização do hidrogénio

### 2.3.1 - Matéria-prima na indústria

Atualmente, a nível global, a indústria é o sector consumidor de hidrogénio mais significativo: 62,4% nas instalações associadas à produção de amónia; 24,3% na refinação de petróleo e 8,7% na produção de metanol [6]. Devido às grandes quantidades consumidas nestes processos, em geral o hidrogénio é produzido localmente por reformação a vapor utilizando como matéria-prima o gás natural ou, em alguns casos, subprodutos dos processos industriais. A substituição de parte deste hidrogénio enquanto matéria-prima por hidrogénio renovável representa um grande potencial de diminuição das emissões de gases com efeito de estufa, utilizando infraestruturas de armazenamento local.

Em Portugal existe já longa experiência de produção, transporte, armazenamento e consumo de hidrogénio. O hidrogénio é desde há muito tempo utilizado na indústria de refinação e noutras indústrias químicas em menor escala, sendo produzido nas refinarias por reformação de hidrocarbonetos, em função do seu mais baixo custo e do investimento já realizado no passado. Também em Portugal, a possibilidade de utilizar hidrogénio renovável, obtido a partir de eletricidade renovável em períodos de excesso de produção, apresenta um potencial de descarbonização em processos industriais com custo-benefício acrescido, uma vez que utilizaria infraestruturas de consumo já existentes.

### 2.3.2 - Matéria-prima para transformação em combustível

Os processos em cadeia que conduzem de gás natural ou carvão, passando por hidrogénio como produto intermédio, para conversão final noutro tipo de combustível líquido ou gasoso, enquadram-se no que foi referido atrás em 2.1.1. Neste ponto pretende-se focar a atenção nos processos que produzem hidrogénio de forma sustentável e livre de emissões (eletrólise com base renovável ou a partir de biomassa), para posterior reação com carbono já disponível, por exemplo com origem em processos de CCS.

O já referido processo de Fisher-Tropsch permite, partindo do gás de síntese, a produção de hidrocarbonetos de dimensão variável em função das condições de temperatura, pressão e catalisador utilizado, traduz-se na seguinte reação química simplificada:



A reação de Fisher-Tropsch requer temperaturas de 220-350 °C, pressões de 1 a 30 bar e um catalisador, que é condição essencial para a reação e para a especificação do produto final da reação. Catalisadores à base de níquel promovem a produção de metano, enquanto catalisadores à base de ferro produzem hidrocarbonetos adequados à produção de combustíveis líquidos. O cobalto e o ruténio são outros elementos utilizados como catalisadores, mas os seus custos mais elevados constituem um entrave significativo na gama de aplicações possíveis [13].

O gás de síntese pode também ser convertido em metanol, aliás atualmente a maior parte do metanol produzido globalmente tem origem em gás de síntese, que pode ser diretamente utilizado como combustível, misturado com gasolina ou transformado em aditivos para gasóleo (DME – éter dimetílico).



### 2.3.3 - Combustível em pilhas de combustível

As pilhas de combustível, num processo inverso à eletrólise, requerem uma alimentação contínua com um combustível para manter uma reação eletroquímica e produzir um fluxo de eletrões num circuito externo, uma corrente elétrica. Os constituintes básicos de uma pilha de combustível são os dois eletrodos, um negativo (ânodo) e um positivo (cátodo), e um eletrólito entre eles que permite a passagem de iões mas não de eletrões (Figura 10). Em geral, quer no ânodo quer no cátodo, utilizam-se catalisadores que potenciam as reações de oxidação e redução do  $H_2$  e do  $O_2$ . O eletrólito, que permite a passagem dos iões mas não dos eletrões, é componente fundamental na produção da corrente de eletrões que passam do ânodo para o cátodo, através do circuito externo.

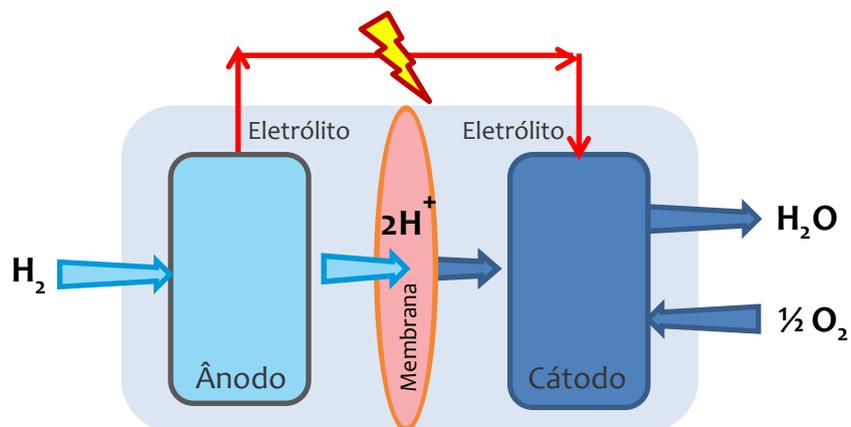


Figura 10 - Esquema simplificado de uma pilha de combustível a hidrogénio (Ilustração DGEG)

No ânodo é fornecido o combustível,  $H_2$ , que se dissocia, originando protões e eletrões:



No cátodo os iões de hidrogénio, eletrões e oxigénio reagem formando moléculas de água:



As equações apresentadas evidenciam que a reação eletroquímica, consumindo hidrogénio e oxigénio, tem como subproduto apenas a formação de vapor de água.

Como referido anteriormente para os eletrolisadores, existem diferentes tipos de pilhas de combustível, que variam nos materiais usados e nas condições de funcionamento. As pilhas de membrana permutadora de protões (*proton exchange membrane fuel cell - PEM FC*) e as pilhas alcalinas funcionam com temperaturas mais baixas. As pilhas do tipo óxidos sólidos (*solid oxide fuel cell - SOFC*), carbonatos fundidos e ácido fosfórico, operam com temperaturas mais elevadas e são mais adequadas para aplicações fixas em regime de cogeração, para produção simultânea de eletricidade e calor. Em sistemas de cogeração instalados em edifícios ou em processos industriais, a eficiência global dos sistemas pode chegar aos 95% [14].

Em Portugal, têm sido realizados vários projetos de investigação nesta área e, no que se refere ao desenvolvimento de protótipos de pilhas de combustível com coordenação nacional, é de salientar, o projeto de investigação Unircell, coordenado pela Universidade de Aveiro, que tem como objetivo desenvolver um protótipo de célula de combustível (*Unitised Regenerative Fuel Cell - URFC*), a partir de materiais mais baratos e com maior eficiência, capaz de realizar a eletrólise da água e o processo inverso de transformação de hidrogénio em eletricidade, num mesmo equipamento (Figura 11).

