ROTEIRO E PLANO DE AÇÃO PARA O HIDROGÉNIO EM PORTUGAL



Direção-Geral de Energia e Geologia

REPÚBLICA PORTUGUESA
AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA

Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal



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

Ficha Técnica

Título:
"Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal"

Edição:
1ª Edição

Data:
Dezembro 2019

Tiragem:
1000 exemplares

ISBN: 978-972-8268-50-3
Autor: Direção-Geral de Energia e Geologia
Suporte: Impresso

ISBN: 978-972-8268-51-0
Autor: Direção-Geral de Energia e Geologia
Suporte: Eletrónico

Produção:
Printipo-Indústrias gráficas, Lda.

Depósito Legal: 469524/20

Índice

Sumário executivo 11
Visão 17
1. Introdução 19
2. Metodologia 22
2.1 Análise energética 25
2.2 Avaliação de Impactes Ambientais do Ciclo de Vida (ACV) 27
2.3 Análise de Custos 28
3. O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal 29
4. Desenvolvimento do Plano de Ação 33
4.1 Tipologia de ações – Critérios 35
4.2 Plano de ação 36
4.2.1 - Medidas e ações – Legislação e regulamentação 39
4.2.2 - Medidas e ações – Normalização 40
4.2.3 - Medidas e ações – Mobilidade 41
4.2.4 - Medidas e ações – Injeção nas redes de gás natural 42
4.2.5 - Medidas e ações – Produção de eletricidade e calor 43
4.2.6 - Medidas e ações – Produção, armazenamento ou utilização de hidrogénio 44
4.2.7 - Medidas e ações transversais 45
5. Análise da oportunidade e impacte previsional das ações 46
5.1. Oportunidade e competitividade do hidrogénio renovável 46
5.2. Análise previsional dos impactes em diferentes dimensões 50
5.2.1 - No domínio científico e tecnológico 50
5.2.2 - Na competitividade das empresas 51
5.2.3 - No domínio social 51
5.2.4 - No custo do hidrogénio e no impacte económico 52
5.2.5 - Nos impactes ambientais e redução das emissões de GEE 59
5.2.6 - No domínio do mercado 60
5.2.7 - No domínio da política energética e ambiental 61
5.2.8 - No domínio do desenvolvimento regional/local 62
6. Monitorização do Plano 63
6.1 Indicadores exemplificativos 63
6.2 Plano de monitorização e revisão 64
7. Conclusões e Recomendações 66
Referências 72
ANEXO I 74

Índice de figuras

Figura 1 Panorama da participação alcançada durante a terceira mesa redonda, integrada na discussão pública do Roteiro para o Hidrogénio a 3 de Dezembro de 2018 21

Figura 2 Proposta de Roteiro para a implementação do Hidrogénio em Portugal 32

Figura 3 Níveis de maturidade tecnológica (TRL) e tipos de atividade a considerar num planeamento integrado da operacionalização do Roteiro 36

Figura 4 Plano de ação para a integração do hidrogénio 38

Figura 5 Evolução dos custos de produção do hidrogénio em função do fator de carga do eletrolisador (exemplo da Dinamarca) 47

Figura 6 Custos do hidrogénio para diferentes preços da eletricidade e do CAPEX para o eletrolisador com uma capacidade de carga de 48% 48

Figura 7 Roteiro tecnológico Europeu para a eletrólise 49

Figura 8 Evolução temporal do *mix* de tecnologias de produção do hidrogénio 49

Figura 9 Evolução da utilização de H_2 fóssil, com e sem CCS, e H_2 renovável, na refinação de combustíveis 50

Figura 10 Efeito cumulativo dos parâmetros mais significativos na evolução do custo de produção do hidrogénio (LCOH) 53

Figura 11 Consumo total de eletricidade e trocas com a rede elétrica para diferentes valores de produção anual de H_2 54

Figura 12 Quantificação dos cenários de produção do hidrogénio renovável no sistema energético nacional 55

Figura 13 Quantificação dos cenários de utilização do hidrogénio no sistema energético nacional e exportação 55

Figura 14 Investimentos para implementação da capacidade de produção e consumo de hidrogénio 2020-2040 58

Figura 15 Potencial previsional de redução das emissões de GEE decorrentes da introdução do hidrogénio 60

Índice de tabelas

Tabela 1	Identificação de medidas e ações – Legislação e regulamentação	39
Tabela 2	Identificação de medidas e ações – Normalização	40
Tabela 3	Identificação de medidas e ações – Mobilidade	41
Tabela 4	Identificação de medidas e ações – Injeção na rede de gás natural	42
Tabela 5	Identificação de medidas e ações – Produção de eletricidade e calor	43
Tabela 6	Identificação de medidas e ações – Produção, armazenamento ou utilização de hidrogénio	44
Tabela 7	Identificação de medidas e ações transversais	45
Tabela 8	LCOH do hidrogénio considerando o efeito cumulativo da otimização dos parâmetros do sistema	53
Tabela 9	Custo de investimento das tecnologias de produção e consumo de hidrogénio	56
Tabela 10	Energia elétrica convertida em hidrogénio de acordo com o RNC 2050	56
Tabela 11	Quantificação de estações de abastecimento de hidrogénio e de veículos em circulação	57
Tabela 12	Custo de veículos a hidrogénio e equivalente a combustível fóssil	57
Tabela 13	Redução de emissões de GEE previsionais em cada setor, após adoção do hidrogénio	59



João Galamba
Secretário de Estado Adjunto e da Energia

Preâmbulo

Portugal submeteu à Comissão Europeia o seu Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 no qual estabeleceu metas e objetivos para o setor da energia para a próxima década que colocam o país na trajetória rumo à descarbonização da economia: queremos atingir uma incorporação de 47% de fontes renováveis no consumo final de energia e de 80% de renováveis na produção de eletricidade, reduzir para 65% a dependência energética do exterior e reduzir em 35% o consumo de energia primária.

A descarbonização do setor energético representa uma extraordinária oportunidade para Portugal aumentar o investimento produtivo, aumentar o emprego qualificado, reduzir as importações substituindo-as por recursos endógenos renováveis e colocar o país na liderança na luta contra as alterações climáticas.

O caminho para uma economia neutra em carbono exige uma ação conjunta em diversas áreas estratégicas, pelo que a estratégia de Portugal para o horizonte 2030 assentará numa combinação de diversas opções de políticas e medidas, bem como de diferentes opções tecnológicas, procurando encontrar sinergias entre as várias opções.

Neste contexto, merece particular destaque a aposta na produção e incorporação de gases renováveis, com o hidrogénio em destaque, promovendo desta forma uma substituição dos combustíveis fósseis mais activa, tirando partidos dos recursos endógenos e promovendo o investimento e o desenvolvimento de novas áreas e tecnologias, promovendo em simultâneo a descarbonização de vários setores da economia.

Estão já em curso diversas ações por parte do Governo com vista a promover uma política industrial em torno do hidrogénio e dos gases renováveis, que se baseia na definição de um conjunto de políticas públicas que orientam, coordenam e mobilizam investimento público e privado em projetos nas áreas da produção, do armazenamento, do transporte e do consumo de gases renováveis em Portugal.

Portugal apresenta condições muito favoráveis para a instalação de uma indústria de produção de hidrogénio verde com potencial exportador que será igualmente um catalisador de toda uma nova economia associada ao hidrogénio.

A descarbonização e a transição energética devem ser encaradas como desígnios mobilizadores de toda a sociedade portuguesa. Esta é uma grande oportunidade estratégica para o país, que implica a mobilização de todas as partes envolvidas.



João Correia Bernardo
Diretor Geral de Energia e Geologia

Preâmbulo

Todos temos a consciência de que a energia é um fator vital para a manutenção do nosso modo de vida. No entanto, a sua utilização nos termos e condições atuais pode comprometer seriamente o desejável e necessário equilíbrio entre o desenvolvimento económico e a sustentabilidade do nosso ecossistema. É esse equilíbrio, despido de visões e discursos extremistas, capaz de propiciar melhor qualidade de vida, maior igualdade social, competição económica mais justa, crescimento do conhecimento científico e tecnológico e respeito pelo ambiente que, justamente, a Transição Energética procura alcançar.

Esta transição energética não se limita a uma mudança numa qualquer tecnologia energética ou fonte de combustível. Trata-se de uma verdadeira mudança de paradigma que envolve as políticas, os modelos, as infraestruturas, os sistemas, as tecnologias e as fontes de energia e, sobretudo, as pessoas.

Não só porque são as pessoas o catalisador da mudança, mas também porque são elas que, gradualmente, se vão colocando no centro das decisões sobre a forma como consomem energia, mas também, sobre a forma como a produzem.

Neste cenário o hidrogénio tem um papel crucial. As questões técnicas relativas à sua produção, transporte, armazenagem e consumo têm vindo a ser estudadas e aprofundadas e muitas das limitações encontradas já estão ultrapassadas ou em vias de o ser. Pode e deve ser produzido com recurso a fontes renováveis e recorre a uma matéria-prima, a água, que cobre mais de 70% da superfície terrestre. Só este simples facto, o da democratização dos recursos energéticos, permite perspetivar o fim dos monopólios e das dependências associados aos combustíveis fósseis, com todas as questões geoestratégicas implícitas. Também, e ao contrário da maior parte das fon-

tes de energia, o hidrogénio, enquanto vetor energético, pode ser utilizado de forma praticamente universal, seja para produção de eletricidade, produção de calor e frio, como combustível para todas as formas de locomoção, seja nos mais variados setores de atividade onde a energia é necessária, indústria, serviços, edifícios, entre outros.

Ao utilizar as energias renováveis para a sua produção, a futura sociedade do hidrogénio caminha de braço dado com estas fontes. O seu desenvolvimento conjunto e integrado é, pois, condição essencial para o sucesso desta estratégia. Essa, é aliás, a mensagem que consta no Plano Nacional integrado Energia e Clima (PNEC 2030), recentemente enviado à Comissão Europeia,

No entanto é preciso não esquecer que não é possível nem desejável embarcar em transições bruscas nem ruturas tecnológicas irracionais. As fontes de energia fóssil vão continuar a contribuir durante alguns anos para que o Mundo continue a funcionar sem comprometer drasticamente o nosso modo de vida, o que significa ter energia a preços acessíveis para satisfazer a procura. Não há outra forma. A transição para um sistema energético mais seguro e sustentável ainda vai obrigar a grandes investimentos na produção, nas infraestruturas de redes e na eficiência energética, estimados pela Comissão Europeia em cerca de 200 mil milhões de euros por ano na próxima década. Mas é precisamente aqui que entra este Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio para Portugal.

O presente trabalho é, em primeiro lugar, uma sequência da reflexão e análise que a DGEG tem realizado neste domínio, através dos trabalhos "O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios de integração", de 2018 e "Integração do Hidrogénio nas cadeias de valor", publicado em 2019. Mas é, sobretudo, um contributo muito significativo e estruturado de uma visão amplamente participada que recolheu opiniões em reuniões, grupos de reflexão e fóruns, em que se apresentou e discutiu um conjunto vasto de abordagens e cenários sobre esta temática, cujos resultados se encontram reunidos e consolidados aqui.

O Roteiro e Plano de Ação do Hidrogénio para Portugal tem por objetivo geral introduzir gradualmente o hidrogénio como o motor principal do processo de transição para um sistema energético descarbonizado, potenciando o descomissionamento de centrais com consumos fósseis e estimulando o desenvolvimento de produção renovável. Para além disso, desenvolve uma análise da oportunidade e competitividade do hidrogénio renovável e uma análise previsional dos impactes do hidrogénio em diferentes dimensões.

Portugal prepara-se para a avançar para um projeto de referência mundial no território nacional, em Sines, através de uma candidatura ao IPCEI (*Important Projects of Common European Interest*) em parceria com a Holanda e com a participação de vários investidores privados. O objetivo é o de produzir 465 mil toneladas de hidrogénio por ano, recorrendo à energia solar e eólica a preços competitivos. Esta produção pretende aproveitar e otimizar as infraestruturas de rede (elétricas e de gás natural) existentes, bem como o terminal marítimo de Sines para exportação do hidrogénio, estabelecer um posto de abastecimento para veículos a hidrogénio e potenciar a

criação de uma indústria dedicada (painéis PV, eletrolisadores e outros componentes) e estruturar áreas de investigação técnica e económica que garantam o suporte cientifico e tecnológico para o desenvolvimento de uma economia do Hidrogénio que coloque Portugal na liderança do conhecimento e utilização deste vetor energético.

O momento é agora. A oportunidade deste trabalho não podia ser mais feliz.

Sumário executivo

A transição energética a nível global está a evoluir de forma mais rápida do que seria previsível devido aos investimentos massivos em novas tecnologias avançadas de produção de energia renovável e de armazenamento. As tendências futuras no abastecimento acessível e seguro de energia limpa dependem do papel crucial das atividades, recursos, estratégias e das políticas a nível nacional, além dos ganhos de escala que vêm sendo adquiridos por via do alinhamento das políticas a nível mundial. No *design* dos sistemas, a mudança transformacional em curso ir-se-á expressar de maneiras completamente novas. A integração do impacte climático na estrutura das atividades económicas não é apenas de elementar responsabilidade, é crítica por marcar a forma e ritmo como se desenvolvem e consolidam as tecnologias limpas nas cadeias de valor. Como não existem soluções únicas e absolutas, deveremos:

a) Recorrer a todas as tecnologias disponíveis que se revelem úteis à mitigação por via sustentável das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), particularmente na planificação mais detalhada após 2030;
b) Desenvolver um sistema de energia mais sustentável e inteligente, incluindo a capacidade de armazenamento apropriada a cada situação.

A transformação do sistema energético nacional em condições de sustentabilidade requer a combinação transversal das cadeias de produção-uso de energia de baixo carbono, de eficiência energética nas suas diferentes vertentes, e a partilha energética entre setores. Neste contexto, adquiriu um interesse significativo na última década a (re)aplicação dos conceitos de energia ao hidrogénio (H_2), concretamente relacionados com o hidrogénio produzido por via renovável e a custos competitivos, com a flexibilização da gestão da procura e oferta, o armazenamento a diferentes escalas e a transferência de energia entre os setores de atividade, designadamente por via das redes de energia.

Nesse contexto, a avaliação do potencial do hidrogénio em Portugal e os seus impactes foram analisados pela Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) neste projeto, o que permitiu:

- Desenvolver um Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio, por forma a propor a sua integração faseada no sistema energético, tendo presente a realidade nacional;
- Contribuir para as iniciativas estratégicas nacionais em curso, no quadro da transição para um sistema energético descarbonizado, permitindo intervir em particular na discussão e preparação do Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030), tendo presente a visão da neutralidade carbónica em 2050;

- Pôr em perspetiva o hidrogénio como vetor energético versátil, dado o potencial para descarbonizar toda a economia se for produzido por vias limpas. Atualmente a produção de hidrogénio a nível internacional é ainda dominantemente baseada em combustíveis fósseis. Cerca de 96% do hidrogénio 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. A eletrólise da água, quando utilize exclusivamente eletricidade renovável produz hidrogénio 'renovável' por vezes designado por 'verde'. O hidrogénio 'castanho' resulta da gaseificação do carvão ou do gás natural. O hidrogénio 'cinzento' é produzido a partir da reformação do metano (SMR). O hidrogénio 'azul' é obtido quando a produção via SMR é tratada em seguida com captura e armazenamento de carbono (CCS).

Concretamente o presente Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal inclui várias vertentes, legislação e medidas regulamentares, I&D+I e aplicações tendo em conta as várias cadeias de valor de acordo com a maturidade das várias tecnologias integrantes. Nesta perspetiva, prevê-se igualmente a necessidade/oportunidade para I&DT + i.



A proposta DGEG para o Roteiro do Hidrogénio tem por objetivo geral introduzir gradualmente o hidrogénio como pilar sustentável integrado num processo de transição para um sistema energético descarbonizado. Neste Roteiro identificam-se as estratégias para a adoção e difusão do hidrogénio nos diferentes setores de atividade a nível nacional, bem como o Plano de Ação integrando medidas e ações para a sua implementação, tendo presente a realidade nacional e contribuindo assim para as iniciativas estratégicas nacionais em curso no quadro de uma transição energética - com metas intercalares no período 2020-2040, no sentido de alcançar a neutralidade carbónica em 2050.

O potencial de adoção das tecnologias para o hidrogénio na economia nacional, no quadro da transição energética em curso, assenta em dois argumentos principais:

- Ser uma opção de facilitação por excelência para os desejados efeitos de escala na descarbonização dos setores de atividade (transportes, edifícios e indústria), segmento a segmento e cadeias de valor subjacentes;
- Atuar a nível sistémico nesse processo, ao introduzir um mecanismo de flexibilização de energia transferível (setores, tempo, lugares, regiões), pelo que importa saber qual o papel e a ambição que deve ser atribuído ao hidrogénio em Portugal neste processo de transição energética.

Procurando ser estruturante, este Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal propõe pois a realização das seguintes iniciativas:

- Preparar a curto prazo legislação, regulamentação e enquadramento normativo e propor um quadro promotor deste paradigma em Portugal – aplicável aos diferentes setores. Este quadro deverá proporcionar a competição entre alternativas numa base energeticamente eficiente, custo-eficaz e minimizando os impactes ambientais negativos;
- Constituir-se como uma base de trabalho para criar uma dinâmica à escala nacional, principalmente a partir das cadeias de valor prioritárias, considerando o hidrogénio quer como vetor energético quer como produto industrial, as abordagens de nicho e as aplicações de grande escala, as escalas de abrangência e novos modelos de negócio;
- Promover, desenvolver e acompanhar a execução de projetos em diferentes setores e escalas, tendo em conta as prioridades nacionais (por exemplo cadeias de valor prioritárias), a maturidade tecnológica nas diferentes fases da cadeia de valor, a redução de custos unitários por armazenamento e a valorização das fontes de energia renovável intermitentes e sazonais;
- Implementar ações em coerência com o Roteiro e Plano para o Hidrogénio, dinamizando projetos inovadores com impacte local/regional e respetivos ganhos de escala quando justificado, rentabilizando as competências e capacidades nacionais;
- Reforçar as competências nacionais e a I&I, e a rentabilização do *stock* de ativos existentes em áreas da indústria nacional;
- Monitorizar e avaliar os progressos alcançados;
- Promover o efeito de cooperação e a Rede de Apoio à Inovação associada ao hidrogénio.

O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal identifica concretamente as configurações na cadeia de valor do hidrogénio com maior potencial de aplicabilidade em Portugal no imediato e a prazo:

- Aplicação à mobilidade (*Power-to-Mobility*): Aplicável antes de 2030 se o hidrogénio produzido por fontes renováveis for aplicado em transportes coletivos,

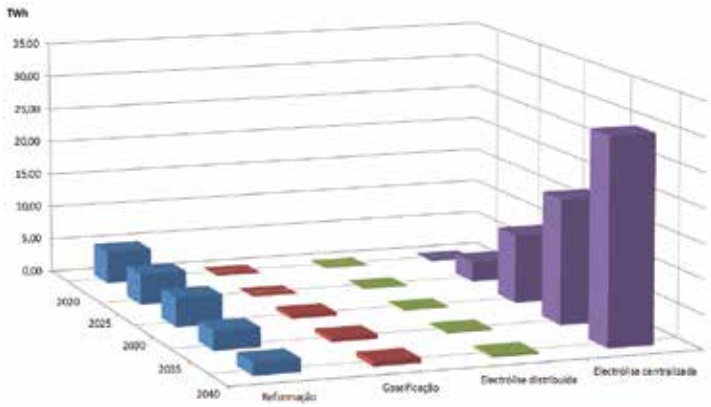
transporte pesados de mercadorias e frotas, e posteriormente em soluções individuais leves eletrificadas abastecidas com hidrogénio. O custo do hidrogénio depende da tecnologia de produção utilizada mas também da intensidade de compressão que é necessária de acordo com as opções de uso final, e do modelo de comercialização centralizado, semi-centralizado ou descentralizado;

- Injeção na rede de gás natural (*Power-to-Gas*): Aplicável antes de 2025 se o hidrogénio for produzido por eletrólise de alta eficiência alimentada por fontes renováveis. Ainda no curto prazo, as pilhas de combustível alimentadas a gás natural em regime de cogeração poderão igualmente ser uma solução, pela sua elevada eficiência e flexibilidade introduzida no processo de transição para combustível totalmente descarbonizado (hidrogénio);
- Produção de eletricidade e calor (*Power-to-Power*): Aplicável depois de 2030 com abastecimento com energia elétrica renovável, considerando índices de maturidade tecnológica mais elevados (maior eficiência, tempo de vida mais longo e custo de investimento mais baixo) ao longo da cadeia de valor e custos mais baixos da energia utilizada, aproveitando picos de produção renovável ou com produção renovável dedicada e evitando os custos associados à utilização de energia elétrica da rede.

A proposta DGEG permitiu ainda a identificação e análise dos aspetos críticos associados ao hidrogénio para a integração sistémica das energias renováveis. É o caso por exemplo da diversificação das fontes de abastecimento energético, dado que o hidrogénio deverá ser obtido a partir de diferentes fontes de energia renováveis (FER) intermitentes ou não. Essa energia deve ir a mercado com custos de produção competitivos, que permitam por um lado reforçar (p. exemplo a produção de hidrogénio descarbonizado em grande escala) e também diversificar as estratégias agora abordadas, como por exemplo a produção de combustíveis alternativos.

Faz-se seguidamente uma análise de oportunidades e de impactes previsionais em que, em alinhamento com as propostas desenvolvidas no âmbito dos trabalhos de preparação do PNEC 2030, são considerados cenários adicionais para a introdução do hidrogénio, detalhadamente descritos na secção “Análise da oportunidade e impacte provisional das ações”. Esta abordagem foi continuamente atualizada, acompanhando a evolução dos cenários do PNEC 2030 e de novos cenários de introdução mais acentuada do hidrogénio surgidos em final de 2019, permitindo uma análise e avaliação mais abrangentes e em diferentes dimensões.

O potencial de produção de hidrogénio no sistema energético nacional foi analisado considerando diferentes trajetórias tecnológicas para a produção de hidrogénio (ver figura seguinte).



Na **produção de hidrogénio renovável** (eletrólise; gaseificação de biomassa), a projeção da produção previsional em 2030 é a seguinte:

Produção H2 (TWh em 2030)[1]	PNEC ME	PNEC MA	H2 Base	H2 export +	H2 export -	H2 duplo
via gaseificação	-	0,08	0,48	0,48	0,48	0,48
via eletrólise dispersa	-	0,72	0,08	0,08	0,08	0,08
via eletrólise centralizada	-	-	10,02	10,02	10,02	20,04
Total de H2 produzido (TWh)	**-**	**0,82**	**10,59**	**10,59**	**10,59**	**20,61**

No **investimento**, o cumprimento das metas estabelecidas no PNEC2030 pressupõe a introdução do hidrogénio no sistema energético nacional já na década 2020-2030, embora de forma mais marcada apenas na década 2030-2040. Nesta análise aplicada aos cenários de introdução do hidrogénio - e tendo a eletrólise como referência de processo de produção de hidrogénio mais limpo e que melhor responde na generalidade aos requisitos do sistema energético nacional nos cenários de maior ambição – também se inclui a produção de hidrogénio com base na gaseificação de biomassa. Apresenta-se seguidamente o investimento previsional agregado para os períodos 2021-2030 e 2031-2040, relativo à implementação da capacidade de produção e consumo de hidrogénio nas cadeias de valor estratégicas consideradas prioritárias (*power-to-gas, power-to-mobility*, e *power-to-power*) conforme justificado antes (DGEG, 2019).

Investimento total por década	PNEC ME	PNEC MA	H2 Base	H2 export +	H2 export -	H2 duplo
Investimento 2021-2030 (M€)	111	1 377	5 590	5 566	5 633	9 906
Investimento 2031-2040 (M€)	80	2 046	9 400	9 326	9 542	9 695
Total de investimento até 2040	**191**	**3 424**	**14 990**	**14 891**	**15 175**	**19 601**

O **custo do hidrogénio no consumidor final** dependerá de muitos fatores, sendo o custo de produção um dos fatores principais. Os custos de produção publicados anteriormente (DGEG, 2019) são o fator de base para o preço, aos quais acrescerá necessariamente os custos de transporte e armazenamento, margem de comercialização do distribuidor e, finalmente, taxas e impostos. Tal como acontece com os restantes

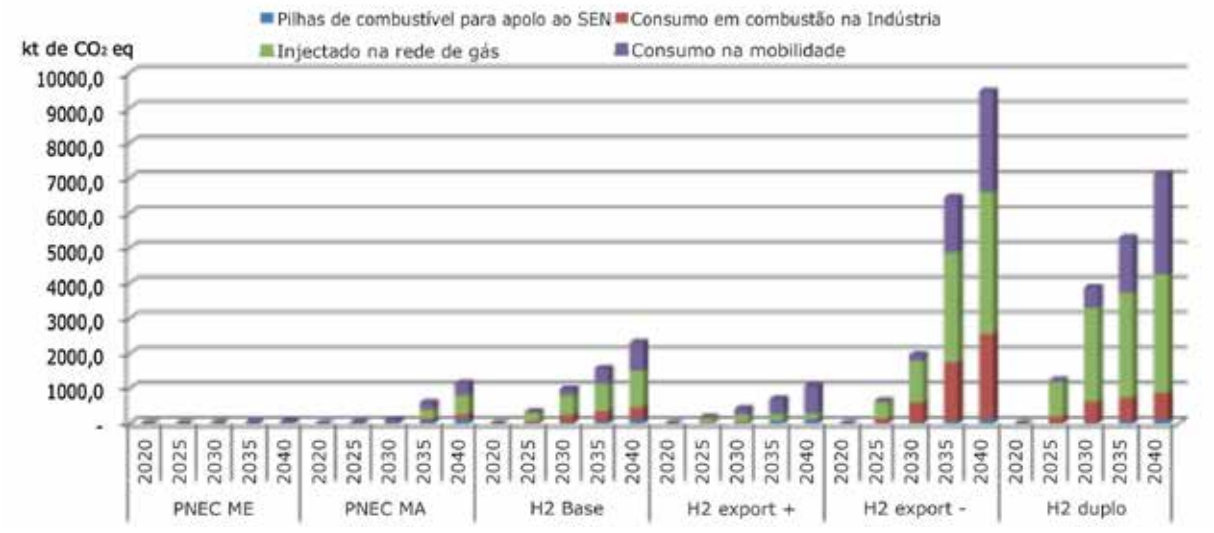
1 1 TWh = 30 kton H_2

combustíveis, o valor final de comercialização do hidrogénio poderá ser consideravelmente superior ao custo de produção. Assim, o patamar de 2 €/kg H_2 de custo de produção em 2030, poderá significar um custo final para o consumidor de 4-8 €/kg H_2, dependendo da otimização dos modelos de negócio e respetiva taxação.

Na difusão do hidrogénio na economia Portuguesa e no âmbito concreto da mobilidade/transportes, os números estimados de **estações de abastecimento de hidrogénio** a instalar e de **veículos a colocar em circulação** entre 2030 e 2040, são os seguintes:

	2020	2025	2030	2035	2040
Estações de abastecimento (capacidade de 60 kg H_2/hora com taxa de ocupação de 50%)	0	10	30	50	100
Veículos ligeiros em circulação	0	2 000	5 000	50 000	100 000
Veículos pesados em circulação	0	500	2 000	3 000	5 000

Na **redução de gases com efeito de estufa (GEE)**, a introdução do hidrogénio nas cadeias de valor permite reduzir as emissões de GEE associadas. Em benefício do rigor dessa contabilização, em cada cenário foram contabilizadas as emissões do ciclo de vida do hidrogénio, *i.e.* desde a produção do hidrogénio até ao uso final, incluindo as emissões do ciclo de vida da infraestrutura necessária nesse processo. Conforme se detalha na secção "Análise da oportunidade e impacte provisional das ações" – e em particular dos pressupostos usados na publicação da DGEG 2019 "Integração do Hidrogénio nas Cadeias de Valor: Sistemas energéticos integrados, mais limpos e inteligentes", o potencial de emissão GEE resultante traduz-se em reduções de emissões a nível global. Em forma de síntese, o potencial de redução de emissões GEE previsional em cada setor por kWh de hidrogénio introduzido no sistema energético é apresentada na Figura seguinte.



Finalmente, propõe-se um plano de monitorização incluindo um conjunto de indicadores de *input*, *output* e mistos, parte dos quais é alimentado pelo modelo de análise JANUS adotado nas projeções para o PNEC 2030.

Visão

O modelo atual de desenvolvimento económico e social da sociedade obriga à antecipação de iniciativas conducentes a uma maior integração de Energia e do Clima que se traduz numa preocupação crescente a nível de descarbonização da Economia. O hidrogénio é um vetor energético com grande potencial para alavancar de maneira acessível e competitiva esta descarbonização.

Assim, a estratégia a delinear e respetivo plano de ação deverá ser concordante com a ambição de dar sustentabilidade à introdução do hidrogénio em Portugal para que em 2050 a sua contribuição conduza à superação dos cenários anteriormente desenvolvidos, numa contribuição de, no mínimo, 6,5% do consumo final bruto de energia. O nível de introdução do hidrogénio em Portugal decorrente deste plano de ação, com a ambição de uma capacidade instalada em eletrólise a superar os 2 GW, tem a capacidade de aumentar a percentagem de renováveis no Consumo Final Bruto de Energia (CFBE) em 2030 em mais 4,2% quando comparado com o cenário PNEC e em até mais 8,6% em 2040, promovendo em simultâneo o aumento das exportações nacionais de energia, com origem em recursos endógenos e 100% renováveis. Em particular, a introdução do hidrogénio no setor do aquecimento e arrefecimento potencia o aumento da percentagem de renováveis neste setor em 5% em 2030 e em mais 10% em 2040. Salientando-se também a redução da dependência energética, que poderá baixar em mais 2% em 2030 e em mais 7,1% em 2040.

Como vetor de energia limpa, matéria-prima industrial e combustível, o hidrogénio pode facilitar a integração em larga escala de fontes renováveis através da conversão e armazenamento de hidrogénio renovável, permitindo a estabilidade da rede e o armazenamento a diferentes escalas, permitindo a conversão e descarbonização gradual quer da rede de gás natural por injeção controlada de hidrogénio quer da descarbonização progressiva da atividade industrial – quer nos processos energeticamente intensivos quer na captura, armazenamento e utilização de carbono (CCUS).

Havendo atualmente já evidência de que o hidrogénio representa, em determinados contextos de produção e uso, uma solução viável e económica na descarbonização de alguns setores mais difíceis da economia (transportes, aquecimento e arrefecimento e indústrias de uso intensivo de energia) e sendo, além disso, uma via tecnológica compatível com os padrões de uso/consumo atuais, a sua adoção deve ser promovida através de um plano coerente e consistente.

O *design* de um plano de ação estruturado e enquadrado no desenvolvimento económico e social e no sistema científico e tecnológico nacional, em estreita articulação com o desenvolvimento de iniciativas internacionais com especial foco na União Europeia, deve:

(i) Ser coerente com a regulamentação nacional para os combustíveis alternativos e para a promoção do hidrogénio;
(ii) Permitir desenvolver processos de aprendizagem, o diálogo e troca de experiências entre *stakeholders*;
(iii) Discutir desafios e soluções técnicas, tecnológicas e políticas no recurso ao hidrogénio e à sua adoção;
(iv) Promover as competências e capacidades nacionais para que de forma progressiva, e até 2050, o hidrogénio contribua de forma significativa, sustentável e de forma transversal na economia, para o balanço energético nacional.

1. Introdução

A transição energética a nível global está a evoluir de forma rápida e, de acordo com o Instituto Rocky Mountain (EUA), mais rápido do que previsível devido aos investimentos massivos em tecnologias avançadas para armazenamento (Bloch et al, 2019). No caso nacional, para transformar o sistema energético em condições de sustentabilidade é necessário garantir a combinação transversal do sistema nacional de cadeias de produção-uso de energia de baixo carbono, de eficiência energética nas suas diferentes vertentes e de partilha energética entre setores. Nesse contexto, o uso do hidrogénio (H_2) como vetor energético tem sido alvo de crescente interesse na última década, designadamente no que se refere às suas capacidades de flexibilização da gestão da procura e oferta, de armazenamento de energia a diferentes escalas e de interligação entre os setores de atividade.

A avaliação do potencial e impacto do hidrogénio em Portugal e a definição de um roteiro para o seu desenvolvimento e aproveitamento foi uma das medidas do Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER 2020) e no momento atual a integrar no Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030). O PNAER reconhecia as potencialidades do hidrogénio para o sistema energético nacional e determinou a necessidade de elaboração do roteiro em articulação com instituições do sistema tecnológico e científico nacional – o que se veio a concretizar.

Acresce mais recentemente, no quadro da prossecução das políticas atuais com vista a uma transição global para uma economia hipocarbónica, estarem em curso diferentes iniciativas para o desenvolvimento societal em resposta à urgência climática tanto a nível nacional como internacional, as quais confirmam a relevância da iniciativa e a oportunidade do projeto desenvolvido pela DGEG e cofinanciado pelo programa POSEUR. Além disso, estas iniciativas reforçam a necessidade de análise e avaliação da oportunidade do hidrogénio como vetor energético a nível sistémico à escala nacional.

O PNEC 2030 aponta linhas de atuação para promoção da produção de eletricidade e calor e/ou frio a partir de energias renováveis, nas quais se inclui o incentivo de ID&I no domínio do armazenamento, tecnologias de baixo carbono, hidrogénio e outros combustíveis 100% renováveis. Aponta ainda linhas de atuação para promoção da mobilidade sustentável que incluem o estímulo à transição energética do setor dos transportes, numa lógica de custo-eficácia, assente na eletrificação, nos biocombustíveis avançados e no hidrogénio, bem como o incentivo de ID&I nos sistemas de transportes. Está também prevista como linha de atuação a descarbonização da indústria, promovendo o uso de recursos renováveis, armazenamento de energia e a eletrificação.

Tendo presente este enquadramento estratégico de política, de modo a concretizar os objetivos e metas traçados, é proposta a dinamização de programas nacionais de ID&I, abordando diversas temáticas no sentido de contribuir complementarmente para a adoção e difusão do hidrogénio como vetor energético. É assim, considerada a transição para a sua produção por fontes energéticas renováveis e as suas diferentes utilizações suportadas por critérios de custo-benefício, por exemplo na área da mobilidade elétrica em complemento às baterias, na cogeração, na introdução na rede de gás natural e na transformação em combustíveis sintéticos.

O desenvolvimento de um Roteiro para introdução do hidrogénio enquadra-se nas prioridades do programa POSEUR para a promoção e integração sistémica das energias renováveis, na qual o hidrogénio está a emergir como vetor energético com grande potencial de aplicabilidade à economia nacional, 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 imediato, ou diferido por armazenamento, quer de recursos de biomassa quer da eletricidade renovável 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 eletrólise da água apoiada por FER ou a biomassa, 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.