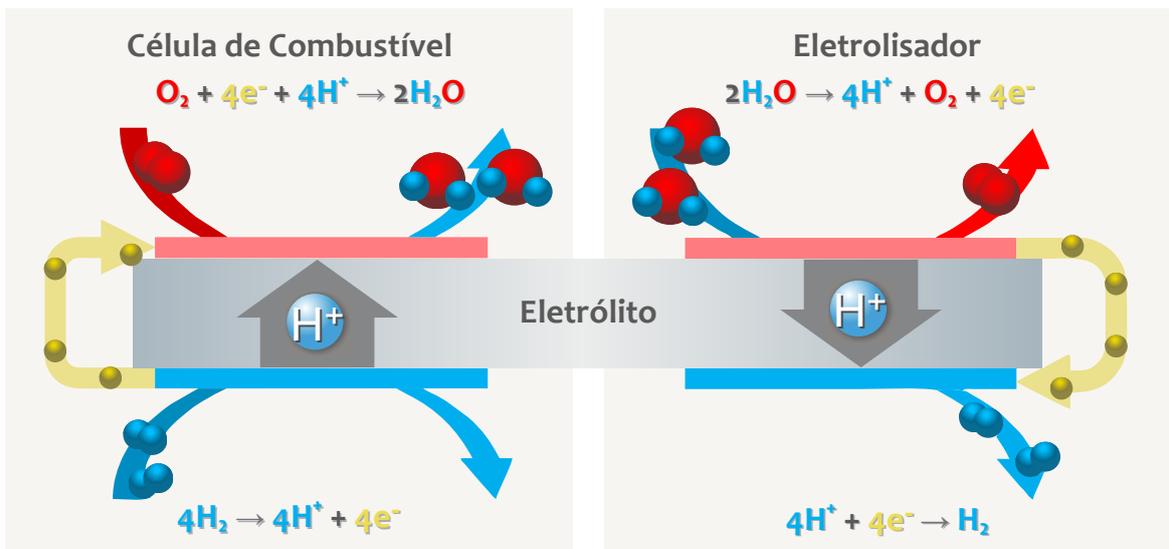


Figura 11 - Esquema do protótipo URFC do projeto Unircell [15]

Existem várias alternativas tecnológicas em que o hidrogénio pode contribuir para a descarbonização do sector dos transportes, no entanto os veículos elétricos a pilhas de combustível (*fuel cell electric vehicles – FCEV*) têm sido uma tecnologia considerada promissora e em contínuo desenvolvimento. Comparativamente aos veículos elétricos com baterias (*battery electric vehicles – BEV*), os FCEV têm a vantagem de menor tempo de reabastecimento (cerca de 3-5 minutos para um ligeiro de passageiros) e, para a mesma distância de autonomia, menor peso e volume do sistema de armazenamento de energia como se ilustra na Figura 12 [16].

### Comparação para uma autonomia de 500 km

Sistema de armazenamento de energia	Diesel	Hidrogénio comprimido a 700 bar 6 kg H <sub>2</sub> = 200 kWh de energia química	100 kWh de energia elétrica Bateria de íons 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 12 - Peso e volume de sistemas de armazenamento de energia para diferentes vetores. Comparação para uma autonomia de referência 500 km [16]

Atualmente, o custo dos veículos com pilhas de combustível ainda é superior ao custo dos veículos com baterias recarregáveis, apesar de alguns estudos apontarem para um aumento da competitividade desta tecnologia no médio prazo mesmo comparado com as tecnologias mais tradicionais (ICE - *internal combustion engine*, PHEV – *plug-in hybrid electric vehicle*), como se mostra na Figura 13 [17].

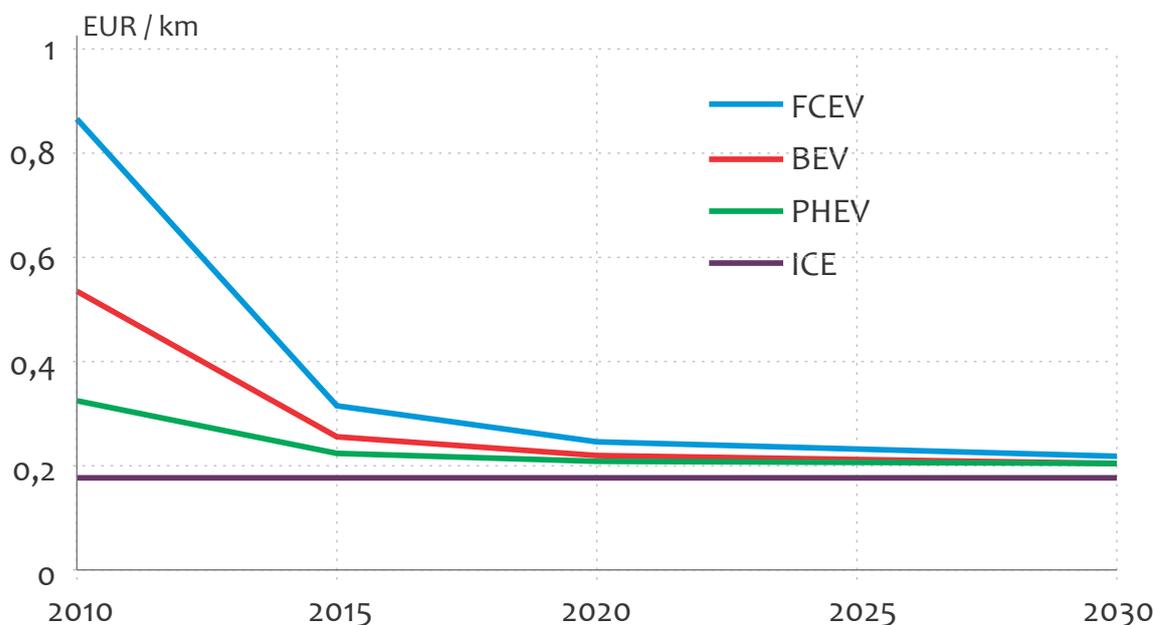


Figura 13 - Custo total de propriedade (TCO) de tecnologias de motorização automotiva [17]

A utilização das tecnologias de hidrogénio em veículos pesados de mercadorias, devido ao seu elevado consumo energético por unidade de distância e às longas distâncias que percorrem, poderá constituir um terreno privilegiado para a implantação dos FCEV, face a outras alternativas de eletrificação, em particular os BEV. No entanto, estas duas tecnologias continuam a ter desenvolvimentos e a evoluir de forma que não é possível prever qual será a combinação ganhadora a médio-longo prazo. A utilização de hidrogénio em frotas de transporte de passageiros ou mercadorias, é uma solução muito eficiente do ponto de vista técnico e financeiro, pois permite concentrar as operações de armazenamento e distribuição e tornar mais eficiente o investimento nos veículos e na infraestrutura.

Já existem no mercado internacional vários modelos de veículos ligeiros de passageiros a hidrogénio, apesar de em Portugal a sua comercialização ainda não estar implantada nem existirem postos de abastecimento. Atualmente, existem redes públicas de abastecimento de hidrogénio, por exemplo na Califórnia, no Japão e em alguns países europeus, incluindo Alemanha, Dinamarca, Islândia, Noruega, Suécia, França, Reino Unido e Holanda, estando em processo de implantação uma rede de distribuição pan-europeia [18].

Apresenta-se na Figura 14 alguns exemplos de casos reais de utilização de hidrogénio no sector dos transportes rodoviários, ligeiros e pesados, de mercadorias e de passageiros. Apesar de em menor número, existem também algumas aplicações já realizadas no sector do transporte ferroviário, marítimo e aéreo.



Autocarro Toyota Sora [19]



Automóvel Toyota Mirai [20]



Bicicleta Alpha [21]



Scooter Suzuki Burgman [22]

Figura 14 - Exemplos de casos reais de utilização de hidrogénio em transporte rodoviário

### 2.3.4 - Utilização em cadeia no armazenamento de energia

Num sistema energético sustentável, otimizado e eficiente, a capacidade de armazenar energia é tão importante como a capacidade de gerar energia. As tecnologias que permitem a produção e armazenamento de hidrogénio para posterior geração de eletricidade constituem uma alternativa ao armazenamento de energia como baterias, bombagem em centrais hidroelétricas ou armazenamento em ar comprimido. O hidrogénio tem a vantagem de permitir o armazenamento de grande quantidade de energia durante longos períodos de tempo permitindo mitigar a variabilidade entre estações do ano de fontes como a energia solar, eólica ou até das ondas.