No desafio colocado pela transição energética em curso, o potencial de adoção do hidrogénio na economia nacional assenta em dois argumentos principais:

- Ser uma opção de facilitação por excelência para os desejados efeitos de escala na descarbonização dos setores de atividade (transportes, edifícios e indústria) segmento a segmento, tendo subjacentes as respetivas cadeias de valor;
- Atuar a nível sistémico nesse processo, ao introduzir um mecanismo de flexibilização de energia transferível.

A análise realizada no âmbito do estudo desenvolvido e reportada na publicação DGEG (2019) – "Integração do Hidrogénio nas Cadeias de Valor" – permitiu aprofundar as diferentes opções no sentido de desenvolver e apresentar um Roteiro para o Hidrogénio em Portugal.

O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal, desenvolvido pela DGEG, foi objeto de apresentação e discussão pública a 3 de Dezembro de 2018 (Figura 1), tendo contado com

a participação de 148 pessoas, incluindo representantes de empresas, municípios, universidades e cidadãos.



Figura 1 – Panorama da participação alcançada durante a terceira mesa redonda, integrada na discussão pública do Roteiro para o Hidrogénio a 3 de Dezembro de 2018

Foram realizados vários eventos pela Direção-Geral de Energia e Geologia, entre 13 de março de 2017 e 3 de Dezembro de 2018, em que ficou patente um amplo reconhecimento do interesse estratégico do hidrogénio na descarbonização dos setores como vetor facilitador de complementaridades entre eletricidade, calor e mobilidade, na facilitação da integração de grandes quantidades de energias renováveis variáveis, e na dissociação da geração face ao consumo de energias renováveis por via da produção de hidrogénio (transportável, *in situ*). Foi igualmente assinalado que a sua operacionalização deve dar prioridade a experiências-piloto e a critérios de custo-eficácia.

A presente publicação tem por objetivo apresentar o Roteiro para o Hidrogénio em Portugal e propor um plano de ação para a sua implementação que inclui várias vertentes: legislação e medidas regulamentares, I&D+I e aplicações tendo em conta as várias cadeias de valor de acordo com a maturidade das várias tecnologias integrantes[2]. Nesta perspetiva, prevê-se também a necessidade de investigação básica e aplicada à implementação tecnológica presente neste roteiro, alvo de aprofundamento conjunto entre a Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) e o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) sob protocolo, o projeto POSEUR (ref[a] POSEUR-01-1001-FC-000005) do LNEG que se desenvolve paralelamente ao presente Projeto POSEUR--01-1001-FC-000004 "Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade".

2 DGEG (2019). *Integração do Hidrogénio nas Cadeias de Valor: Sistemas energéticos integrados, mais limpos e inteligentes.* Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa.

2. Metodologia

O Roteiro aqui apresentado surge na sequência dos trabalhos desenvolvidos pela DGEG no âmbito do projeto "Avaliação do Potencial e Impacto do Hidrogénio em Portugal – Estratégia para a Sustentabilidade" (POSEUR-01-1001-FC-000004). O projeto foi desenvolvido no âmbito do objetivo temático de apoio à transição para uma economia de baixo teor carbónico, que permitiu avaliar o potencial e impacto do hidrogénio tendo em consideração as especificidades do país a nível dos recursos, as caraterísticas do sistema energético nacional, bem como a diversidade e maturidade tecnológica das soluções energéticas baseadas no hidrogénio e os respetivos impactes expectáveis.

O projeto permitiu:

- Desenvolver um roteiro para o hidrogénio, bem como um plano de ação, por forma a propor a sua integração faseada no sistema energético, tendo presente a realidade nacional;
- Contribuir para as iniciativas estratégicas nacionais em curso, no quadro da transição para um sistema energético descarbonizado, permitindo intervir em particular na discussão e preparação do PNEC 2030, tendo presente a visão da neutralidade carbónica em 2050.

O trabalho desenvolvido ao longo do projeto incluiu consultas às partes interessadas relevantes de forma a identificar as oportunidades e desafios da integração do hidrogénio no sistema energético nacional. Foi seguidamente avaliada a integração do hidrogénio em cadeias de valor e identificadas as configurações com maior possibilidade de serem sustentáveis em Portugal. Os resultados foram apresentados nas publicações:

- DGEG (2018). *O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios de integração*. Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa. ISBN 978-972-8268-45-9 (versão impressa) ISBN 978-972-8268-47-3 (versão digital)
- DGEG (2019). *Integração do Hidrogénio nas Cadeias de Valor: Sistemas energéticos integrados, mais limpos e inteligentes*. Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa. ISBN 978-972-8268-48-0 (versão impressa) ISBN 978-972-8268-49-7 (versão digital)

Surge assim o Roteiro para o Hidrogénio em Portugal, que visa a introdução gradual do hidrogénio como pilar sustentável integrado num processo de transição para um sistema energético descarbonizado. No Roteiro são identificadas estratégias para a adoção e difusão do hidrogénio nos diferentes setores de atividade a nível nacional e no Plano de Ação identificadas um conjunto de medidas e ações para a sua implementação, tendo presente a realidade nacional e contribuindo assim para as

iniciativas estratégicas nacionais em curso no quadro de uma transição energética com metas intercalares no período 2020-2030, no sentido de alcançar a neutralidade carbónica em 2050.

A modelação e análise de sistemas integram, em função das características do sistema energético, a definição das configurações a considerar prioritariamente na cadeia de valor - da produção do hidrogénio até à sua utilização final, e a descrição detalhada de cada uma dessas configurações. As características atuais do sistema energético nacional, determinaram a seleção das seguintes configurações estratégicas para a cadeia de valor do hidrogénio: *Power-to-Power*, *Power-to-Mobility* e *Power-to-Gas*, bem como *Power-to-Industry* e *Power-to-SynFuel*.

A produção de hidrogénio é o primeiro estágio da cadeia de valor, no qual se identificam diferentes vias, processos e tecnologias associadas. Em função da escala requerida, distingue-se a produção em larga escala (centralizada) da produção em pequena escala (descentralizada).

Enquanto a eletrólise (alimentada a eletricidade renovável ou não) tem sido utilizada como opção para a produção de hidrogénio em pequena escala, atualmente a produção de hidrogénio em larga escala ainda é garantida por: Reformação a vapor do metano (SMR – *Steam Methane Reforming*); Gaseificação e pirólise de biomassa; Gaseificação de carvão; Oxidação parcial; Pirólise (processo *Kvaerner*).

O segundo estágio da cadeia de valor para o hidrogénio é a purificação, compressão, armazenamento, distribuição e abastecimento. Inicia-se com a purificação e conclui-se na entrega para o seu uso final. Este estágio inclui processos que se desagregam em subprocessos. Um subprocesso pode referir-se a armazenamento subterrâneo de gás, liquefação, compressão, armazenamento e distribuição em redes de gás, transporte rodoviário e marítimo ou abastecimento. As prováveis combinações de processos de abastecimento de hidrogénio podem ser: a) Entrega por estrada (curta) na forma de gás liquefeito/comprimido, terminando com um processo de abastecimento líquido a líquido (L2L) para sistemas de armazenamento de hidrogénio criogénico líquido a gasoso (L2G) e gás para gás (G2G) em várias escalas; b) Entrega de hidrogénio por navios sob a forma de hidrogénio liquefeito, incluindo a entrega para utilização final com gasodutos e transporte rodoviário; c) Entrega de hidrogénio gasoso por um sistema de condutas; d) Mistura de H_2 com gás natural na atual infraestrutura de gás natural. O custo e a distância de transporte, a capacidade e a distribuição espacial da densidade de procura e a dimensão dos locais de reabastecimento fazem parte dos pressupostos da análise de custo.

No terceiro estágio, a cadeia de abastecimento de hidrogénio é dirigida às aplicações de uso final nos setores da mobilidade e dos transportes, residencial e industrial, em geral recorrendo a pilhas de combustível. Nas aplicações estacionárias residenciais e

industriais, as misturas de hidrogénio e gás-natural podem ser aplicadas para gerar calor e eletricidade.

Foram consideradas as seguintes cadeias de valor:

Produção de Eletricidade: *Power-to-Power* (P2P)

A cadeia de valor dirigida para a rede elétrica é designada por P2P (*Power-to-Power*) e permite em condições operacionais acima descritas responder às necessidades do sistema energético.

Soluções de Mobilidade: *Power-to-Mobility* (P2M)

A cadeia de valor dirigida para a mobilidade e transporte é designada por P2M (*Power-to-Mobility*) que a partir de uma configuração de base assume duas variantes principais: a P2M que inclui pilhas de combustível móveis e a P2Ms que inclui pilhas de combustível estacionárias.

Produção de Calor: *Power-to-Gas* (P2G)

A cadeia de valor dirigida para a rede de gás que a partir de uma configuração de base assume duas variantes principais: Power-to-Hydrogen (P2H) e Power-to-Methane (P2Me). Trata-se de uma estratégia promissora devido ao potencial de armazenamento de energia que oferece em larga escala, e a longo prazo.

Aplicação na Indústria: *Power-to Industry* (P2I)

Na cadeia de valor do hidrogénio dirigida à produção de matérias-primas industriais identificam-se diferentes aplicações com níveis de maturidade tecnológica também diferenciados. Para além do seu uso energético, o hidrogénio é utilizado igualmente como matéria-prima na indústria – maioritariamente na produção de amónia e refinação de petróleo, e é um subproduto de processo em alguns subsectores da indústria química inorgânica. O hidrogénio tem potencial para substituir o gás natural como fonte de calor e energia na indústria, incluindo áreas em que a eletrificação não é possível – podendo obrigar, contudo, à substituição de equipamentos mas sem necessidade de elevado grau de pureza do hidrogénio. Em setores que utilizam altas temperaturas, como na fabricação do aço e do cimento, o hidrogénio pode ser uma alternativa de médio prazo (2030).

Síntese de Combustível Sintético: *Power-to-SynFuel* (P2Fuel)

Os combustíveis sintéticos são tradicionalmente produzidos via reformação a vapor do metano e por gaseificação de carvão ou biomassa. Podem ser utilizadas diferentes tecnologias (*e.g.* Fischer-Tropsch) para a produção de combustíveis sintéticos, o que conduz à perspetiva teórica de que todos os produtos derivados de petróleo bruto podem ser produzidos sinteticamente.

As características atuais do sistema energético nacional determinaram – por via da análise energética, a seleção de diferentes opções tecnológicas e configurações es-

tratégicas para a cadeia de valor do hidrogénio, de modo a identificar o impacte dos desempenhos respetivos. Foram consideradas diferentes dimensões de análise: a eficiência energética da tecnologia, os impactes ambientais no ciclo de vida (ACV), os custos, os impactes sociais e a necessidade de critérios a nível das políticas.

2.1 Análise energética

A análise do hidrogénio na modelação de sistemas energéticos, bem como dos pressupostos e interações dos componentes nele definidos, permite testar estratégias de implantação de âmbito global, nacional ou regional e/ou avaliar o potencial impacto das políticas de energia e clima, das metas de longo-prazo e dos meios para descarbonização – se aplicável, na exploração de um dado sistema energético. A representação dessas interações depende de forma significativa dos pressupostos considerados - em particular, do desenvolvimento tecnológico (dinâmica, desempenho, custos) e do tipo de modelo utilizado (*top-down*, *bottom-up* ou ambos). A seguir expõem-se os trabalhos e estudos desenvolvidos no estabelecimento de cenários e definição de um Plano de ação até 2030 em suporte ao PNEC. No entanto, é de referir que os resultados obtidos foram essenciais no desenvolvimento de uma estratégia de mais longo prazo em apoio a uma rota de maior penetração e consolidação de projetos inovadores para que após 2030 o hidrogénio constitua uma base sólida e sustentável da matriz energética nacional.

Modelo JANUS

A avaliação de vias e de cenários para o hidrogénio em âmbitos regionais e globais tem sido abordada por modelos *bottom-up* dada a sua capacidade para lidar em detalhe com tecnologias atuais e futuras.

No caso presente adotou-se a plataforma LEAP – *Long-range Energy Alternatives Planning System* (Heaps, 2016), uma ferramenta *bottom-up* para modelação energética que já tem sido usada em estudos de avaliação da integração do hidrogénio e foi utilizado o modelo energético nacional «Janus», versão 4, desenvolvido pela DGEG no contexto dos trabalhos de preparação do PNEC 2030 – Plano Nacional Energia-Clima.

Para construir um cenário do PNEC 2030, foram incluídos os efeitos sobre a procura de energia decorrentes das obrigações do artigo 7º da nova Diretiva da Eficiência Energética no período 2020-2030. Foi ainda adicionado o efeito de renovação de *stocks* de equipamentos (incluindo veículos) e outras medidas adicionais, resultando numa redução do consumo de energia na procura de 35% face às projeções de 2007 do modelo PRIMES.

De seguida foram adicionados os efeitos de políticas e medidas sobre a produção de energia, até alcançar uma fração de renováveis de 47%, compatível também com

uma redução de 45% a 55% na emissão de gases com efeito de estufa (sem LULUCF), relativamente a 2005. Como submetas setoriais, estabeleceram-se mínimos de 80% na produção de eletricidade, 20% no uso de energia final nos transportes (exceto navegação internacional) e 38% no uso final de energia térmica (aquecimento, arrefecimento, e processos de fabrico).

Finalmente, foram adicionadas tecnologias inovadoras, fazendo os reajustes necessários (com especial incidência no sistema de produção de eletricidade) para manter as metas globais e sectoriais acima identificadas, bem como o nível de importações de energia. Estas tecnologias inovadoras incluem nomeadamente baterias, geotermia de profundidade, biocombustíveis avançados e tecnologias associadas ao vetor hidrogénio, incluindo produção via reformação do gás natural, via eletrólise e via gaseificação de biomassa.

Assim, com a introdução do hidrogénio no sistema energético nacional já na década 2020-2030, foram modelados diferentes cenários tendo em consideração as medidas integradas no PNEC (existentes, adicionais) e atualizações potenciais por introdução de desenvolvimentos mais disruptivos. Os cenários considerados são então os seguintes:

- **Cenário "PNEC ME"** modela a evolução do sistema energético nacional com base nas medidas existentes e sem medidas adicionais de introdução de renováveis ou eficiência energética.
- **Cenário "PNEC MA"** corresponde à introdução de políticas e medidas para alcançar o objetivo de 47% de energia de fontes renováveis no consumo final bruto de energia em 2030, já integrando produção de hidrogénio por via da eletrólise descentralizada e da gaseificação de biomassa. Este cenário inclui a utilização de hidrogénio no setor dos transportes (veículos terrestres de passageiros) e na injeção na rede de gás natural;
- **Cenário "H2 base"**, atualização do cenário do PNEC MA (mantendo as suas metas e indicadores) com a introdução mais acentuada do hidrogénio no sistema energético nacional, através do incremento da produção de hidrogénio por via de um projeto de 2 GW de eletrolisadores utilizando energia renovável (solar e eólica) em regime de produção dedicada. A utilização do hidrogénio é repartida de forma equilibrada entre o uso interno (injeção na rede de gás natural, transportes e indústria) e exportação;
- **Cenário "H2 export +"**, variante do cenário do "H2 base", mantendo a capacidade de produção de hidrogénio por eletrólise com 2 GW, mas privilegiando a exportação, em detrimento da utilização interna.
- **Cenário "H2 export -"**, variante do cenário do "H2 base", mantendo a capacidade de produção de hidrogénio por eletrólise com 2 GW, mas privilegiando a utilização interna, em detrimento da exportação;

- **Cenário "H2 duplo"**, variante do cenário do "H2 base", a que se aumenta a capacidade instalada em eletrólise dedicada alimentada por energia fotovoltaica para 4 GW. A capacidade de produção de hidrogénio adicional é direcionada de forma equilibrada para exportação e consumo nacional.

Modelo Energy PLAN

O *software* energyPLAN (Lund, 2014) é uma ferramenta de modelação energética, desenvolvida pela Universidade de Aalborg (Dinamarca) e de utilização livre de encargos, sendo hoje em dia uma das ferramentas mais amplamente utilizadas pela comunidade internacional desta temática. O energyPLAN permite produzir balanços anuais, mensais e horários do sistema energético (electricidade, combustíveis gasosos, líquidos e sólidos) utilizando dados específicos para cada caso modelado com uma resolução horária. A sua utilização possibilita avaliar parâmetros como a capacidade de resposta do sistema energético à procura, importações e exportações ou penetração de fontes de energia renováveis.

2.2 Avaliação de Impactes Ambientais do Ciclo de Vida (ACV)

Esta secção apresenta uma visão geral da metodologia de ACV e define os resultados de inventário e indicadores específicos utilizados na avaliação de impacte potencial sobre o meio ambiente e saúde humana.

A Organização Internacional de Normalização (ISO) desenvolveu normas internacionais sobre ACV (ISO, 2006; ISO, 2006a). Devido à sua abordagem abrangente e às etapas de avaliação interdependentes, a condução de uma ACV é geralmente um processo iterativo baseado em quatro fases principais: definição do objetivo e âmbito, análise do inventário, avaliação de impactes, interpretação, conforme definido na ISO 14040 (ISO, 2006).

A ACV é uma metodologia que quantifica os impactes ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida de um produto (bem, serviço). A metodologia de ACV é orientada para o produto, é integradora e evita transferências de impactes de uma etapa do ciclo de vida para outra, de uma categoria de impacte para outra, de uma localização para outra, e é quantitativa, podendo envolver recursos humanos, técnicos e financeiros significativos. Os resultados de uma ACV são utilizados para identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida, para apoio à decisão na indústria e em organizações governamentais e não-governamentais (p. ex. no planeamento estratégico, definição de prioridades, *design* ou *redesign* de produtos ou processos), para seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental, incluindo métodos de quantificação, e para operações de *marketing* (p. ex. na implementação de rotulagem ecológica, elaboração de uma alegação ambiental ou produção de declaração ambiental de produto).

A avaliação recorreu ao *software* Simapro versão 8.5.2.0 (Pré, 2014), como ferramenta de cálculo, e à base de dados *Ecoinvent* versão 3.4 (*Ecoinvent*, 2014) como fonte de dados para inventário no ciclo de vida (LCI), complementando com dados nacionais e dados recolhidos na bibliografia sempre que necessário.

2.3 Análise de Custos

Os custos de cada etapa das cadeias de valor do hidrogénio são dependentes dos pressupostos para as condições económicas, incluindo a localização geográfica da operação, a escala da instalação, os processos utilizados e o período de abrangência do projeto. Uma extensa consulta bibliográfica permitiu determinar a gama de valores aplicáveis e valores típicos para cada etapa, considerando o tempo presente (referido a valores de 2015), o tempo futuro (2030-2040) e a escala da instalação de produção (produção centralizada vs. produção descentralizada).

Com o objetivo de verificar a aplicabilidade à realidade nacional dos custos apresentados nas tabelas referidas e publicados em várias referências de âmbito global ou europeu, utilizou-se uma ferramenta de cálculo desenvolvida pelo US.NREL - *Renewable Energy Laboratory* dos Estados Unidos que, de forma flexível, permite ajustar, em função das necessidades, os valores de base do cálculo dos custos agregados do hidrogénio (LCOH - *levelised cost of hydrogen*). O modelo utilizado é o H2A v.3 (US. DOE-NREL, 2018), que permite fazer uma análise dos aspetos técnicos e económicos das tecnologias de produção de hidrogénio centralizada (dimensão > 1 500 kg H_2/dia) e descentralizada (dimensão < 1 500 kg H_2/dia) para as principais tecnologias de produção do hidrogénio e que têm grau de maturidade tecnológica mais elevado. No caso da produção centralizada é possível incluir custos do processo de captura e armazenamento de carbono (CCS), enquanto na produção descentralizada o modelo permite calcular custos de compressão, armazenamento e distribuição do hidrogénio.

Na análise de oportunidades e de impactes previsionais e em alinhamento com as propostas desenvolvidas no âmbito dos trabalhos de preparação do PNEC 2030, são considerados cenários para a introdução do hidrogénio, detalhadamente descritos na secção “Análise da oportunidade e impacte provisional das ações”. Esta abordagem foi continuamente atualizada, acompanhando a evolução dos cenários do PNEC 2030 e de novos cenários de introdução mais acentuada do hidrogénio surgidos em final de 2019, permitindo uma análise e avaliação mais abrangentes e em diferentes dimensões.

Estes resultados, permitem de forma sustentada construir não só o plano de ação para – e pós – 2030 como também uma estratégia nacional que suporte a contribuição do hidrogénio na consolidação de uma transição energética para a descarbonização da economia até 2050.

3.O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal

O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal compreende os seguintes aspetos:

- As necessidades de regulamentação e normalização;
- As fases das cadeias de valor, da produção ao consumo, consoante as aplicações;
- A evolução da maturidade tecnológica (TRL) nessas fases;
- A previsão da evolução do *mix* energético que suporta a fase de produção até 2050.

Em síntese, e tendo por base os contributos dos *stakeholders* que participaram nos eventos ao longo do projeto e os estudos efetuados, a proposta de Roteiro apresentada tem subjacente nomeadamente as seguintes ações:

- Preparar a curto prazo legislação, regulamentação e enquadramento normativo e propor um quadro promotor deste paradigma em Portugal – aplicável aos diferentes sectores. Este quadro deverá proporcionar a competição entre alternativas numa base energeticamente eficiente, custo-eficaz e minimizando os impactes ambientais negativos;
- Constituir-se como uma base de trabalho para criar uma dinâmica à escala nacional, principalmente a partir das cadeias de valor prioritárias, considerando o hidrogénio quer como vetor energético quer como produto industrial, as abordagens de nicho e as aplicações de grande escala, maior abrangência e novos modelos de negócio;
- Promover, desenvolver e acompanhar projetos em diferentes setores e escalas, tendo em conta as cadeias de valor prioritárias, a maturidade tecnológica nas diferentes fases da cadeia de valor, a redução de custos unitários por armazenamento e a valorização das fontes de energia renovável intermitentes e sazonais;
- Implementar um Plano de Ação para o Hidrogénio em coerência com o Roteiro, dinamizando projetos inovadores com impacte local/regional e respetivos ganhos de escala quando justificado, rentabilizando as competências e capacidades nacionais;
- Reforçar as competências nacionais e a I&I, e a rentabilização do *stock* de ativos existentes em áreas da indústria nacional;
- Monitorizar e avaliar os progressos alcançados;
- Promover o efeito de cooperação e a Rede de Apoio à Inovação associada ao hidrogénio.

O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal identifica as configurações na cadeia de valor do hidrogénio com maior potencial de aplicabilidade em Portugal no imediato e a prazo:

- Aplicação à mobilidade (*Power-to-Mobility*): Introdução antes de 2030, assegurando que o hidrogénio é produzido por fontes renováveis e preferencialmente aplicado em transportes pesados (passageiros ou mercadorias) e frotas, bem como em soluções individuais leves abastecidas com hidrogénio. O custo do hidrogénio depende da tecnologia de produção utilizada mas também da intensidade de compressão necessária de acordo com as opções de uso final e do modelo de comercialização se centralizado, semi-centralizado ou descentralizado. Por exemplo, no caso do abastecimento semi-centralizado para veículos pesados, atualmente o custo final do hidrogénio pode variar de 4,2 a 9,1 €/kg H_2;
- Injeção na rede de gás natural (*Power-to-Gas*): Introdução antes de 2030, especialmente se o hidrogénio for produzido por eletrólise de alta eficiência alimentada por fontes renováveis. A metanação, utilizando hidrogénio renovável e dióxido de carbono proveniente de processos industriais (incluindo tratamento de lamas de ETAR ou gaseificação de RSU) e sem alterações na infraestrutura, permite também aumentar a fração de renováveis na rede de gás natural. Ainda no curto prazo, as pilhas de combustível alimentadas a gás natural em regime de cogeração poderão igualmente ser uma solução, pela sua elevada eficiência e flexibilidade introduzida no processo de transição para combustível totalmente descarbonizado (hidrogénio). Os custos atuais da introdução do hidrogénio diretamente na rede gás natural variam entre 3,5 e 7,6 €/kg H_2;
- Armazenamento (*Power-to-Power*): Introdução em função da evolução da eficiência económica e energética mais provável entre 2025 e 2030. Armazenamento de energia de fontes renováveis, considerando índices de maturidade tecnológica mais elevados (maior eficiência, tempo de vida mais longo e custo de investimento mais baixo) ao longo da cadeia de valor e custos mais baixos da energia utilizada, aproveitando picos de produção renovável ou com produção renovável dedicada e evitando os custos associados à utilização de energia elétrica da rede.
- O Roteiro para o Hidrogénio em Portugal é apresentado na Figura 2, estruturada no espaço e no tempo, em função do estado da arte e das iniciativas identificadas para o hidrogénio a implementar em Portugal no período 2020-2050.

A estruturação do Roteiro está baseada em cada uma das fases que constituem a configuração geral da cadeia de valor - da produção de hidrogénio até ao seu uso final, acrescidas das suas variantes (*e.g.* produção de hidrogénio por três vias alternativas) bem como de um enfoque específico sobre:

(i) fontes de energia aplicadas à realidade Portuguesa - condição crítica para a evolução e competitividade da cadeia de valor;

(ii) um conjunto limitado de facilitadores estruturantes para promover a sua adoção a curto e a médio-prazo;

(iii) aplicabilidade do hidrogénio nas cidades e comunidades.

A distribuição temporal do Roteiro para o hidrogénio tem por base as condições fronteiras introduzidas no PNEC 2030 e, de forma mais abrangente e na perspetiva do "futuro", no RNC 2050. Optou-se, assim, por uma representação de metas enquadradas em janelas temporais entre 2020 e 2050.

A respetiva implementação é definida no Plano de Ação associado, que se desenvolve a seguir introduzindo em diferentes tipologias (*e.g.* Legislação e Regulamentação, Normalização, Mobilidade, Injeção na rede de gás, etc.), as medidas e ações já possíveis de identificar até: 2025, 2030, 2040 e 2050. A título ilustrativo, na área da legislação e regulamentação consideram-se até 2025:

- Publicar a legislação e regulamentação adequadas para a introdução do hidrogénio nas cadeias identificadas;
- Elaborar esquemas de apoio público ao investimento necessário à integração do hidrogénio no sistema energético português;
- Apoiar projetos-piloto com base em tecnologias maduras para a utilização do hidrogénio nas cadeias identificadas;
- Promover I&D e Demonstração tecnológica e não tecnológica que suporte a integração do hidrogénio no sistema energético português.

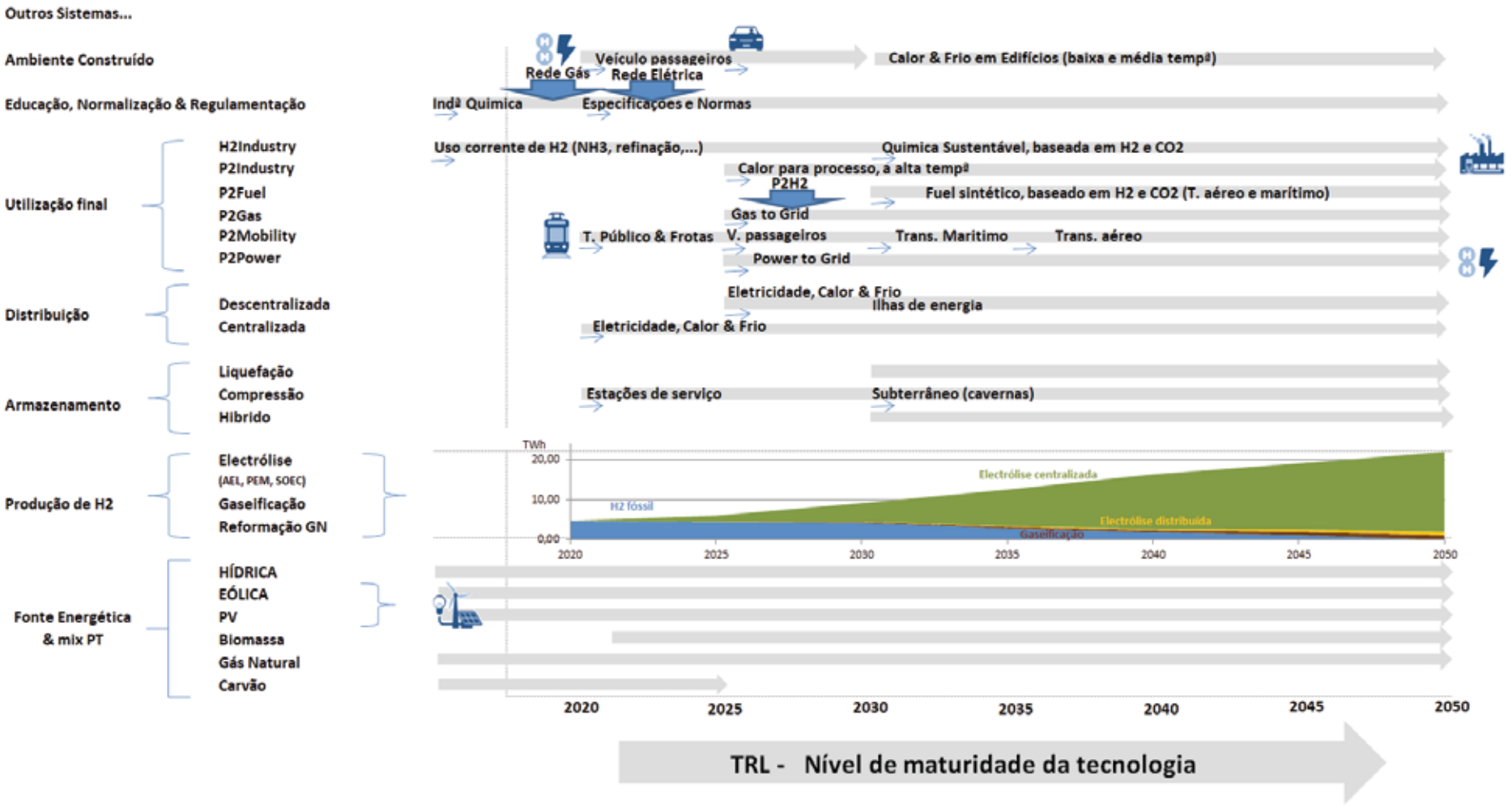


Figura 2 – Proposta de Roteiro para a implementação do Hidrogénio em Portugal

4. Desenvolvimento do Plano de Ação

A transição energética para uma economia descarbonizada, energeticamente segura e sustentável – com uma base eficiente e renovável, requer grandes mudanças não apenas no setor energético mas abordando de forma integrada todos os setores.

A transição requer a flexibilização do sistema energético, promovendo a sua segurança e sustentabilidade, através da diversificação do abastecimento, da capacidade de armazenamento de energia e da facilitação das complementaridades setoriais via redes elétrica e de gás.

Com esses grandes propósitos trata-se de um processo estruturado que beneficiará significativamente com:

- A definição do Roteiro Nacional – reconhecendo o hidrogénio como vetor estratégico e em coerência com o PNEC 2030, e a correspondente proposta de operacionalização a nível sistémico através de um Plano de Ação para a implementação e uso do hidrogénio na: i) Descarbonização dos setores-alvo; ii) Facilitação de complementaridades e integração energética desses setores, incluindo o armazenamento energético; iii) Cooperação inter-regional e transfronteiras.
- A criação de um ecossistema de inovação para o hidrogénio, incluindo uma unidade de missão com a gestão estratégica e monitorização das iniciativas privadas e públicas, a promoção da Investigação & Inovação face ao estado da arte de cada tecnologia nas cadeias de valor, subsequente capacitação face aos contextos de aplicação, e respetivos enquadramentos no Sistemas Nacional de Inovação;
- A promoção de um *cluster* nacional para o hidrogénio, e as competências nacionais associadas.

Nessa medida há que ter em consideração os catalisadores associados à definição desta oportunidade. As tecnologias do hidrogénio e das pilhas de combustível fizeram um progresso notável na última década. Na Europa, muito desse progresso está baseado no trabalho da parceria Europeia '*FCH Joint Undertaking*', a qual é instrumental para o desenvolvimento de tecnologias chave para a arquitetura do sistema e das cadeias de valor no domínio do hidrogénio, para introduzir primeiras gerações de produtos no mercado, e para tornar a Europa um ator global relevante.

Embora o desenvolvimento se tenha focado no uso do hidrogénio para a produção da eletricidade, a dinâmica associada à produção do combustível também veio a acres-

centar valor na exploração de outras oportunidades de recurso a este vetor energético como é o caso da sua inclusão em correntes gasosas como sejam as redes de gás natural.

O setor do hidrogénio encontra-se numa fase preliminar de implantação, embora já hoje se comecem a observar movimentações de empresas neste sentido, reconhecendo-se ser necessária uma redução significativa nos custos ao longo da cadeia de fornecimento para permitir que a comercialização em larga escala responda aos objetivos de descarbonização ao nível do sistema energético.

Para alcançar essa redução de custos, o setor deve responder às seguintes condicionantes:

a) **Falha de mercado para pioneiros (oferta) e primeiros adotantes (procura)** - Risco financeiro associado à concretização dos benefícios ambientais e de segurança energética, resultantes das aplicações do hidrogénio e que se irão acumular na sociedade em geral, não serem suscetíveis de materialização económica pelos pioneiros (lado da oferta) e primeiros adotantes (lado da procura) da tecnologia inovadora lançada no mercado. Com efeito, essa tecnologia inovadora tem de competir com as soluções mais maduras existentes – as quais já beneficiam das respetivas infraestruturas bem estabelecidas e amortizadas, resultando que os custos externos estão excluídos do preço total. Em consequência, na tecnologia inovadora o risco financeiro dos pioneiros e primeiros adotantes é mais elevado e, na fase de lançamento, requer um estímulo proporcional e coordenado por parte da iniciativa pública.

b) **Fragmentação dos agentes no mercado e falta de massa crítica** - Em virtude da versatilidade e exigências técnicas e económicas do hidrogénio, aplica-se transversalmente aos vários setores (setor elétrico, transportes, aquecimento e arrefecimento, indústria, ...) com uma necessária mobilização em torno das aplicações em cada país nos domínios privado (grandes empresas, PME, associações no setor, etc.) e público (universidades, organizações de investigação, autoridades locais, etc.). Acresce as necessidades de escala requeridas em cada caso, para garantir a sua sustentabilidade económica. Essa diversidade e exigências de escala crítica dificultam a formação de um corpo de massa crítica consistente em cada Sistema Nacional de Inovação. Conforme demonstrado pela experiência internacional, em particular a nível Europeu, uma via para abordar eficazmente estas exigências críticas é combinar e sincronizar um *mix* de medidas de incentivo à oferta e à procura orientada para o mercado, apoiadas por parcerias orientadas por objetivos. Acresce a experiência em atividades de I&I no domínio do hidrogénio, que tem demonstrado a necessidade de um forte alinhamento das atividades nas cadeias de inovação, da investigação, desenvolvimento, demonstração até à primeira introdução no mercado, com uma estrutura de missão para gerir e operacionalizar o quadro estruturante adotado e a subsequente implantação das medidas apoiadas, a fim de garantir uma transição com sucesso (eficiente, eficaz) do hidrogénio nas cadeias de valor.