Em relação a outras tecnologias de armazenamento, as experiências já implantadas mostram que o armazenamento estacionário sob a forma de hidrogénio apresenta vantagem para instalações com maior potência disponível (tipicamente acima de 10 MW) e pode tornar-se interessante para períodos de armazenamento superiores ao semanal [8][23].

O hidrogénio permite uma maior penetração das fontes de energia renovável não apenas no sistema de produção de energia elétrica, mas igualmente na distribuição de energia entre sectores e regiões, oferecendo uma integração mais eficiente e flexível das fontes de energia renováveis no mix energético – e em particular das FER intermitentes –, por três vias principais [24]:

- (i) Convertendo e valorizando os períodos de excesso de eletricidade renovável em hidrogénio – via eletrólise da água. O  $H_2$  produzido pode então ser usado como fonte flexível de energia armazenada (centralizada, descentralizada) face a quebras de produção no sistema elétrico ou em outros sectores (*sector coupling*), como por exemplo nos transportes (combustível alternativo) ou no sistema de abastecimento de gás (combustível complementar) ou na indústria (matéria-prima).
- (ii) Armazenando e utilizando o hidrogénio como solução de armazenamento sazonal, sem emissão de carbono a longo prazo. As baterias, os supercondensadores e o ar comprimido também podem suportar esta função, contudo não possuem a capacidade ou têm valores muito reduzidos de auto-descarga do armazenamento de energia necessário para resolver desequilíbrios sazonais. A energia hidroelétrica através de bombagem, altamente dependente da disponibilidade hídrica, é atualmente a via principal de armazenamento em grande escala e, no longo prazo, com a qual o hidrogénio armazenado terá de competir.
- (iii) Facilitando a distribuição inter- e intra-regional e/ou sectorial da energia. Como o hidrogénio e seus compostos têm uma alta densidade de energia e são fácil, eficiente e economicamente transportados, o transporte canalizado de hidrogénio poderá ajudar a (re)distribuir energia de forma eficaz e flexível se for economicamente viável.

Por exemplo na Escócia, foi recentemente instalado um sistema *power-to-gas* com eletrolisador do tipo PEM e uma potência de 1 MW, em que o hidrogénio é usado para armazenar eletricidade renovável excedentária produzida em alturas de pico, para posterior transporte e utilização em pilhas de combustível noutra região [25].



---

Figura 15 - Eletrolisador de 1 MW com três pilhas de 350 kW visíveis.  
Foto do projeto Surf 'n' Turf [25]

---

### 2.3.5 - Utilização integrada em sistemas autónomos

Para além de elemento integrador, o hidrogénio enquanto vetor energético pode também ser um elemento chave na definição de sistemas energéticos autónomos, que podem funcionar apenas com o hidrogénio ou ser híbridos e integrar outras tecnologias de transformação de energia.

No Japão existe o caso mais significativo de utilização de hidrogénio em sistemas autónomos. Com um sector residencial responsável por uma elevada percentagem do consumo energético do país, o Japão desenvolveu um programa para a instalação de pilhas de combustível com cogeração (*Fuel cell micro combined heat and power production unit – FC CHP*) em residências. Estes equipamentos consomem gás natural fornecido pela rede, fazem a sua reformação e produzem hidrogénio que é usado em pilhas de combustível, produzindo de forma combinada eletricidade e calor, conseguindo eficiências até 95% e diminuindo as emissões de gases com efeito de estufa em 50-60% [26]. Mais de 120.000 unidades destes equipamentos foram instaladas até 2015, estando neste momento a ser desenvolvidos equipamentos em que o hidrogénio é produzido a partir de tecnologia fotocatalítica, sendo a luz solar e um agente catalisador que promovem a dissociação da água [27].

Na Europa, também se registam iniciativas que promovem a instalação de FC CHP, por exemplo o projeto ene.field (2012-2017), que permitiu a implantação de 1000 unidades FC micro CHP [28], e o projeto PACE (2016-2021), que prevê a instalação de 2650 unidades FC micro CHP [29].

Em Portugal, à semelhança de outros países, existem aplicações consumidoras de eletricidade em locais isolados e que constituem oportunidades para a implementação de projetos. Alguns exemplos são as antenas de telecomunicações, sistemas de bombagem de água ou edifícios longe da rede elétrica nacional. Nestes locais poder-se-ia recorrer à produção de hidrogénio no local através de sistemas híbridos, através da produção de eletricidade por exemplo com recurso a tecnologia fotovoltaica ou eólica, permitindo o armazenamento de energia sob forma de hidrogénio para posterior transformação em função das necessidades.



## 3 - Identificação de oportunidades e desafios em Portugal

### 3.1 - Introdução

Para identificar os desafios que se colocam à produção, distribuição e utilização do hidrogénio enquanto vetor energético em Portugal, utilizou-se a abordagem estratégica SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, threats* / forças, fraquezas, oportunidades, ameaças), adequada para situações em que se pretende lançar as bases para a definição de um conjunto de estratégias que orientem e apontem caminhos [30]. Numa análise SWOT, começam por se identificar os pontos fortes e os pontos fracos existentes, a nível interno, que permitirão aproveitar as oportunidades e lidar com as ameaças e desafios que se colocam em termos externos. Esta abordagem, em utilização desde os anos 60 do século passado, continua a ser respeitada e prevalece no desenho e planeamento estratégicos, assistindo na identificação de relações com o Ambiente, bem como para o desenvolvimento de linhas adequadas a países, organizações ou outras entidades [30], tal como o Hidrogénio, na presente análise.

### 3.2 - Método

Nesta abordagem, a análise interna aos pontos fortes e fracos para a utilização do hidrogénio, enquanto vetor energético, foi essencialmente de base documental (incluindo legislação, políticas existentes e em preparação, planos de investimento, metas traçadas, infraestruturas existentes, opinião dos consumidores, conhecimento nacional disponível, revisão bibliográfica, etc.), mas também apoiada pela experiência e conhecimento formal e tácito da equipa de projeto.

Visando o aprofundamento da análise para identificação das oportunidades e das barreiras (reais e percebidas), desenvolveu-se posteriormente um *workshop* (13 de março de 2017) com a participação de cerca de cinquenta atores, representando diferentes grupos de *stakeholders* (partes interessadas) (Anexo 1) identificados na cadeia de valor do hidrogénio.

A sessão contou, numa primeira parte em formato de sessão plenária, com o enquadramento sobre o tópico «O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono», com apresentações de peritos nacionais e internacionais, contribuindo para a identificação dos pontos fortes e fracos. Mais tarde – em quatro sessões paralelas incluídas na segunda parte da sessão - foram identificados pelos participantes oportunidades e desafios através da dinâmica de cada discussão e dos contributos escritos resultantes, o que contribuiu igualmente para a análise interna dos pontos fortes e pontos fracos. Cada grupo contou com um facilitador, representando as fases da cadeia de valor (produção, armazenamento, distribuição) e a fase de consumo. Esses contributos foram seguidamente agrupados e sintetizados – de acordo com cada uma das fases, bem como um conjunto de aspetos transversais que emergiram durante as sessões de trabalho.

### 3.3 - Resultados

Os resultados das sessões paralelas são apresentados em tabela no Anexo 3, tendo sido compilados e agrupados em termos de «oportunidades» e «desafios», para cada uma das fases da cadeia de valor do hidrogénio e para os temas transversais às mesmas.<sup>1</sup>

A partir dos pontos fortes e fracos identificados pelo projeto [31], e das opções de oportunidades e desafios identificados nas sessões paralelas do *Workshop* (Anexo 2), faz-se uma proposta de representação da primeira análise SWOT neste processo (Figura 16).

---

<sup>1</sup> Agradecem-se os contributos recolhidos no 1º *Workshop* no âmbito do Projeto “Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade” (POSEUR-01-1001-FC-000004), realizado em Lisboa a 13 de março de 2017.

	Pontos fortes	Pontos fracos
Fatores Internos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• H<sub>2</sub> no mix energético (PNAER)</li> <li>• Flexibilidade do vetor energético</li> <li>• Rede de gás natural existente</li> <li>• Introdução nas redes locais é fácil</li> <li>• Stock de biomassa existente</li> <li>• Capacidade industrial existente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência à descentralização</li> <li>• Quadro regulamentar e normativo</li> <li>• Literacia sobre H<sub>2</sub> (cidadão, decisor e financiador)</li> <li>• Projetos de demonstração</li> <li>• Instrumentos de política sectorial</li> <li>• Competição tecnológica</li> <li>• Mecanismo de garantias de origem</li> </ul>
	Oportunidades	Desafios
Fatores Externos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I&amp;I e valorização das FER (excesso, intermitência e sazonalidade)</li> <li>• Segurança de abastecimento</li> <li>• Integração inter-sectorial</li> <li>• Autonomia e descentralização</li> <li>• Descarbonização da economia</li> <li>• Comunicação e sensibilização</li> <li>• Novos modelos de negócio</li> <li>• Cluster tecnológico emergente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição de estratégia nacional</li> <li>• Natureza sistémica dos projetos</li> <li>• Massa crítica disponível</li> <li>• Fatores de difusão tecnológica, e.g.: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Complexidade na utilização</li> <li>- Gestão do risco</li> <li>- Preços e competição com FER</li> </ul> </li> <li>• Custo-benefício e investimento</li> <li>• Criação da procura</li> </ul>

Figura 16 - Proposta de análise SWOT na abordagem do hidrogénio em Portugal

### 3.4 - Discussão de resultados

Os resultados alcançados permitem constatar que, aos atributos da tecnologia e da sua oportunidade já identificados no panorama internacional, acrescem igualmente condições para garantir a oferta e distribuição de novos combustíveis de origem renovável no sistema energético a nível nacional:

- a) Condições de contexto: O enquadramento de política nacional oferece condições mínimas permitindo enquadrar desde já uma primeira iniciativa neste domínio – a preparação de um Roteiro para o Hidrogénio em Portugal;
- b) Fragilidades importantes em diferentes áreas, ao nível da adaptação das políticas, legislação, regulamentos e instrumentos de apoio a uma tecnologia com carácter sistémico e cujo potencial será tanto melhor realizado quanto mais integradora for a sua aplicação na economia e na sociedade (regulamentação, normalização); da tecnologia (por exemplo, maturidade tecnológica diferenciada ao longo da cadeia de valor, e da competição com outras fontes energéticas renováveis); bem como das condições de mercado e do quadro regulamentar e de práticas de segurança preventiva ao longo da cadeia de valor e na fase de utilização, do planeamento plurianual de recursos e atividades, e da comunicação, formação e sensibilização.

Dito isto, será fundamental que o projeto “Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade” (POSEUR-01-1001-FC-000004) seja inclusivo – tendo presente as diferentes partes que afetam ou são afetadas pela decisão (i.e. os *stakeholders*), na identificação e organização das propostas a gerar no plano de trabalhos. Neste sentido, o projeto integra a consulta e envolvimento de partes interessadas, nomeadamente através da realização de diferentes *workshops* bem como a constituição de uma rede formal de apoio ao hidrogénio.

No sentido de evoluir para esse patamar de envolvimento e discussão subsequente, inicia-se no Capítulo 4 a preparação dessa condição necessária começando por enquadrar o hidrogénio no sistema económico em sentido amplo, assumindo uma perspetiva integrada intra- e intersectorial, e possibilitando seguidamente abordar o *mix* energético emergente e o papel das tecnologias alternativas e do processo de inovação no planeamento estratégico da transição energética.

## 4 – A necessidade de abordagem integrada e sistémica

O potencial do hidrogénio como vetor de energia, bem como matéria-prima na indústria, é bem conhecido. No entanto não tem conseguido ganhar escala com impacto generalizado no sistema económico devido a inúmeras barreiras, nomeadamente do domínio económico e das infraestruturas dedicadas. Além disso, há que considerar também a opinião pública que, muitas das vezes, constitui uma barreira significativa à implementação de novas tecnologias.

Nesta perspetiva, é essencial uma abordagem integrada e não apenas intra-sectorial – pela sua relação e criação de sinergias com outras fontes energéticas (por exemplo, bioenergia e eletricidade renovável) –, mas igualmente intersectorial (i.e. *sector coupling*), potenciando a elaboração e análise de diferentes cenários para desenvolvimento de apoio à decisão.

É expectável que a economia do hidrogénio tenha impacto em diferentes sectores de atividade económica e na sociedade, podendo criar sinergias com as abordagens para a economia circular (Figura 17).

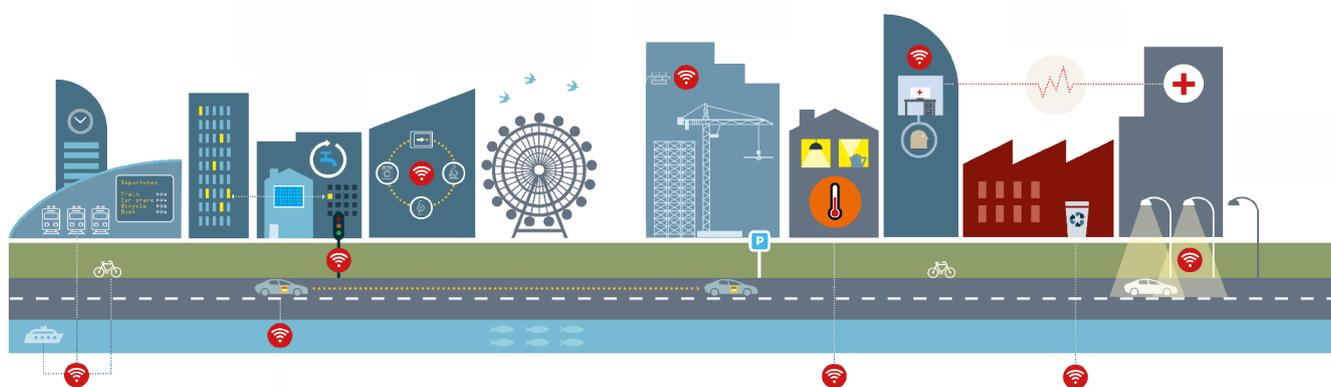


Figura 17 - Impacto generalizado na sociedade e nas atividades económicas da economia do hidrogénio. Figura adaptada [32]

A modelação de um sistema que integra os diversos sectores – eletricidade, mobilidade, aquecimento e arrefecimento, indústria – permite gerar informação útil para a avaliação de políticas aplicáveis à transição para uma economia de baixo carbono.