Concretamente, relativamente à componente de I&I, torna-se necessário:

- Recursos (públicos, privados): Reunir e intensificar estes recursos com o objetivo da redução de custos;
- Impactes ambientais e sociais da tecnologia: Valorizar os impactes positivos e reduzir os impactes negativos;
- Soluções: Promover a maturidade das soluções à base de hidrogénio, melhorando o seu desempenho, eficiência a nível da aplicação e do enquadramento sistémico, potencial de aplicabilidade futura no sistema, durabilidade, etc.;
- Perceção e confiança: Testar e validar essas soluções em ambientes reais e de modo integrado, a fim de aumentar a perceção e confiança entre os utilizadores finais para os benefícios do hidrogénio;
- Iniciativas: Desenvolver e contribuir, a nível sistémico, para o fortalecimento das cadeias de valor do hidrogénio, e para iniciativas de interesse à escala internacional, em particular à escala Europeia (e.x.: corredor europeu para o hidrogénio). O interesse no hidrogénio renovável é impulsionado pelo seu potencial em otimizar a energia Europeia pela transferência de energia limpa entre setores (setor elétrico, transporte, aquecimento, indústria, etc.), ou seja, por integração setorial;
- Implementação: Materialização do objetivo de integração setorial através do hidrogénio só pode ser alcançada se não houver fronteiras nacionais/locais na aplicação da tecnologia, por isso é necessário um diálogo à escala de todo o sistema energético e, numa estreita colaboração entre Estados-Membros, trata-se de acordar sobre regulamentação, códigos e normas harmonizadas para a sua adequada implementação.

Na componente legislativa e normativa, em Portugal estão já disponíveis:

a) O Decreto-Lei 60/2017 (9 de junho), que aborda a estrutura para a implementação de uma infraestrutura de combustíveis alternativos (QAN), sendo o hidrogénio explicitamente referido conjuntamente com os biocombustíveis, os combustíveis sintéticos e outros;
b) A Resolução do Conselho dos Ministros n. 88/2017 (26 de junho), que define as condições para a criação do QAN e onde o hidrogénio é tratado no capítulo 5;
c) A nível das soluções que precisam de normalização a nível Europeu, incluem-se as infraestruturas de reabastecimento de hidrogénio e a injeção do hidrogénio na rede de gás natural.

4.1 Tipologia de ações – Critérios

Na definição da tipologia de ações, têm-se presente os catalisadores para uma oportunidade desta natureza, bem como condições identificadas na análise do estado-da-arte em cada cadeia de valor para o hidrogénio em Portugal, e concretamente em DGEG (2018) e DGEG (2019).

O ponto de situação resultante abordou as diferentes cadeias de valor, incluindo a maturidade tecnológica (ver Figura 2) disponível para as diferentes fases daquelas cadeias de valor. A partir deste ponto de situação foi definido um Roteiro estratégico com objetivos identificados, a partir dos quais se estabelecem medidas e ações as quais, com recursos e gestão adequados, permitirão levar à prática a execução atempada das metas pré-definidas.

A Figura 3 faz uma representação do sistema de inovação tecnológica e a relação entre as áreas de atividade a desenvolver face aos objetivos traçados.

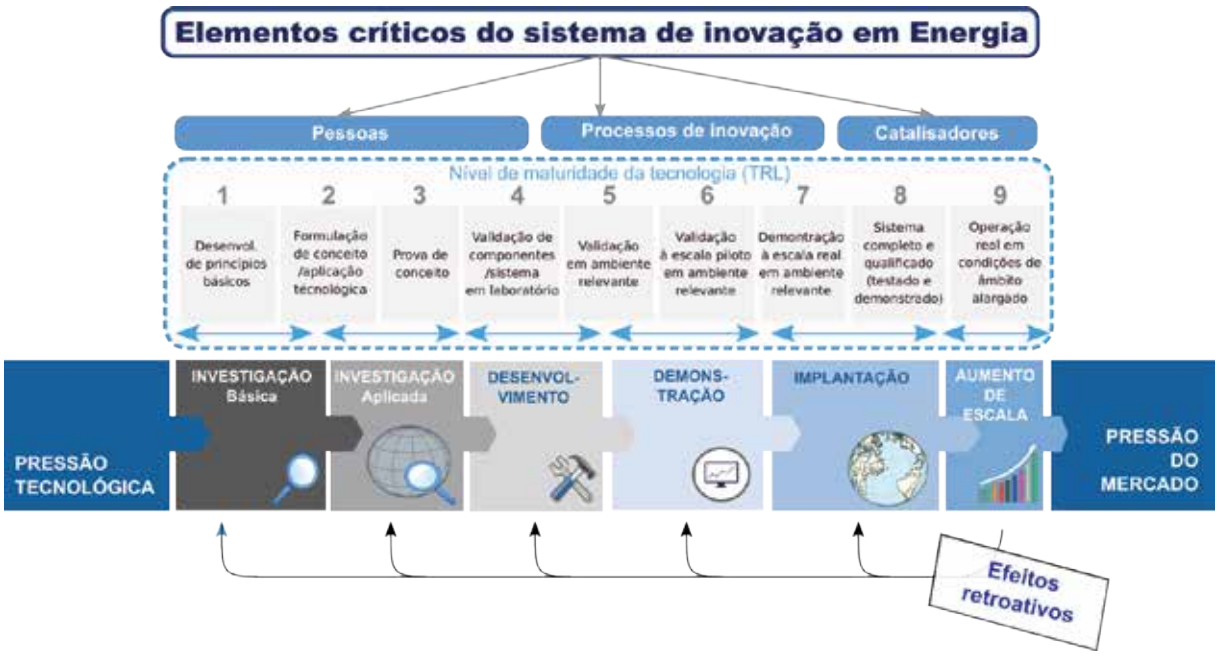


Figura 3 – Níveis de maturidade tecnológica (TRL) e tipos de atividade a considerar num planeamento integrado da operacionalização do Roteiro (In: Adaptado de WEF, 2018)

Atendendo à natureza disruptiva do hidrogénio e ao seu caráter estratégico que obriga a abordagens integradas intra e intersetoriais, um planeamento integrado de medidas e ações identificadas para a operacionalização do Roteiro deve ter em consideração a respetiva oportunidade tendo presente designadamente os seguintes aspetos:

- Foco no processo de Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D+I), designadamente na maturidade técnica e tecnológica associada às diferentes fases daquele processo a que serão aplicáveis diferentes programas de financiamento, isto é:
  - IDT centrada em TRL até 4;
  - IDT centrada em TRL entre 5 e 7;
  - Demonstração à escala pré-competitiva (TRL 8-9).
- Enquadramento no Sistema Nacional de Inovação e uma gestão complementar por objetivos de inovação tecnológica e não tecnológica, bem como uma mobilização de *stakeholders* (privados, públicos) correspondente;

- Estrutura colaborativa (ex. CoLab) que, gerindo recursos de entidades do sistema C&T e Empresarial, responda à natureza multidimensional dos objetivos do Roteiro, *i.e.* considerar concretamente a procura de novas tecnologias avançadas e processos que produzam e utilizem o hidrogénio em soluções comercializáveis; novas lógicas sistémicas (por exemplo, flexibilidade e armazenamento no sistema energético, cadeias de valor, partilha energética entre setores); subsistemas e componentes; infraestruturas (por exemplo, *design* e otimização de redes, equipamentos, investimentos); novos modelos de procura do hidrogénio (por exemplo, áreas de utilização de difícil descarbonização) bem como de oferta do hidrogénio (por exemplo, substituição de fontes fósseis por renováveis, descentralização do abastecimento por FER);
- A avaliação do potencial da oportunidade em cada caso com base nos seguintes fatores:
  - Potencial de produção de hidrogénio;
  - Potencial de procura de hidrogénio;
  - O custo de produção de hidrogénio;
  - A infraestrutura energética no sistema energético nacional;
  - O ecossistema nacional de inovação.

4.2 Plano de ação

Esta secção descreve um plano de ação estratégica até 2050 para o hidrogénio, tendo presente o atual quadro estruturante definido no PNEC para o período 2020-2030, bem como o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050.

O objetivo é propor uma abordagem para desenvolver e promover o hidrogénio nos próximos anos com um plano mais fino no período 2020-2030 (PNEC), e cenários de desenvolvimento até 2050, a fim de lançar as bases para, ao longo de uma geração (cerca de 25 anos), introduzir o hidrogénio como pilar sustentável integrado num processo de transição para um sistema energético descarbonizado.

Assim, o plano de ação propõe um conjunto de medidas em resposta às oportunidades identificadas nas diferentes tipologias escolhidas e às metas apresentadas no Roteiro para o Hidrogénio em Portugal. As medidas estão resumidas no diagrama da página seguinte e são apresentadas com mais detalhe nas tabelas 1 a 7.



Figura 4 – Plano de ação para a integração do hidrogénio

4.2.1 - Medidas e ações – Legislação e regulamentação

A nível legislativo torna-se necessário no curto prazo identificar barreiras regulamentares à integração do hidrogénio no sistema energético nacional e adotar a legislação que, em concordância com os princípios políticos traçados no PNEC e no Roteiro para a Neutralidade Carbónica, permita efetivamente a utilização do hidrogénio na mobilidade e na produção de eletricidade e calor, bem como a sua injeção na rede de gás (tabela 1). Deverá ainda ser adotado um sistema de garantias de origem do hidrogénio renovável e definir esquemas de apoio público quer ao investimento em infraestruturas, quer à exportação de hidrogénio renovável.

Tabela 1 – Identificação de medidas e ações – Legislação e regulamentação

Medida	Ação a implementar	*Stakeholders*	Período temporal
Barreiras regulamentares	Identificação de barreiras regulamentares à introdução do hidrogénio no sistema energético, em particular em relação à implementação de sistemas descentralizados de produção de eletricidade e calor e à criação e desenvolvimento de novos modelos de negócio potenciados pelas cadeias de valor do hidrogénio.	Empresas Investigação Governo Municípios	2020-2025
Legislação e regulamentação – Mobilidade	Publicação de legislação e regulamentação conducente à introdução do hidrogénio no sector da mobilidade.	Empresas Governo Municípios	2020-2025
Legislação e regulamentação – Injeção na rede de gás	Publicação de legislação e regulamentação conducente à introdução do hidrogénio nas redes de gás natural.	Empresas Governo Municípios	2020-2025
Legislação e regulamentação – produção de eletricidade e calor	Publicação de legislação e regulamentação conducente à utilização do hidrogénio para produção de eletricidade e calor na indústria e em edifícios.	Empresas Governo Municípios	2020-2025
Garantia de origem	Adoção de um sistema de garantias de origem do hidrogénio renovável em linha com o Roteiro da União Europeia respetivo.	Empresas Governo	2020-2025
Investimento em infraestruturas	Sistemas de apoio público ao investimento em infraestruturas de produção, armazenamento, transporte e distribuição de hidrogénio	Investidores Empresas Governo Municípios	2020-2030
Apoio à internacionalização	Sistemas de promoção da exportação de hidrogénio renovável	Investidores Empresas Governo	2020-2030

4.2.2 - Medidas e ações – Normalização

A legislação e regulamentação a publicar terão forçosamente de considerar as normas técnicas relacionadas com a produção, armazenamento, distribuição e utilização de hidrogénio desenvolvidas ou em desenvolvimento no CEN, pelo que será necessário acompanhar que as diversas partes interessadas participem nos trabalhos de normalização no seio das diversas comissões técnicas relevantes (tabela 2).

Tabela 2 – Identificação de medidas e ações – Normalização

Medida	Ação a implementar	*Stakeholders*	Período temporal
Hidrogénio nos sistemas energéticos	Participar nos trabalhos do CEN/CLC/JTC 6 - "*Hydrogen in energy systems*", no que toca a garantias de origem e segurança do hidrogénio	Empresas Investigação Governo	2020-2050
Armazenamento e transporte de hidrogénio líquido	Participar nos trabalhos do CEN/TC 268 - "*Cryogenic vessels and specific hydrogen technologies applications*", no que toca a armazenamento e transporte de hidrogénio líquido	Empresas Investigação Governo	2020-2050
Armazenamento e transporte de hidrogénio comprimido	Participar nos trabalhos do CEN/TC 23 - "*Transportable gas cylinders*", no que toca a armazenamento e transporte de hidrogénio comprimido	Empresas Investigação Governo	2020-2050
Injeção de hidrogénio na infraestrutura de gás	Participar nos trabalhos do CEN/TC 234 – "*Gas infrastructure*", no que toca à injeção de hidrogénio e de misturas de hidrogénio e gás natural na infraestrutura de gás	Empresas Investigação Governo Municípios	2020-2050
Estações de reabastecimento de veículos	Participar nos trabalhos de normalização relacionados com estações de reabastecimento de veículos e equipamentos e procedimentos associados, no âmbito da solicitação de normalização M/533 da Comissão Europeia ao CEN, para apoio à implementação da Diretiva 2014/94/UE, relativa à criação de uma infraestrutura para combustíveis alternativos	Empresas Investigação Governo Municípios	2020-2050
Normalização	Participação nos trabalhos de normalização de outras comissões técnicas de âmbito relevante.	Empresas Investigação Governo Municípios	2020-2050

4.2.3 - Medidas e ações – Mobilidade

A par do trabalho desenvolvido a nível regulamentar e de normalização, a utilização do hidrogénio nas diferentes aplicações previstas requer, por parte das diversas partes interessadas, o desenvolvimento de ações de promoção nos casos em que as tecnologias estão suficientemente maduras e o apoio à realização de projetos de I&D nos casos em que tal ainda não acontece. As medidas apontadas referem-se à utilização do hidrogénio na mobilidade (tabela 3), à injeção de hidrogénio nas redes de gás natural (tabela 4) e à produção de eletricidade e calor a partir de hidrogénio (tabela 5).

Tabela 3 – Identificação de medidas e ações – Mobilidade

Medida	Ação a implementar	*Stakeholders*	TRL	Período temporal
Abastecimento de hidrogénio para a mobilidade	Promover a criação de infraestruturas de abastecimento de hidrogénio para transporte rodoviário, incluindo armazenamento, transporte e distribuição	Investidores Empresas Municípios	8-9	2020-2025
Transportes coletivos a hidrogénio	Promoção da utilização de hidrogénio renovável em transportes coletivos (autocarros e comboios), incluindo a realização de estudos de perceção pública, impacte no emprego, saúde e segurança e impactes no desenvolvimento regional/local.	Investidores Empresas Investigação Municípios Cidadãos	8-9	2020-2025
Transportes pesados de mercadorias e frotas a hidrogénio	Promoção da utilização de hidrogénio renovável em transportes pesados de mercadorias e frotas de longo curso, incluindo a realização de estudos de perceção pública, impacte no emprego, saúde e segurança e impactes no desenvolvimento regional/local.	Investidores Empresas Investigação Municípios	8-9	2020-2025
Automóveis a hidrogénio	Promoção da utilização de hidrogénio renovável em veículos ligeiros, incluindo a realização de estudos de perceção pública e pilotos de utilização dos equipamentos, impacte no emprego, saúde e segurança e impactes no desenvolvimento regional/local.	Investidores Empresas Investigação Municípios Cidadãos	8-9	2020-2025
Abastecimento de hidrogénio para a mobilidade	Promover o alargamento de infraestruturas de abastecimento de hidrogénio para transporte rodoviário, incluindo armazenamento, transporte e distribuição	Investidores Empresas Municípios	8-9	2025-2030
Automóveis a hidrogénio	Otimização da utilização de hidrogénio em veículos ligeiros com vista à redução de custos e ao desenvolvimento de novos modelos de negócio.	Empresas Investigação Governo Municípios	8-9	2025-2030
Transportes individuais leves a hidrogénio	Promoção da utilização de hidrogénio renovável para abastecimento de transportes individuais leves, incluindo a realização de estudos de perceção pública e ensaio de utilização dos equipamentos, impacte no emprego, saúde e segurança e impactes no desenvolvimento regional/local.	Investidores Empresas Investigação Municípios Cidadãos	5-7	2025-2030

4.2.4 - Medidas e ações
Injeção nas redes de gás natural

Tabela 4 – Identificação de medidas e ações – Injeção na rede de gás natural

Medida	Ação a implementar	*Stakeholders*	TRL	Período temporal
Hidrogénio para produção de calor através da injeção nas redes de gás natural	Promoção da utilização de hidrogénio para armazenamento de energia, através da injeção de hidrogénio na rede de gás natural produzido por eletrólise da água utilizando energia elétrica de fonte renovável (eólica, solar ou outra), incluindo a realização de estudos de perceção pública, testes de utilização de equipamentos, impacte no emprego, saúde e segurança e impactes no desenvolvimento regional/local	Investidores Empresas Investigação Governo Municípios Cidadãos	8-9	2020-2025
Armazenamento de energia através da injeção de hidrogénio nas redes de gás natural	Promoção da utilização de hidrogénio para produção de energia (eletricidade e calor), através da utilização de hidrogénio na rede de gás natural, na indústria, em edifícios e em comunidades de energia	Investidores Empresas Investigação Governo Municípios Cidadãos	8-9	2020-2025

4.2.5 - Medidas e ações – Produção de eletricidade e calor

Tabela 5 – Identificação de medidas e ações – Produção de eletricidade e calor

Medida	Ação a implementar	*Stakeholders*	TRL	Período temporal
Produção de eletricidade e calor através de pilhas de combustível	Promoção de projetos de utilização de pilhas de combustível em edifícios para a produção combinada de eletricidade e calor, incluindo a realização de estudos de perceção pública e testes de utilização dos equipamentos por parte dos consumidores.	Investidores Empresas Governo Cidadãos	8-9	2025-2030
Produção de eletricidade através de pilhas de combustível (PEM)	Projetos de I&D para a produção de eletricidade através de pilhas de combustível (PEM ou outra de eficiência otimizada), utilizando hidrogénio produzido por eletrólise da água (alcalina ou outra de eficiência otimizada) com base em energia renovável (solar, eólica ou outra).	Empresas Investigação	5-7	2025-2030
Produção de eletricidade através de pilhas de combustível (PEM)	Promoção da produção de eletricidade através de pilhas de combustível, utilizando hidrogénio renovável, incluindo a realização de estudos de perceção pública e testes de utilização dos equipamentos por parte dos consumidores (indústria, edifícios e comunidades de energia), impacte no emprego, saúde e segurança e impactes no desenvolvimento regional/local.	Investidores Empresas Investigação Governo Municípios Cidadãos	8-9	2025-2030
Produção de eletricidade através de pilhas de combustível (SOFC)	Projetos de I&D para a produção descentralizada de eletricidade através de cogeração em pilhas de combustível de alta temperatura (SOFC), consumindo hidrogénio renovável produzido e armazenado localmente.	Empresas Investigação	5-7	2025-2030
Produção de eletricidade através de pilhas de combustível (SOFC)	Promoção da produção, centralizada ou descentralizada, de eletricidade através de cogeração em pilhas de combustível de alta temperatura (SOFC), consumindo hidrogénio renovável.	Investidores Empresas Governo Municípios Cidadãos	8-9	2030-2040

4.2.6 - Medidas e ações – Produção, armazenamento ou utilização de hidrogénio

Para além das aplicações mencionadas, a integração do hidrogénio no sistema energético nacional envolve ainda outras áreas de atuação que carecem de estímulo à demonstração e apoio a projetos de I&D (tabela 6): produzir hidrogénio a partir de biomassa; armazenamento de hidrogénio em larga escala; utilização de hidrogénio renovável na indústria; produção de combustíveis alternativos.