É convicção atual que as oportunidades do hidrogénio em soluções integradas de baixo carbono não dependem de um único combustível, tecnologia ou sector. O hidrogénio é capaz de oferecer redução de emissões em vários sectores e tem demonstrado ser um importante facilitador em sistemas complexos pela sua integração. A análise comparada destes sistemas evidencia a necessidade de uma abordagem integrada que permita aos decisores políticos avaliarem as diferentes opções.

Será assim possível desenvolver um conjunto de políticas adequadas integrando o papel facilitador do hidrogénio – que não pode ser considerado de forma isolada, dado o seu carácter transversal ao sistema económico, nomeadamente o seu potencial para criar sinergias com outras fontes energéticas, como sejam outros combustíveis, gasosos ou líquidos.

A criação das sinergias acima referidas será fundamental para o desenvolvimento e sucesso de tal conjunto de políticas. Serão fatores estimuladores da sua implantação os aspetos seguintes:

- Exigência nos objetivos da descarbonização;
- Elevados níveis de incorporação das FER na eletricidade renovável;

- Reduzido desenvolvimento do CCS, obrigando a alternativas, por exemplo hidrogénio;
- Elevado custo marginal na redução de CO<sub>2</sub>, i.e. são necessários investimentos em infraestruturas e em tecnologias alternativas, por exemplo associadas ao hidrogénio;
- Disponibilidade em infraestruturas para o hidrogénio;
- Potencial para o hidrogénio intervir no sector *coupling*, penetrando e descarbonizando diferentes sectores, por exemplo: (a) Transporte de mercadorias por substituição dos biocombustíveis – razão pela qual se aponta que o hidrogénio pode competir com a bioenergia neste subsector dos transportes; ou (b) Impulsionador do armazenamento de energia por via da produção de hidrogénio a partir de biomassa.

Sendo reconhecidos ao hidrogénio efeitos na economia atuando como impulsionador ou competidor, face a outras vias alternativas como acontece por exemplo nas sinergias geradas com a bioenergia e a eletricidade renovável, a gestão das melhores opções não deverá excluir a hipótese do hidrogénio não ser a opção mais adequada num dado contexto (regional, local). A emergência do hidrogénio dependerá assim do *mix* de política em cada sistema económico (por exemplo, eficiência, perfil da procura, recursos disponíveis, emissões). A título ilustrativo, atenda-se aos domínios da bioenergia e da eletricidade renovável.

No domínio da bioenergia, será o caso por um lado da conversão em hidrogénio da energia da biomassa ou por outro lado o hidrogénio como alternativa energética face à pressão competitiva global exercida sobre os recursos para a bioenergia, como por exemplo no caso das matérias-primas alimentares, pelo que é fundamental que todas essas opções sejam identificadas nos modelos de análise para efeitos de tomada de decisão.

No domínio da eletricidade, importa considerar se a economia do hidrogénio está a concorrer ou não com a eletricidade renovável para o quadro das economias nacionais. Em sentido positivo existem já evidência de que contribui para a penetração das FER melhorando a eficiência dos custos do sistema gerador eólico por via da gestão do remanescente gerado no sistema produtor. Com efeito, a geração crescente de energia eólica nos sistemas de energia representa um motor para o aumento da geração e armazenamento de hidrogénio, alimentando os eletrolisadores com esse excesso de eletricidade enquanto o *output* em hidrogénio subsequente alimenta as pilhas de combustível.

Ao adotar esta forma de abordagem, consoante o modelo energético e industrial de cada país, pode tornar exequível a integração do hidrogénio num *mix* de estratégias apontadas a diferentes sectores de atividade económica onde variam tanto as vias de conversão como as aplicações. Serão por exemplo as aplicações seguintes: (a) Tipo '*power-to-power*' na integração elétrica em edifícios e na mobilidade elétrica por via das pilhas de combustível (existem cenários que apontam para a introdução do hidrogénio até 2030 no transporte de mercadorias); (b) Tipo '*power-to-gas*' na rede de gás em edifícios, na mobilidade e na indústria; (c) Tipo *power-to-industry* na descarbonização dos sectores do ferro e aço.

## 5 - Conclusões e recomendações – A necessidade de um roteiro

O processo de transição para uma economia de baixo carbono tanto no quadro da União para a Energia como no contexto nacional exige mudanças disruptivas no paradigma energético.

No quadro da política Europeia existe, conforme exposto no Capítulo 1, uma importante oportunidade para a produção e utilização do hidrogénio no sistema energético em cada economia nacional, perante as múltiplas dimensões desta temática.

A incerteza e a complexidade da análise em torno desta abordagem têm origem em primeira instância nas especificidades da configuração do sistema a nível nacional, regional e local, i.e. soluções *mainstream*, de nicho, desenhadas ou a desenhar caso-a-caso, incluindo a capacidade de planeamento de infraestruturas e medidas de política, condições de escalabilidade e comparabilidade de resultados no desempenho das tecnologias e sistemas associados.

O paradigma atual de produção e utilização de energia terá de ser orientado para a descentralização do abastecimento e a descarbonização profunda da economia. Esta nova orientação conduzirá a uma série de inovações disruptivas e incrementais subsequentes, as quais passam nomeadamente pela crescente eletrificação da economia e pela gestão integrada do portfólio de fontes de energia renováveis estrategicamente mais atrativo, para além da necessidade de desenvolvimento de diferentes configurações de redes para a distribuição de eletricidade.

A eficiência e eficácia do portfólio das FER depende nomeadamente do *mix* energético escolhido, das características da tecnologia, e do modo como as fontes de energia renováveis são adoptadas nos contextos de utilização. A difusão e adoção de cada tecnologia FER estão associadas a características intrínsecas e extrínsecas (por exemplo sazonalidade e intermitência) que conduzem a mecanismos de competição e/ou de complementaridade – onde o hidrogénio ocupa um lugar e oportunidade singulares, por ser um vetor energético flexível com capacidade de intervenção em diferentes níveis do sistema no seu todo. Por essa razão, propõe-se que se adote um modelo integrado do tipo representado na Figura 7, que permite análises detalhadas e de complexidade variável. Estas são úteis para a discussão e revisão de metas de política por exemplo na descarbonização da economia, no aumento da utilização de eletricidade renovável, bem como na otimização de impactes positivos e negativos das configurações sistémicas selecionadas em função das dimensões de análise (energética, económica, ambiental, social, regulamentar).

Urge pois planear essa oportunidade através de um roteiro nacional para a promoção do hidrogénio em Portugal, procurando-se associar aos atributos da tecnologia as oportunidades e desafios que se vêm identificando quer internacionalmente quer no contexto nacional, tendo presente para a sua operacionalização as respetivas condições multidimensionais e incluindo a auscultação dos diferentes grupos de *stakeholders* tal como se reporta no Capítulo 3.

Uma vez conhecidas as prioridades de desenvolvimento, suportadas por uma análise multidimensional conforme se propõe neste projeto, é expectável pois que se projete e conceba um conjunto de políticas, programas e medidas de apoio adequado à mudança pretendida.