Tabela 6 – Identificação de medidas e ações – Produção, armazenamento ou utilização de hidrogénio

Medida	Ação a implementar	*Stakeholders*	TRL	Período temporal
Produção de hidrogénio em larga escala	Produção dedicada de hidrogénio a preços competitivos para venda nos mercados externo e interno	Empresas Governo Municípios	9	2020-2025
Conversão de biomassa por *upgrade* de biogás	Demonstração das tecnologias de conversão de biomassa por *upgrade* de biogás.	Investidores Empresas Investigação Governo Municípios	8-9	2020-2025
Conversão de biomassa	Projetos de I&D para tecnologias de conversão de biomassa e reforço de competências nacionais.	Empresas Investigação	5-7	2020-2025
Conversão de biomassa por gaseificação	Promoção das tecnologias de conversão de biomassa sólida por gaseificação.	Investidores Empresas Investigação Governo Municípios Cidadãos	8-9	2025-2030
Armazenamento de hidrogénio em larga escala	Promover projetos para soluções de armazenamento de hidrogénio - armazenamento subterrâneo de hidrogénio em larga escala em território nacional.	Empresas Investigação Governo Municípios	5-7	2025-2030
Utilização na indústria	Promoção da substituição do hidrogénio fóssil utilizado na indústria como matéria-prima, por hidrogénio renovável	Empresas Investigação Governo	8-9	2025-2030
Combustíveis alternativos	Projetos para produção de combustíveis sintéticos (líquidos ou gasosos) com base em hidrogénio renovável e captura, armazenamento e utilização de CO_2.	Investidores Empresas Investigação Governo	8-9	2025-2030
Armazenamento de hidrogénio em larga escala	Promoção do armazenamento subterrâneo de hidrogénio em larga escala em território nacional.	Empresas Investigação Governo Municípios	8-9	2030-2035

4.2.7 - Medidas e ações transversais

Há ainda que considerar medidas transversais (tabela 7) em duas vertentes distintas, mas relacionadas:

- Os projetos acima referidos deverão incluir uma avaliação do ciclo de vida, em termos ambientais, económicos e sociais, de forma a prevenir e mitigar impactes potencialmente negativos e promover a aceitação social de novas tecnologias e novos modelos de negócio, através do envolvimento das partes interessadas relevantes;
- Deverá também ser estimulado o *design* e desenvolvimento de novos modelos de negócio nas cadeias de valor (produção-distribuição-consumo), em linha com a descentralização da produção de energia e com a centralização do papel dos consumidores no sistema energético.

Tabela 7 – Identificação de medidas e ações transversais

Medida	**Ação a implementar**	***Stakeholders***	**Período temporal**
Estudos de avaliação do ciclo de vida	Estudos detalhados de avaliação do ciclo de vida para cada uma das configurações, incluindo impactes ambientais, económicos e sociais.	Empresas Investigação Municípios Cidadãos	2020-2030
Modelos de negócio	Projetos para *design* e desenvolvimento de novos modelos de negócio (cadeia de valor: produção-distribuição-consumo).	Empresas Investigação	2020-2025
Modelos de negócio	Implementação e avaliação de novos modelos de negócio (cadeia de valor: produção-distribuição-consumo).	Investidores Empresas Investigação Governo Municípios Cidadãos	2025-2030

5. Análise da oportunidade e impacte previsional das ações

5.1. Oportunidade e competitividade do hidrogénio renovável

O potencial de produção do hidrogénio renovável depende da disponibilidade de eletricidade renovável a baixo custo. O potencial técnico para a produção de eletricidade renovável começa a evidenciar, na grande maioria dos Estados-Membros, vir a ser maior do que a respetiva previsão da procura nacional em eletricidade. Tal significa, para a maioria dos Estados-Membros, haver já um potencial significativo de 'excedentes' de eletricidade renovável para dedicar à conversão em hidrogénio por via eletrolítica. Em Portugal, é estimado um potencial de produção de eletricidade renovável intermitente superior a dez vezes a procura em eletricidade prevista em 2030, o que conduzirá a uma oportunidade significativa para utilizar aqueles potenciais 'excedentes' para produzir hidrogénio renovável e descarbonizado. Esta oportunidade é ainda reforçada pela eventualidade da capacidade de interligação elétrica de Portugal vir a ser limitada, especialmente se comparada com a capacidade de produção renovável intermitente prevista instalar em 2030 e tendo em consideração a sua localização geográfica periférica face ao mercado energético Europeu.

Em Portugal há igualmente uma oportunidade para usar a estratégia 'Power-to-Hydrogen' e subsequente armazenamento de hidrogénio como fornecedor de flexibilidade, dado ser previsível que o sistema de energia Português venha a necessitar de elevados níveis de flexibilidade face a uma previsão de capacidade instalada de produção de eletricidade renovável intermitente superior à sua carga média em 2030. Esta oportunidade para fornecer flexibilidade poderá ser influenciada pela disponibilidade paralela, mas tendencialmente decrescente, da capacidade de armazenamento existente nas centrais hidroelétricas com bombagem.

No que respeita a produção de hidrogénio de baixo carbono via reformação do gás natural combinada com o CCUS, o potencial desta abordagem a curto prazo é bastante limitado, e não sendo atualmente considerados nesta área quaisquer objetivos de descarbonização na política energética por via da criação destas capacidades.

É igualmente importante o papel potencial que têm por um lado a conversão de energia em hidrogénio e por outro o armazenamento de hidrogénio na atribuição de flexibilidade ao sistema de energia. A mudança na maioria dos Estados-Membros para um sistema energético amplamente baseado em energia renovável intermitente, como a energia eólica e fotovoltaica, leva a altas flutuações no fornecimento de eletricidade, o que gera desafios para equilibrar oferta e procura. Os crescentes requisitos em flexibilidade podem ser fornecidos por soluções baseadas em hidrogénio na proximidade do armazenamento de energia, da capacidade de interligação, na resposta à procura, em unidades de geração de energia despachável, etc. Em períodos de elevada oferta de eletricidade renovável e de baixos preços de eletricidade, a eletricidade pode ser convertida em hidrogénio por via eletrolítica e pode ser usada diretamente ou armazenada para uso posterior. Embora a conversão de energia em hidrogénio e o seu armazenamento possam contribuir efetivamente para descarbonizar e equilibrar o sistema elétrico, a sua viabilidade económica além de depender da eficiência da conversão, depende de três parâmetros críticos, que devem melhorar nos próximos anos, para viabilizar economicamente a produção de hidrogénio renovável:

a) O capital investido no eletrolisador;
b) O custo da eletricidade renovável que alimenta o processo (LCOE);
c) O número de horas de operação (fator de carga) numa base anual.

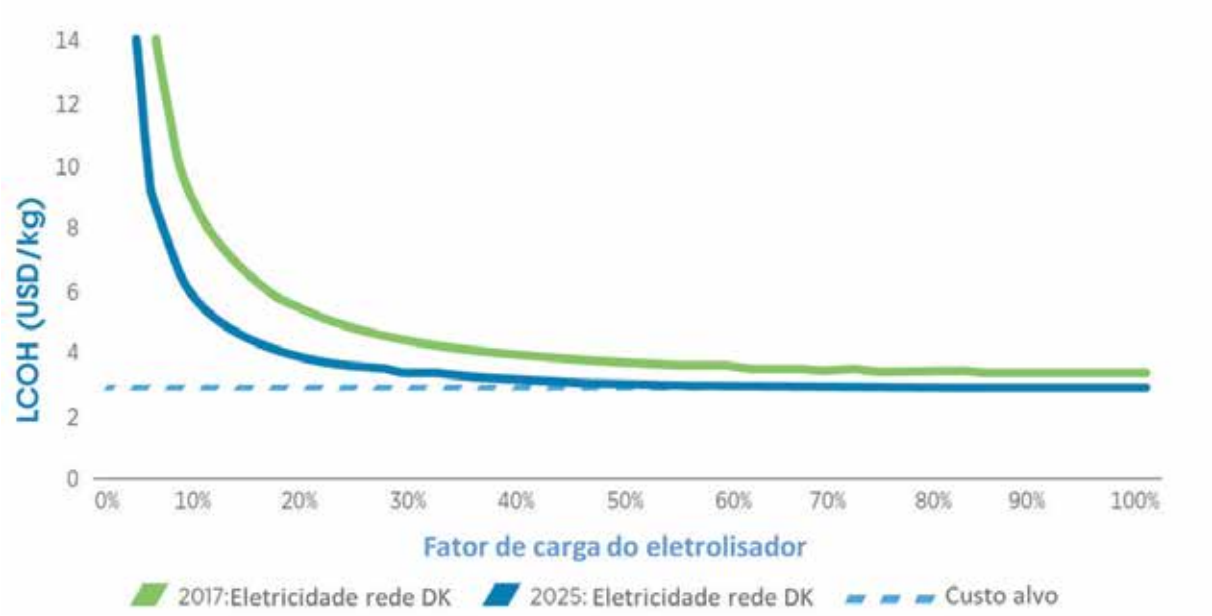


Figura 5 – Evolução dos custos de produção do hidrogénio em função do fator de carga do eletrolisador (exemplo da Dinamarca, IRENA, 2019)

Em termos de investimento, quanto maior for o fator de carga do eletrolisador, menor será o custo unitário de hidrogénio produzido. Os fatores de carga do eletrolisador devem de modo geral exceder 50% do custo de investimento atual, mas os custos quase ótimos começam a ser alcançados acima dos 35% (Figura 5). Essa percentagem irá diminuir à medida que desce o custo dos eletrolisadores. Os sistemas híbridos

eólico-solar serão aparentemente uma solução promissora podendo atingir fatores de capacidade bem acima de 50% em locais adequados, onde se encontrem ambos disponíveis e se complementem entre si.

Relativamente ao custo da energia que alimenta o processo, segundo IRENA (2019), o hidrogénio renovável deve ser produzido a custos inferiores a 2,5 USD/kg (Figura 6), mas esse valor depende da produção ser centralizada ou descentralizada além de outros fatores, como, por exemplo, o segmento de mercado.

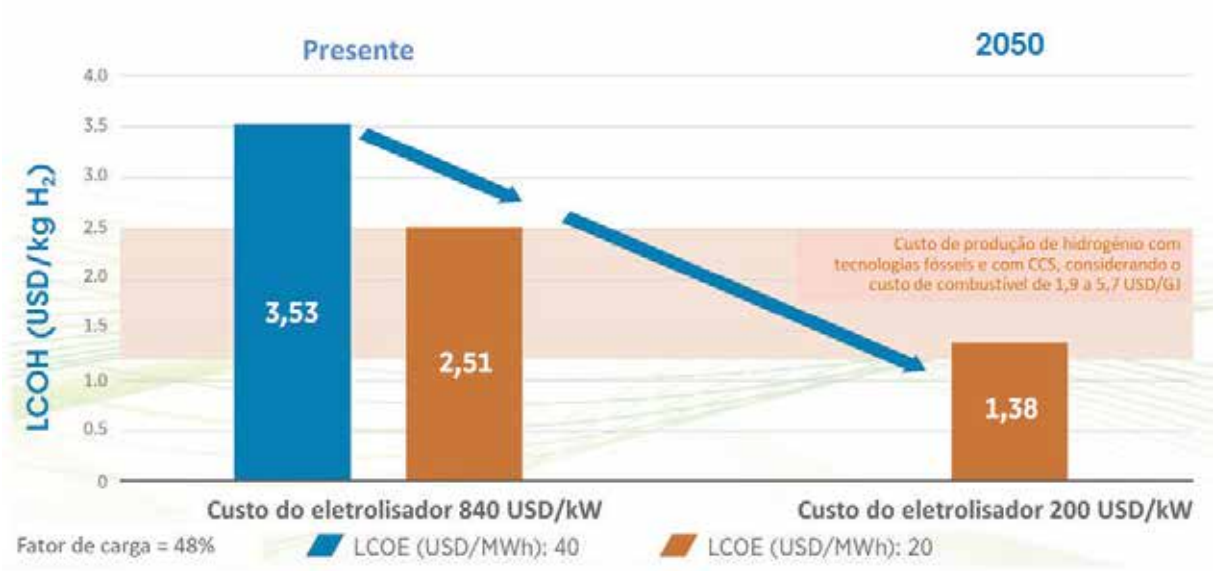


Figura 6 – Custos do hidrogénio para diferentes preços da eletricidade e do CAPEX para o eletrolisador com uma capacidade de carga de 48% (IRENA, 2019)

Atualmente a produção de hidrogénio por eletrólise é mais cara do que por outros métodos, por exemplo devido aos custos de capital e à dependência a nível de custos de eletricidade. Para *Hydrogen Europe* (2018), no cenário para 2030 (Figura 7) as principais etapas necessárias para concretizar a visão para 2030 são a redução dos custos dos eletrolisadores, a melhoria da eficiência da eletrólise, em particular pelo aumento da escala na implementação da tecnologia PEM, alcançando maturidade equivalente à tecnologia alcalina[3]. O eletrolisador PEM de maior dimensão atualmente em operação (EnergiePark Mainz, 6 MW) tem 75% de eficiência de conversão. Em 2020 existem vários projetos em desenvolvimento, com financiamento pelo Programa Europeu "FCH-JU", para instalação de eletrolisadores PEM de média-alta dimensão (superior a 10 MW).

3 A química dos eletrolisadores é variada. Os eletrolisadores alcalinos são uma tecnologia madura, mas ainda há potencial para redução de custos se aumentar a procura. A tecnologia PEM (membrana de permuta de protões) e a tecnologia SOEC (célula de óxidos sólidos) são relativamente novas.



Figura 7 – Roteiro tecnológico Europeu para a eletrólise (Hydrogen Europe, 2018)

No contexto do sistema energético nacional, e em particular da produção de hidrogénio por diferentes trajetórias tecnológicas, é de notar que estas trajetórias vão evoluindo ao longo do tempo em função da sua competitividade económica, ambiental e energética. Isto traduz-se no aumento da eficiência energética, na redução do impacte ambiental e na redução dos custos totais de produção. As avaliações e os dados apresentados nas publicações da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG, 2018; DGEG, 2019) apontam para uma evolução expectável (2020-2040) do *mix* de tecnologias de produção do hidrogénio conforme se apresenta na Figura 8.