A importância estratégica do hidrogénio, bem como a sua viabilidade económica, social e ambiental, deve ser equacionada na política energética nacional num quadro de evolução estruturada, considerando nomeadamente:

1. Uma política de médio e longo prazo para orientação estratégica da transição energética em todos os sectores (energia, mobilidade, indústria, edifícios), pela diversificação das alternativas de origem renovável e um esforço gradual de adaptação legislativa e regulamentar de forma a serem criadas condições para promover um sistema nacional sustentável de produção e utilização do hidrogénio;
2. Políticas de coordenação nacional-regional de incentivo e monitorização para a implantação das

soluções desejadas de produção-utilização de hidrogénio, e de investimentos adequados no sector privado – que sejam complementares às políticas sectoriais e ao aproveitamento de efeitos de escala;

3. Promoção da reforma do mercado de energia em termos da remuneração da capacidade de balanceamento sazonal e da tributação, tendo em consideração os benefícios que o hidrogénio pode oferecer ao sistema energético;
4. Promoção dos instrumentos financeiros para alavancar o investimento privado, e fundos de garantia pública para mitigar o risco das primeiras iniciativas de demonstração à escala real.

É essencial pois a definição de um roteiro para o hidrogénio de modo a definir e monitorizar objetivos e metas de médio e longo prazo nas diferentes áreas de intervenção para o hidrogénio transversalmente ao sistema económico – incluindo uma indústria de bens de equipamento e materiais que lhe possa estar associada, bem como uma articulação eficaz entre as organizações que afetam e são afetadas pelo hidrogénio como vetor energético ou como matéria-prima. Neste sentido, condições de complementaridade, interligação e multidisciplinaridade são de grande importância para garantir aquela transversalidade, bem como ser motivo de análise cuidada a investigação atual e futura neste domínio (estudos, projetos), a educação, a formação e treino nas diferentes áreas que compõem um sistema sustentável de produção e utilização deste tipo.

- [1] DGEG, "Balanço energético 2016," Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa, 2018.
- [2] IEA, "Hydrogen and Fuel Cells, Technology Roadmap," International Energy Agency, Paris, 2015.
- [3] R. Steinberger-Wilckens, "Hydrogen as an Energy Vector in Europe," in Workshop "O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português", Lisboa, 2017.
- [4] C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas and N. Moussiopoulos, "Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 29, pp. 1443-1450, 2004.
- [5] A. Sgobbi, W. Nijs, R. de Miglio, A. Chiodi, M. Gargiulo and C. Thiel, "How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system, 41," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, pp. 19-35, 2016.
- [6] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes," Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 67, pp. 597-611, 2017.
- [7] E. S. Hanley and B. Ó. Gallachóir, "The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 3027-3045, 2018.
- [8] IEA, "Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells," International Energy Agency, Paris, 2015.
- [9] A. Iulianelli, P. Ribeirinha, A. Mendes and A. Basile, "Methanol steam reforming for hydrogen generation via conventional and membrane reactors: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 29, pp. 355-368, 2014.
- [10] B. Bailey, "Coal to Liquids - An Explanation," 2017. [Online]. Available: <http://www.caer.uky.edu/catalysis/coal-to-liquids.shtml>. [Accessed 02 2018].
- [11] US-DoE, "Fuel Cell Technologies Office," US Department of Energy, 2018. [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. [Accessed 02 2018].
- [12] Energy Storage Association, "Hydrogen Energy Storage," 2018. [Online]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/hydrogen-energy-storage>. [Accessed 02 2018].
- [13] National Energy Technology Laboratory, "Fisher Tropsch Synthesis," 2017. [Online]. Available: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/ftsynthesis>. [Accessed 02 2018].
- [14] H2-international, "ENE-FARM installed 120,000 residential fuel cell units," 2015. [Online]. Available: <https://www.h2-international.com/2015/09/21/ene-farm-installed-120000-residential-fuel-cell-units/>. [Accessed 02 2018].
- [15] Universidade de Aveiro, "Unircell project," 2017. [Online]. Available: [www.unircell.pt](http://www.unircell.pt). [Accessed 12 2017].
- [16] U. Eberle and R. v. Helmolt, "Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview," Energy & Environmental Science, vol. 3, pp. 689-699, 2010.
- [17] McKinsey & Company, "A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis," European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Brussels, 2010.
- [18] H2ME, "Hydrogen Mobility Europe," 2018. [Online]. Available: <https://h2me.eu/>. [Accessed 02 2018].
- [19] Toyota, "Front view of Toyota Sora fuel cell city bus at the 2017 Tokyo Motor Show," Wikimedia Commons, 2017.
- [20] ITM Power, "ITM Power - Energy Storage | Clean Fuel," 2018. [Online]. Available: <http://www.itm-power.com/>. [Accessed 01 2018].

- [21] Pragma Industries, "Pragma Industries - The Fuel Cell Company," 2018. [Online]. Available: <https://www.pragma-industries.com/>. [Accessed 01 2018].
- [22] Suzuki, "Tokyo Motor Show 2011: Suzuki Burgman Fuel Cell cutaway model," Wikimedia Commons, 2011.
- [23] European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, "Strategic Research Agenda," FCH JU, Brussels, 2005.
- [24] Hydrogen Council, "How hydrogen empowers the energy transition," The Hydrogen Council, Brussels, 2017.
- [25] Community Energy Scotland, "Surf 'n' Turf Project," 2018. [Online]. Available: <http://www.surfnturf.org.uk>. [Accessed 01 2018].
- [26] Tokyo Gas, "Development of the new model of a residential fuel cell, "ENE-FARM"," 2015. [Online]. Available: [http://www.tokyo-gas.co.jp/techno/english/menu3/2\\_index\\_detail.html](http://www.tokyo-gas.co.jp/techno/english/menu3/2_index_detail.html). [Accessed 02 2018].
- [27] Panasonic, "Demonstration experiment of the hydrogen fuel cell - making the entire value chain carbon-free," 2017. [Online]. Available: <http://news.panasonic.com/global/stories/2017/45928.html>. [Accessed 02 2018].
- [28] ene.field, "Ene.Field project webpage," 2017. [Online]. Available: <http://enefield.eu/>. [Accessed 02 2018].
- [29] FCH JU, "PACE - Pathway to a Competitive European FC MCHP Market," 2017. [Online]. Available: <http://www.fch.europa.eu/project/pathway-competitive-european-fc-mchp-market-o>. [Accessed 02 2018].
- [30] M. M. Helms and J. Nixon, "Exploring SWOT analysis – where are we now? A review of academic research from the last decade.," *Journal of Strategy and Management*, vol. 3, no. 3, pp. 215-251, 2010.
- [31] DGE, "Relatório do Workshop Inicial do Projeto - Resultados das Mesas-Redondas.," *Direção Geral de Energia e Geologia*, Lisboa, 2017.
- [32] A. Sukhdev, J. Vol, K. Brandt and R. Yeoman, "Cities in the Circular Economy: The Role of Digital Technology," 2017. [Online]. Available: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>. [Accessed 01 2018].

1. Programa do *Workshop* “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português”
2. Entidades participantes no *Workshop* “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português”
3. Contributos registados nas sessões paralelas do *Workshop* “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português”



## Workshop

### O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português

**Data:** 13 de março de 2017

**Local:** Lisboa – Hotel Holiday Inn Continental (Rua Laura Alves, 9)

#### Programa

- 08:30** Receção dos participantes
- 9:00 – 09:30** **Sessão de Abertura**  
Carlos Almeida - Diretor-Geral da *Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG)*  
Teresa Ponce de Leão - Presidente do *Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)*
- 09:30 – 09:50** **O hidrogénio como vetor energético na UE**  
Robert Steinberger-Wilckens - *Diretor do Centro de Investigação em Pilhas de Combustível da Universidade de Birmingham (Reino Unido) e membro do Comité Científico da Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*
- 09:50 – 10:10** **Implementação na Europa das tecnologias para o hidrogénio**  
Carlos Navas - *Diretor de Desenvolvimento de Mercados e Estratégia na Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*
- 10:10 – 10:30** **Iniciativa para avaliação do potencial e impacto do hidrogénio em Portugal**  
Isabel Cabrita – *Investigadora coordenadora e Chefe da Divisão de Estudos, Investigação e Renováveis da DGEG*
- 10:30 – 10:50** **Investigação e desenvolvimento tecnológico do hidrogénio enquanto vetor energético em Portugal**  
Carmen M. Rangel - *Investigadora coordenadora no LNEG*
- 10:50 – 11:15** Pausa para café
- 11:15 – 12:15** **Painel: “Estímulos e barreiras na elaboração do roteiro português do hidrogénio”**  
Robert Steinberger - *Centro Investigação em Pilhas de Combustível da Universidade de Birmingham (UK)*  
Denis Thomas - DG Indústria (CE)  
José João Campos Rodrigues - AP<sub>2</sub>H<sub>2</sub> - Ass. Port. para a Promoção do Hidrogénio  
Eunice Ribeiro - Gabinete Promoção Programa Quadro de I&DT (PT)  
Moderação: Isabel Cabrita
- 12:15 – 12:45** Debate
- 12:45 – 14:00** Almoço
- Sessões paralelas temáticas**
- 14:00 – 14:15** Apresentação dos temas e metodologia
- 14:15 – 16:00** Debate
- 16:00 – 16:30** Pausa para café
- 16:30 – 17:00** Plenário para apresentação de resultados
- 17:00** Encerramento



Cofinanciado por:



Anexo 2 - Entidades participantes no Workshop “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português”

Associação Portuguesa para Promoção do Hidrogénio - AP2H2

Center for environmental and sustainability research – CENSE (DCEA FCT-UNL)

Direção-Geral da Energia e Geologia - DGEG

Centre for Fuel Cell and Hydrogen Research - University of Birmingham (UK)

EDP Gestão da Produção de Energia SA

Embaixada da Federação da Rússia na República Portuguesa

Energal, Lda

Escola Superior de Tecnologia e Gestão - Instituto Politécnico de Portalegre

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Galp Energia SGPS SA

Gabinete de Promoção do Programa-Quadro de I&DT - GPPQ (FCT/ANI)

Hydrogenics Hydrogen Europe

IAPMEI — Agência para a Competitividade e Inovação, I. P.

Laboratório Nacional de Energia e Geologia - LNEG

Secil - Companhia geral de cal e cimento, SA

SOLVAY PORTUGAL - PRODUTOS QUÍMICOS, SA

STI - Sistemas e Técnicas Industriais Lda

Tecnoveritas - Serviços de Engenharia e Sistemas Tecnológicos Lda

Anexo 3 - Contributos registados nas sessões paralelas do Workshop “O hidrogénio na transição para uma economia de baixo carbono: elaboração do roteiro português”

	Oportunidades	Desafios
Produção	<p><u>Hidrogénio produzido a partir de FER (sol, vento):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valorização das FER nas intermitências, otimização face à sazonalidade e/ou excesso de produção;</li> <li>- Redução da pegada de carbono nos combustíveis tradicionais;</li> <li>- Estabilização do preço de combustível ao longo do tempo, e.g. próximos 20 anos (mercado interno e exportação);</li> <li>- Direito a “tarifa verde”, tal como outras FER.</li> </ul> <p><u>Desenvolvimento de tecnologias de produção (curto e longo prazos):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Curto prazo (TRL alto):</b> reformação do metano; eletrólise a baixa temperatura.</li> <li>- <b>Longo prazo (TRL baixo):</b> CSP (termólise) / eletrólise a alta temperatura; gaseificação mais eficiente de biomassa; fotocátalise; biossíntese a partir de resíduos orgânicos.</li> </ul>	<p><b>A curto prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabelecer mecanismos de Garantias de Origem (inexistentes à data);</li> <li>- Obter permissão para autoconsumo de energia elétrica nas centrais que produzem hidrogénio, de forma a evitar custos de rede;</li> <li>- Reformação do <math>CH_4</math>;</li> <li>- Eletrólise a baixa temperatura;</li> <li>- Substituição de <i>feedstock</i> (mistura com gás natural).</li> </ul> <p><b>A longo prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção descentralizada;</li> <li>- <i>Feedstock</i>: renovável e não renovável;</li> <li>- <i>Waste-to-gas</i> (orgânico);</li> <li>- <i>Power-to-gas</i> (PV, CSP → <math>H_2</math>);</li> <li>- Eletrólise a alta temperatura;</li> <li>- Gaseificação de biomassa (TRL 7-8);</li> <li>- Fotocatálise (TRL 2-3).</li> </ul>
Armazenamento	<p><u>Hidrogénio como vetor energético no domínio do armazenamento e <i>backup</i>, contribuindo para a diversificação das soluções de segurança energética:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Armazenamento de longa duração em alternativa ao armazenamento de curta duração das baterias;</li> <li>- Alternativa ao não-armazenamento;</li> <li>- Valorização do excesso das FER;</li> <li>- Intensificação das FER com variabilidade sazonal no sistema eletroprodutor (i.e. balanço da rede através do hidrogénio).</li> </ul> <p><u>Desenvolvimento de tecnologias de armazenamento, das respetivas cadeias de valor, e adaptação da indústria nacional ao seu fabrico;</u></p> <p><u>Desenvolvimento do quadro normativo para o armazenamento.</u></p>	<p><b>A curto prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir o quadro legal para o armazenamento simplificado, centralizado e descentralizado;</li> <li>- Criar quadro normativo do sector, nomeadamente na área do armazenamento, tendo presente que a normalização do armazenamento a 700 bar (350 bar) é recente;</li> <li>- Caracterizar o risco, definir as condições de segurança e a percepção do consumidor neste domínio;</li> <li>- Vetor energético armazenável e balanço de rede (resposta às FER intermitentes);</li> <li>- Elaboração de quadro regulamentar e normativo;</li> <li>- Analisar a viabilidade económica da compressão do <math>H_2</math> gasoso (TRL 9).</li> </ul> <p><b>A longo prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Promover o desenvolvimento de um <i>cluster</i> sectorial;</li> <li>- Desenvolver sistemas autónomos de produção-armazenamento-consumo;</li> <li>- Aplicar óxidos sólidos (TRL 4-5).</li> </ul>