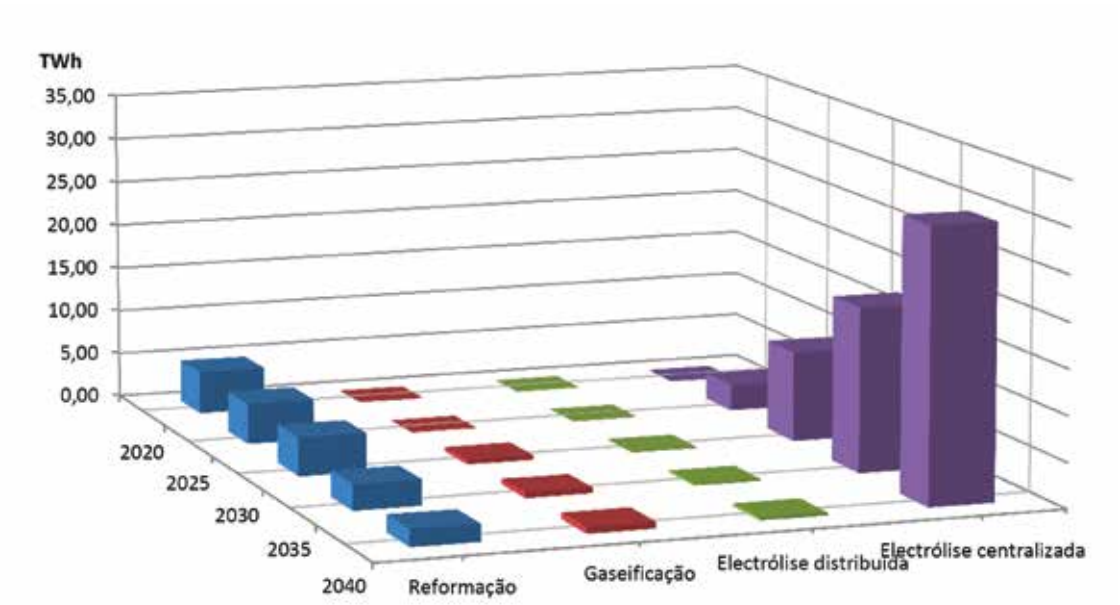


Figura 8 – Evolução temporal do *mix* de tecnologias de produção do hidrogénio

Complementarmente, analisou-se a evolução na refinação convencional de combustíveis do hidrogénio fóssil, corrigido ou não em fim de linha com captura e armazena-

mento de carbono, bem como do hidrogénio renovável. Os resultados são apresentados na Figura 9.

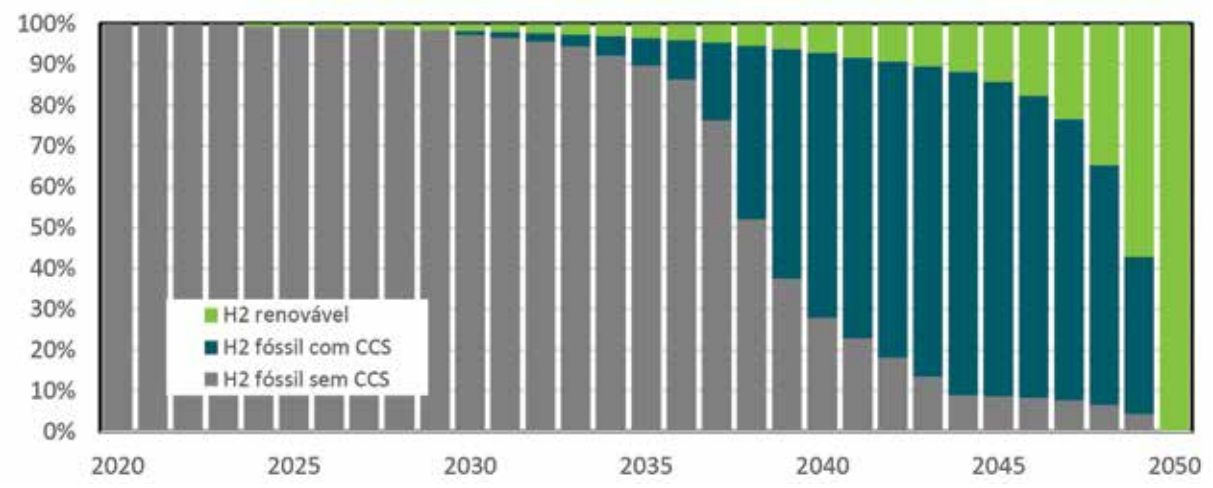


Figura 9 - Evolução da utilização de H_2 fóssil, com e sem CCS, e H_2 renovável, na refinação de combustíveis

5.2. Análise previsional dos impactes em diferentes dimensões

A análise previsional de impactes tem por objetivo realizar uma avaliação abrangente, em diferentes dimensões de análise, da potencial contribuição das ações enquadradas no Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio face às prioridades de política traçadas em Portugal.

O Anexo I apresenta com maior detalhe os pressupostos e os resultados das cenarizações modeladas para 2030, com quantificações nos indicadores selecionados.

5.2.1 - No domínio científico e tecnológico

A Economia do Hidrogénio contribui para o avanço da I&I e está alinhada com a Estratégia Nacional para a Inovação Tecnológica e Empresarial para Portugal no período 2018-2030 (Resolução do Conselho de Ministros nº 25/2018, de 8 março). As cadeias de valor para o hidrogénio envolvem inovação sistémica disruptiva, a qual evolui no tempo e em função da cadeia de valor com dinâmicas distintas, reconhecendo-se na Comunidade C&T existir uma margem considerável para I&I e para a gestão de portefólios – com base na maturidade atual em TRL e subsequente distância ao mercado. A realidade demonstra que a narrativa está a evoluir do desenvolvimento da tecnologia para a necessidade da sua gestão integrada no tempo e espaço – *i.e.* ao longo das cadeias de valor, e nos contextos de aplicação, bem como na estimulação dos diferentes segmentos de mercado. Estimulando um quadro de investimento plurianual em

I&D e Inovação, abrangendo toda a cadeia de valor do hidrogénio, terá impacte no Sistema Nacional de Inovação a partir de níveis mais baixos de maturidade tecnológica (TRL), *e.g.* o desenvolvimento de tecnologias de última geração (componentes-chave, reservatórios de alta pressão, pilhas, etc.), até TRL mais altos e próximos do mercado. O desenvolvimento de *clusters* tecnológicos associados à produção, armazenamento, distribuição e utilização do hidrogénio, além de contribuir e robustecer o ecossistema de inovação, poderá promover a economia a nível regional/local, melhorando as infraestruturas existentes, promovendo a indústria e capacitando o sistema regional de inovação para uma melhoria da produtividade e da qualidade de vida (Sheikh *et al.*, 2016; DGEG, 2018 e 2019).

Finalmente encontra-se devidamente enquadrado no PNEC 2030, no qual já está devidamente endereçado na sua 5ª Dimensão: 'Investigação, Inovação e Competitividade'.

5.2.2 - Na competitividade das empresas

As PME desempenham um papel muito importante na comunidade de hidrogénio e pilhas de combustível, em consonância com a natureza nascente do setor. O crescimento destas entidades tem sido objeto de apoio, com financiamento superior a 31% até ao momento atribuído pela iniciativa europeia "FCH JU" beneficiando as PME (20% no caso do Programa Horizonte 2020). É de esperar que uma futura parceria institucional sobre hidrogénio seja de importância estratégica para o sucesso desta área, apoiando a fertilização cruzada de PME e grandes empresas, trazendo ideias inovadoras para os mercados de oferta massificada.

É de notar que o *cluster* tecnológico associado ao hidrogénio poderá igualmente desempenhar um papel importante na criação de empregos, promovendo a economia de baixo carbono com base em novas fontes energéticas, podendo ainda vir a estimular cadeias de valor de interesse local.

5.2.3 - No domínio social

A perceção pública e os fatores de aceitação estão muito dependentes das condições locais. Em geral, o benefício do hidrogénio mais amplamente reconhecido pela sociedade refere-se ao seu elevado potencial para descarbonizar os setores de mais difícil eletrificação. Este contributo tem origem em soluções inovadoras e comprovadas, não apenas para a economia mas igualmente para a saúde pública, contribuindo para a descarbonização com emissão nula na fase de uso de outros poluentes gasosos, partículas e ruído quando comparado com as tecnologias de combustão direta de combustíveis fósseis, em especial em áreas sensíveis e densamente povoadas. Será de relevar ainda a facilidade e conveniência de utilização destas tecnologias pelo

utilizador final. Em relação a este aspeto é de referir ainda a necessidade de melhorar a perceção dos consumidores sobre as condições de segurança da utilização do hidrogénio como um dos desafios mencionados pelos *stakeholders* nacionais.

5.2.4 - No custo do hidrogénio e no impacte económico

O custo de produção do hidrogénio (DGEG, 2019) é o fator base do preço final do hidrogénio, ao qual serão necessariamente acrescidos os custos de transporte e armazenamento, a margem de comercialização do distribuidor e, finalmente, taxas e impostos. A Figura 10 e a Tabela 8 apresentam os valores do custo de produção do hidrogénio (LCOH que inclui CAPEX, OPEX, custo de energia elétrica e outros custos associados) projetados para os anos entre 2020 e 2040, variando em função dos parâmetros que mais influenciam o custo de produção do hidrogénio. Analizando estes valores, verifica-se que a redução do CAPEX (custo de investimento na infraestrutura de produção, eletrolisadores e restante sistema) entre 2020 e 2040, resulta na redução do custo de produção de hidrogénio, do valor inicial de 4,69 €/kg H_2 para 3,30 €/kg H_2 em 2040.

Adicionando à redução do CAPEX, o aumento do fator de capacidade para 65% em 2040 (equivalente ao funcionamento dos eletrolisadores à potência nominal em 65% do tempo), o custo de produção do hidrogénio desce ainda para 3,11 €/kg H_2. Além disso, o aumento da eficiência do sistema para 47,7 kWh_{elec}/kg H_2 em 2040, resulta numa redução adicional do custo de produção para 2,75 €/kg H_2 em 2040.

Finalmente, o parâmetro com maior impacte no custo de produção do hidrogénio é a redução do preço de energia elétrica. Considerando uma projeção do preço médio de energia elétrica de 0,015 €/kWh em 2040, verifica-se um efeito acumulado de todos os parâmetros considerados que resulta num custo de produção do hidrogénio que pode atingir o valor de 1,07 €/kg H_2. Salienta-se que o valor mínimo alcançado no leilão de 2019 para energia fotovoltaica foi 14,73 €/MWh. No entanto, a energia consumida na elétrolise deverá ser proveniente de um misto de fontes renováveis (fotovoltaica, eólica e/ou outra) de produção dedicada, complementada com energia da rede quando necessário para serviços à rede ou oportuno por baixo preço. Assim, cenarizou-se o preço médio da energia utilizada nos eletrolisadores inicialmente próximo do preço no MIBEL, aproximando-se progressivamente do valor minímo atrás referido. Em todo o caso, a possibilidade de caso-a-caso negociar preços específicos mais vantajosos através de contratos com compromissos de longo prazo, poderá resultar em saltos quânticos na evolução dos custos aqui cenarizados, encurtando significativamente os prazos referidos para determinada meta.

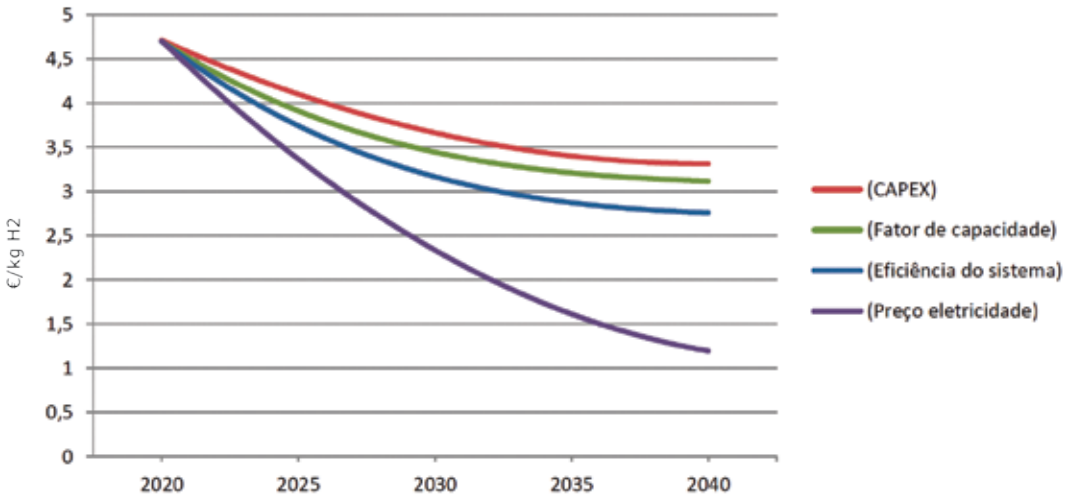


Figura 10 - Efeito cumulativo dos parâmetros mais significativos na evolução do custo de produção do hidrogénio (LCOH)

Tabela 8 - LCOH do hidrogénio considerando o efeito cumulativo da otimização dos parâmetros do sistema

	CAPEX	Fator de capacidade	Preço da elétricidade	Eficiência do sistema	LCOH
Ano	(€/kW)	(%)	(€/kWh)	(kWh_{elec}/kg H_2)	(€/kg H_2)
2020	861	43	0,05	54,3	**4,69**
2025	594	50	0,04	52	**3,26**
2030	328	55	0,03	49,5	**2,12**
2035	258	60	0,02	48,5	**1,45**
2040	189	65	0,015	47,7	**1,07**

O cenário inicial, PNEC MA, privilegia a produção de hidrogénio com base na eletrólise (descentralizada e centralizada), com a gaseificação de biomassa em menor escala. Os cenários H2, com as variantes de eletrólise incrementadada, consideram uma rápida evolução da capacidade instalada em eletrólise centralizada que, logo a partir de 2025, se sobrepõe às restantes alternativas tecnológicas. Os processos de produção de hidrogénio considerados, têm de ser processos limpos, privilegiar fontes renováveis e, simultaneamente, satisfazer os requisitos do sistema energético nacional e promover a sua descarbonização.

Os cenários "H2 base", "H2 export +" e "H2 export –" incluem instalações de produção de energia renovável (solar e eólica) em regime de produção dedicada e beneficiaram de uma modelação específica utilizando a ferramenta informática "energyPLAN" para otimização do *mix* energético que alimenta os eletrolisadores. Verificou-se que a solução mais equilibrada em termos de fontes renováveis e utilização da rede elétrica, para uma capacidade instalada de eletrolisadores de 1 GW, é constituída por um parque fotovoltaico com capacidade instalada de 1 GW, um parque eólico com capacidade instalada de 1,2 GW e ligação à rede elétrica para exportação/importação de energia em alturas em que tal seja técnica e economicamente vantajoso.

As necessidades de trocas de energia com a rede variam ao longo do tempo de acordo com os picos de produção de energia renovável dos parques dedicados, dos excedentes de energia a nível da rede ou em função da necessidade de manter um nível de produção de hidrogénio nos eletrolisadores. No entanto, a modelação em "energyPLAN" permitiu verificar que, considerando as capacidades de produção atrás referidas e os perfis horários de produção nacional de energia fotovoltaica e energia eólica, as necessidades de trocas com a rede têm um valor mínimo para uma produção de cerca de 3,6 TWh de hidrogénio (Figura 11). Para além disso, a produção de 4,6 TWh de hidrogénio, projetada nos cenários "H2 base", "H2 export +" e "H2 export –", utiliza 1,3 TWh de energia da rede. A utilização de energia da rede é vantajosa em alturas em que haja excesso de produção a nível nacional e em alturas em que o preço de mercado dessa energia é mais baixo. Este balanço entre as fontes de energia dedicadas vs utilização de energia da rede e produção de hidrogénio, necessita de estudo específico caso a caso, avaliação em situação real e integração em projeto de licenciamento, precedendo o processo de construção e crescimento da instalação.

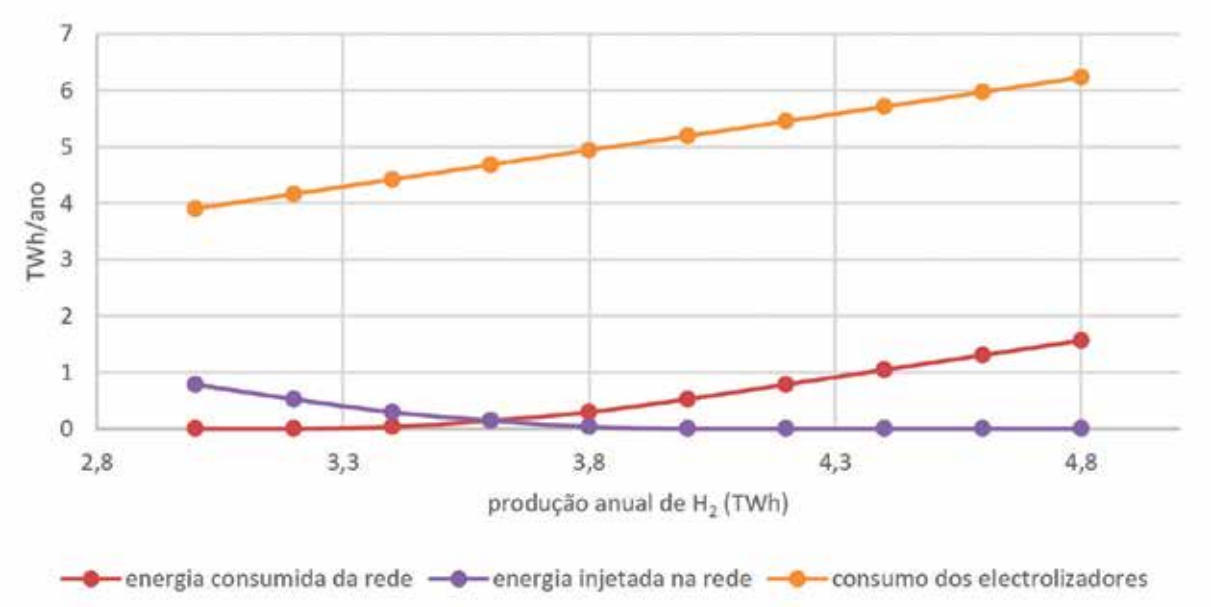


Figura 11 – Consumo total de eletricidade e trocas com a rede elétrica para diferentes valores de produção anual de H_2

A introdução do hidrogénio no sistema energético nacional, produzido nas quantidades ilustradas na Figura 12 de acordo com os cenários atrás descritos, divide-se hierarquicamente para:

(i) exportação;
(ii) injeção na rede de gás natural de forma direta;
(iii) injeção na rede de gás natural após metanação;
(iv) utilização na mobilidade (maioritariamente nos veículos pesados);
(v) utilização na indústria e
(vi) produção de eletricidade.