	Oportunidades	Desafios
Distribuição	<p><u>Integração na rede de gás natural permite:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valorizar a nível nacional, parte do hidrogénio produzido;</li> <li>- Aproveitar as redes de transporte e distribuição do gás natural;</li> <li>- Introduzir o H<sub>2</sub> nas redes locais;</li> <li>- Facilitar a descarbonização do sector gás.</li> </ul> <p><u>Transporte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção descentralizada permite evitar o transporte;</li> <li>- Rodoviário (<i>tube trailers</i>) é solução de curto prazo para pequenas quantidades e distâncias curtas (inferiores a 50 km);</li> <li>- Via gasoduto (H<sub>2</sub> pipelines) é solução de curto prazo para grandes quantidades e grandes distâncias, e no longo prazo como solução de transporte mais viável.</li> </ul> <p><u>Produção &amp; Distribuição local de H<sub>2</sub> via FER:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzir custos de distribuição;</li> <li>- Complemento local para sistemas energéticos existentes que ficariam a funcionar de forma híbrida;</li> <li>- Hipótese de criação de zonas energeticamente autónomas (conceito de 'ilha de energia').</li> </ul> <p><u>Outras condições de funcionamento:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de regulamentar, certificar e homologar a distribuição, e de promover as condições de segurança na distribuição;</li> <li>- Criar incentivos à distribuição, e atividade normativa associada.</li> </ul>	<p><b>A curto prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elaborar enquadramento legal para injeção na rede de gás natural;</li> <li>- Preparar competências, procedimentos e fichas de segurança (e.g. dados sobre segurança de estruturas em caso de acidente);</li> <li>- Elaborar requisitos para teste dos novos combustíveis;</li> <li>- Analisar impacte na segurança do aprovisionamento;</li> <li>- Explorar novos modelos de negócio caracterizados por proximidade e flexibilidade na distribuição;</li> <li>- Adaptar a rede de distribuição existente;</li> <li>- Analisar a viabilidade económica do transporte em fase gasosa, ou em fase líquida.</li> </ul> <p><b>A longo prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Promover este vetor energético em locais remotos, e áreas insulares (conceito de 'ilha de energia');</li> <li>- Promover sistemas autónomos de funcionamento híbrido;</li> <li>- Analisar novas oportunidades de mercado;</li> <li>- Construir infraestruturas dedicadas (gasodutos).</li> </ul>
Consumo	<p><u>Mobilidade:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação mais referida;</li> <li>- Aplicação ao transporte pesado de mercadorias e passageiros;</li> <li>- Redução por efeito de escala das despesas de capital nas estações de abastecimento de hidrogénio garantindo complementaridade de usos em cada estação (viaturas ligeiras, frotas dedicadas de viaturas ligeiras, frotas de</li> </ul>	<p><b>A curto prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Construir aceitação pública para um novo combustível e para o seu papel na criação de valor na sociedade;</li> <li>- Educar e informar o cidadão comum sobre o papel e as vantagens do H<sub>2</sub>, dado haver falta de confiança na tecnologia (motivada por falta de informação...);</li> <li>- Sensibilizar o cidadão para a segurança no</li> </ul>

	Oportunidades	Desafios
Consumo (cont.)	<p>viaturas pesadas incl. autocarros);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intenção de reduzir as emissões poluentes no transporte público rodoviário para promover a utilização de hidrogénio (melhorar qualidade do ar em meio urbano).</li> </ul> <p><b>Indústria:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação em processos de refinação e combustíveis sintéticos, na condição da produção ser próxima do consumo;</li> <li>- Aplicação à refrigeração de máquinas industriais e condicionamento do ar;</li> <li>- Alimentação elétrica de máquinas (mais) pesadas, a tecnologia integrada nas baterias é limitante pelo que a tecnologia do hidrogénio será uma vantagem;</li> <li>- Reforçar a inovação de produto e de componentes (e.g. micro cogeração e trigerção adaptadas às necessidades locais; processo de queima do gás natural com incorporação de H<sub>2</sub> superior a 20%).</li> </ul> <p><b>Segurança:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisão/adaptação dos protocolos de segurança e manuseamento ao nível do consumidor.</li> </ul> <p><b>Comunicação e Sensibilização:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilização social para segurança e “funcionalidade” de utilização e contributo para melhoria do desempenho ambiental;</li> <li>- Imagem positiva do consumo de energias renováveis.</li> </ul>	<p>consumo;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar a percepção sobre as tecnologias energéticas também ao nível do sector financeiro (banca, seguros);</li> <li>- Criar procura, e comunicar as vantagens do vetor H<sub>2</sub> ao consumidor (existe comunicação deficiente);</li> <li>- Patrocinar projetos de demonstração singulares e com escala sistémica (<i>flagship projects</i>);</li> <li>- Trabalhar a relação 'custo/qualidade' (incl. custos de capital e operacional), incl. fatores que favorecem efeitos de escala (elevado preço da tecnologia);</li> <li>- Compatibilização da atuação à escala local / regional / nacional;</li> <li>- Obter apoio das políticas públicas face ao início da curva de difusão tecnológica (e.g. retorno do investimento);</li> <li>- Manter base comparativa entre a complexidade, flexibilidade e custo do hidrogénio nas áreas de aplicação (e.g. mobilidade), face aos outros combustíveis;</li> <li>- Promover a adoção de tecnologias de mobilidade a hidrogénio;</li> <li>- Reduzir o custo dos veículos a hidrogénio.</li> </ul> <p><b>A longo prazo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir objetivos locais / regionais concretos para estimular a procura no longo prazo;</li> <li>- Inovação nos queimadores para maior incorporação de H<sub>2</sub>;</li> <li>- Desenvolver sistemas autónomos integrando FER;</li> <li>- Integrar PEM no sector da mobilidade se economicamente competitivo (TRL 8-9, até 2030).</li> </ul>
Transversais	<p><b>Vetor energético:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contribui para a descarbonização do sistema energético e para a redução da dependência externa de energia primária;</li> <li>- Contribui para as condições de segurança no abastecimento;</li> </ul>	<p><b>Definir uma estratégia nacional e sectorial (curto, médio e longo prazos);</b></p> <p><b>Contribuir para a implementação da política pública (e.g. redução da dependência energética via H<sub>2</sub> no mix energético nacional; Descarbonização e redução dos GEE - metas plurianuais);</b></p>

## Oportunidades

- Utilidade em locais remotos e isolados, e.g. áreas insulares (permite autonomia ao nível da produção, armazenamento, distribuição e consumo de zonas exclusivas com hidrogénio);
- Permite o desenvolvimento de um *cluster* tecnológico associado à economia do hidrogénio.

## Desafios

Desenvolver o enquadramento legal, regulamentar e normativo (e.g. aplicação aos projetos-piloto e de demonstração), e promover projetos-piloto demonstradores e integradores;

Contribuir para a estabilidade/ previsibilidade tecnológica e regulamentar;

Contribuir para a literacia sobre H<sub>2</sub>, realizando por exemplo ações de sensibilização, informação e formação (diversos públicos-alvo, incl. design e decisão política);

Atender ao elevado preço atual da eletricidade comparativamente ao baixo preço do carbono;

Atender ao *mix* de apoios existentes (e.g. políticas de enquadramento, apoios financeiros ao investimento, fiscalidade sobre o CO<sub>2</sub> (valor, economias externas);

Apoiar a análise custo-benefício e o investimento, tendo em consideração atualmente os CAPEX e OPEX elevados;

Atender no sector da mobilidade ao elevado preço das tecnologias de hidrogénio e.g. veículos movidos a pilhas de hidrogénio face às soluções alternativas;

Comunicar à sociedade o custo real associado à não descarbonização de combustíveis fósseis, em suporte a decisões racionais do lado do consumo (internalização das externalidades negativas);

Promover a investigação de nível académico por forma a melhorar a massa crítica neste domínio, e patrocinar a ligação entre academia / instituições de investigação e as empresas / autarquias;

Definir os custos padrão da tecnologia e o respetivo custo-eficácia comparativamente com tecnologia concorrente;

Promover a integração com outras tecnologias e a integração intersectorial das aplicações;

Acompanhar o TRL das tecnologias: próximo de 7 nas tecnologias mais evoluídas, e de 3-4 quando requerem mais desenvolvimento;

Promover a criação de mercados, e especialização de áreas de negócio;

Resolver o dilema “...onde não há consumo não há rede de distribuição...”, e o seu inverso;

Criação de regulamento e permissão de acesso à atividade de balanço da rede;

Promover estudos de impactes e de riscos.





Cofinanciado por:



ISBN 978-9-72826-845-9



9 789728 268459