Esta distribuição e estabelecimento de prioridades encontram-se ilustrados na Figura 13.

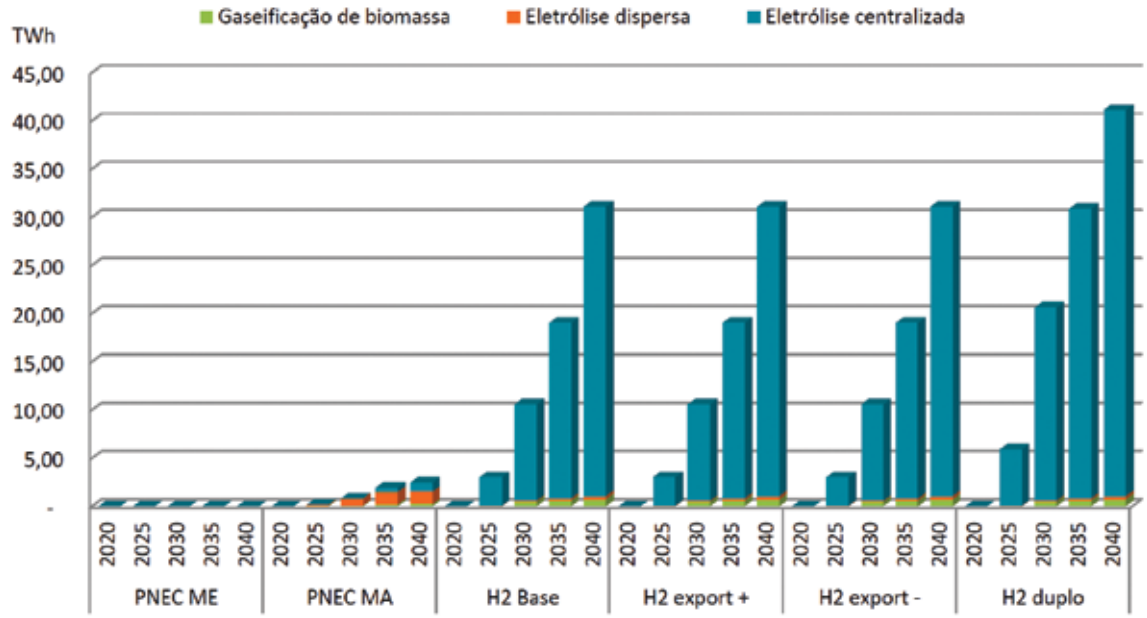


Figura 12 – Quantificação dos cenários de produção do hidrogénio renovável no sistema energético nacional

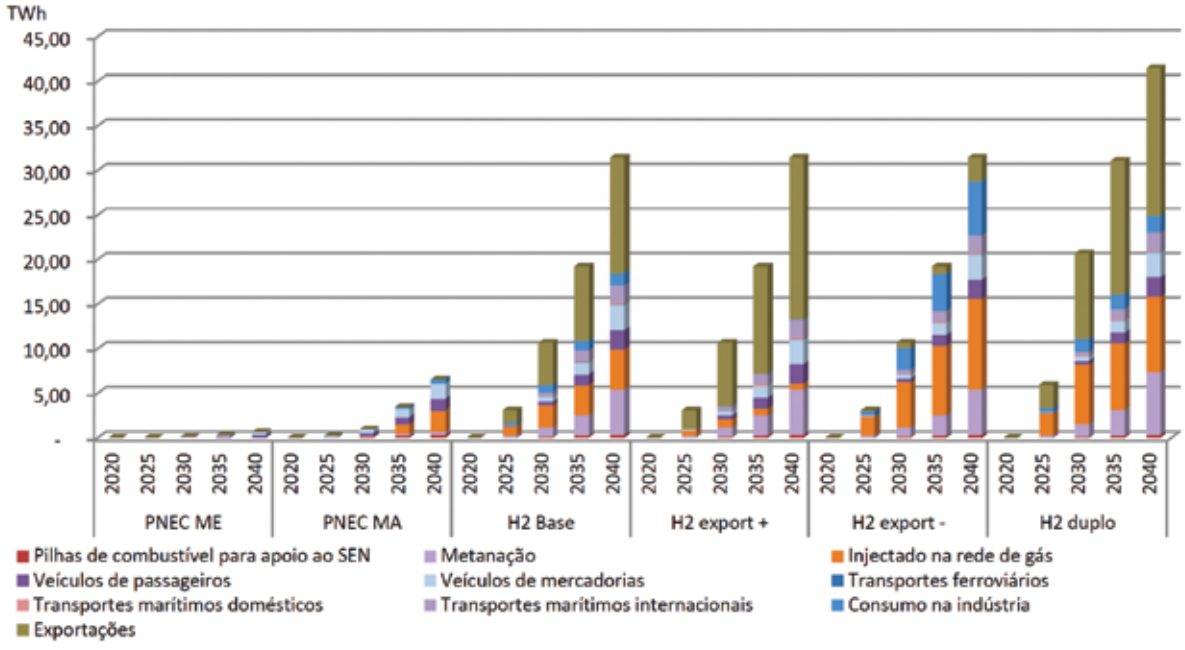


Figura 13 – Quantificação dos cenários de utilização do hidrogénio no sistema energético nacional e exportação

Considerando os valores de investimento para cada tecnologia de produção e utilização do hidrogénio publicados nos relatórios do projeto ASSET (Vitae *et al.*, 2018), apresentados na Tabela 9, é possível estimar os valores de investimento necessários para implementação da capacidade de produção/consumo de hidrogénio definidos nos cenários e apresentados na Figura 14.

Tabela 9 – Custo de investimento das tecnologias de produção e consumo de hidrogénio (adaptado de Vitae *et al*, 2018)

	Custo[4] (€/kW de capacidade instalada)				
Produção	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**
Produção de H2 via gaseificação de biomassa	4 407	4 015	3 622	3 447	3 272
Electrolisadores distribuídos	1 259	828	397	356	315
Electrolisadores centralizados	861	594	328	258	189
Centrais PV dedicadas à produção de H2	705	673	640	553	467
Centrais eólicas dedicadas à produção de H2	1 098	1 052	1 006	931	857
Consumo					
Metanação	1 011	822	633	448	263
Pilhas de combustível para apoio ao SEN	4 513	3 825	3 136	3 025	2 914
Estação de compressão de hidrogénio	110	106	102	96	91
Estação de abastecimento de hidrogénio (S)	965	918	871	848	826
Estação de abastecimento de hidrogénio (M)	500	457	413	397	380
Estação de abastecimento de hidrogénio (L)	299	273	247	199	151
Veículos ligeiros (custo adicional €/veículo)*	20 000	16 000	13 000	6 500	-
Veículos pesados (custo adicional€/veículo)*	390 000	270 000	150 000	75 000	-

O Roteiro para a Neutralidade Carbónica em 2050 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019), inclui a utilização de hidrogénio no sistema energético nacional, mais especificamente, a sua produção utilizando energia renovável do setor electroprodutor e a sua utilização no setor dos transportes. A Tabela 10 apresenta o intervalo de valores referidos para utilização no sistema electroprodutor e no setor da mobilidade.

Tabela 10 - Energia elétrica convertida em hidrogénio de acordo com o RNC 2050

	2040		2050	
	%	TWh	%	TWh
Valor inferior	2%	1,1	5%	3,2
Valor superior	4%	2,2	7%	4,4

É de notar que o valor superior indicado para 2040 é compatível com a evolução prevista pelo cenário desenvolvido no âmbito do PNEC 2030, em que parte significativa do hidrogénio é utilizado no setor dos transportes. A ferramenta de modelação "LEAP" foi utilizada para avaliar os consumos de energia do parque automóvel nacional e quantificar a frota de veículos ligeiros e pesados que podem ser abastecidos por hidrogénio. Considerando um consumo de 1 kg H_2/100km e 80.000 km/ano para veículos ligeiros de frotas (táxis, empresas e mobilidade partilhada) e 10 kg H_2/100km e 40 000

4 Custos incluem investimento inicial (CAPEX) e custos fixos de operação (OPEX), não incluindo custos de energia.
* Adaptado de FCH JU 2017

- 80 000 km/ano para veículos pesados (passageiros e mercadorias) e, considerando uma utilização superior nos veículos pesados, é possível determinar a quantidade de veículos que podem ser abastecidos com base no hidrogénio renovável disponível em 2030 e 2040, de acordo com a modelação energética da DGEG, e em 2050 de acordo com os valores atrás referidos do RNC 2050.

Assim, no que respeita à mobilidade/transportes, os números estimados de estações de abastecimento de hidrogénio a instalar e de veículos a colocar em circulação entre 2030 e 2050, são os os que se apresentam na Tabela 11.

Tabela 11 – Quantificação de estações de abastecimento de hidrogénio e de veículos em circulação

	2020	2025	2030	2035	2040
Estações de abastecimento (capacidade de 60 kg H_2/hora com taxa de ocupação de 50%)	0	10	30	50	100
Veículos ligeiros em circulação	0	2 000	5 000	50 000	100 000
Veículos pesados em circulação	0	500	2 000	3 000	5 000

A introdução de veículos a hidrogénio, de acordo com os custos atuais e previsões de evolução dos mesmos no curto-médio prazo, terá associado um acréscimo dos custos de aquisição relativamente às alternativas a combustíveis fósseis. Considerando os custos indicados na Tabela 12 e o número de veículos acima indicado é possível determinar o acréscimo de investimento necessário.

Tabela 12 – Custo de veículos a hidrogénio e equivalente a combustível fóssil (adaptado de FCH JU, 2018)

	(k€ por veículo)	2020	2030
Ligeiros	Veículo a H_2	60	55
	Veículo comb. fóssil	40	42
	Diferencial	20	13
Pesados	Veículo a H_2	620	400
	Veículo comb. fóssil	230	250
	Diferencial	390	150

Relativamente ao setor da indústria, considera-se na contabilização destes investimentos que a utilização do hidrogénio quer como matéria-prima (por exemplo em processos de produção de adubos, de produção de metanol ou no processo de refinação do petróleo), quer em processos de combustão, não deverá ter um sobrecusto em relação à utilização atual que já se verifica neste setor. Isto justifica-se por se tratar de uma mera substituição da origem do hidrogénio, de fonte fóssil para fonte renovável.

No que diz respeito à injeção do hidrogénio na rede de gás natural, não são contabilizados custos de adaptação da rede ou dos equipamentos de utilização final, por se

considerar que uma baixa percentagem de hidrogénio na rede não obriga a qualquer alteração. Esta situação resulta do facto do valor calculado para a fração de hidrogénio é inferior a 20% no cenário de maior disponibilidade de hidrogénio. Assim, são apenas contabilizados os custos de compressão do gás a injetar para compatibilização com os requisitos da rede.

São também contabilizados os custos da tecnologia para utilização do hidrogénio em processo de metanação de dióxido de carbono proveniente de captação da atmosfera, de efluentes gasosos ou de produção de biogás.

A soma de todos os investimentos referidos, necessários para a instalação da capacidade de produção e consumo de hidrogénio, resumem-se no Figura 14.

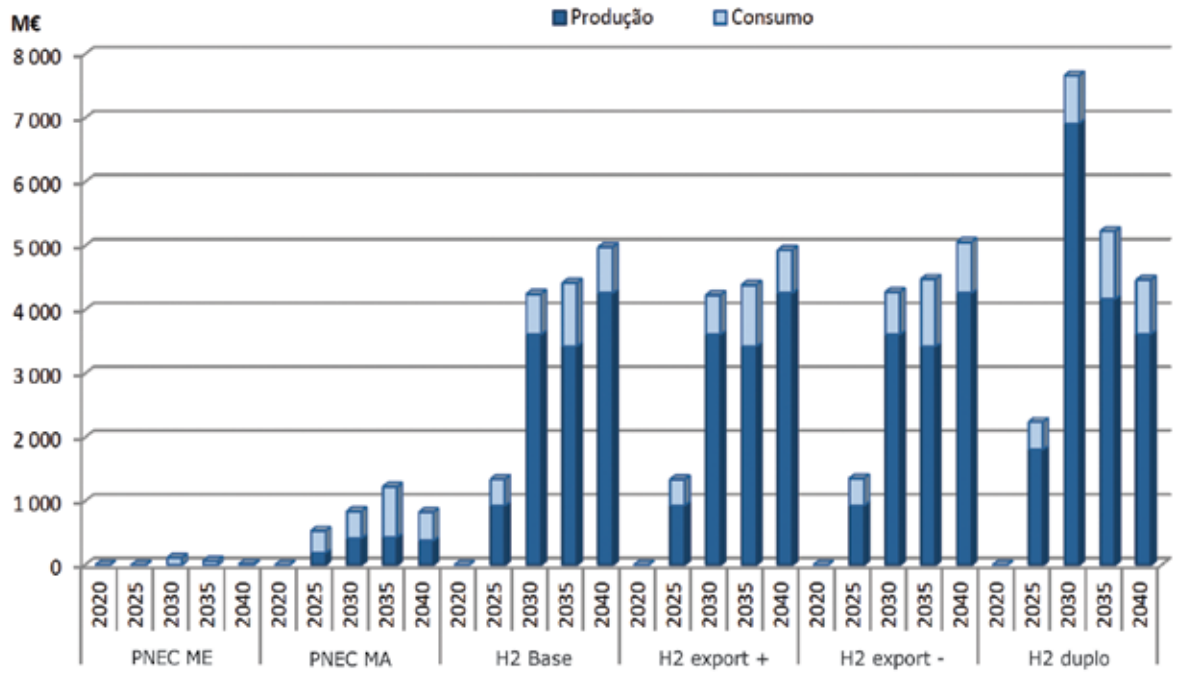


Figura 14 – Investimentos para implementação da capacidade de produção e consumo de hidrogénio 2020-2040

Os investimentos mais significativos, no lado da produção, dizem respeito à instalação da capacidade de produção de hidrogénio através da eletrólise da água. Por outro lado, no lado do consumo, surge o sobrecusto da transição para veículos a hidrogénio, a necessidade de instalação de uma infraestrutura de abastecimento de hidrogénio para a mobilidade e a instalação da capacidade de produção de eletricidade por utilização do hidrogénio nas pilhas de combustível. À semelhança do que se verifica noutras áreas da transição energética, poderá ser necessário o estabelecimento de incentivos para promover o início da transição para a utilização do hidrogénio. Estes incentivos financeiros podem ser essenciais para redução do risco dos investidores, ajudando a quebrar o impasse inicial de falta de simultaneidade entre oferta e procura e na fase de comprovação dos modelos de negócios inovadores.

5.2.5 - Nos impactes ambientais e redução das emissões de GEE

Para contabilização do potencial de redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), conseguido através da introdução do hidrogénio no sistema energético, é importante definir de forma clara a base de cálculo, nomeadamente o âmbito do estudo e os pressupostos assumidos. Assumindo uma abordagem conservadora, a Tabela 13 apresenta os valores das emissões de GEE iniciais para cada setor objeto de potencial redução.

Tabela 13 - Redução de emissões de GEE previsionais em cada setor, após adoção do hidrogénio

Setor	Emissões	Observação
Produção de energia elétrica	400 g CO_2 eq/kWh	Relativos a emissões da produção de 1 kWh de energia elétrica numa central de ciclo combinado a gás natural, incluindo as emissões do ciclo de vida da infraestrutura
Indústria	236 g CO_2 eq/kWh térmico	Relativos às emissões da produção de 1 kWh de calor através de caldeira a gás natural, incluindo as emissões do ciclo de vida da infraestrutura
Gás natural	236 g CO_2 eq/kWh térmico	Relativos às emissões de produção de 1 kWh térmico em caldeira de, incluindo as emissões do ciclo de vida da infraestrutura
Mobilidade	110 g CO_2 eq/km	Relativo a um veículo a gasolina com um consumo de 5 l/100 km, não incluindo as emissões do ciclo de vida da infraestrutura, portanto considerando apenas as emissões da fase de utilização

A introdução do hidrogénio nas referidas cadeias de valor permite reduzir as emissões de GEE associadas. Assume-se que o hidrogénio permite conversões energéticas isentas de emissões de GEE no local de utilização e que a produção do hidrogénio renovável é neutra em emissões de GEE, não incluindo as emissões do ciclo de vida da infraestrutura necessária para estes processos. Estas emissões do ciclo de vida da infraestrutura são contabilizadas a nível global nos países de produção dos equipamentos, não contando para as emissões nacionais de GEE.

Assim, os dados das cenarizações para a introdução do hidrogénio no sistema energético permitem estimar o potencial de redução das emissões de GEE, de acordo com o apresentado a seguir, na Figura 15.

O cenário H2 base deste Roteiro consegue uma potencial redução das emissões de GEE de próximo de 1 000 kton de CO_2eq em 2030 com um investimento acumulado

de cerca de 5700 milhões de euros. Num cenário de maior penetração do hidrogénio, para uma capacidade instalada de 4 GW de eletrolisadores em 2030, o investimento acumulado sobe para cerca de 10 000 milhões de euros e a redução potencial de emissões de GEE aumenta para as 3900 kton de CO_2eq. De notar que o maior potencial de redução de emissões de GEE a médio prazo, surge no cenário que privilegia o consumo interno de hidrogénio em detrimento das exportações, chegando próximo de 9500 kton de CO_2eq em 2040.

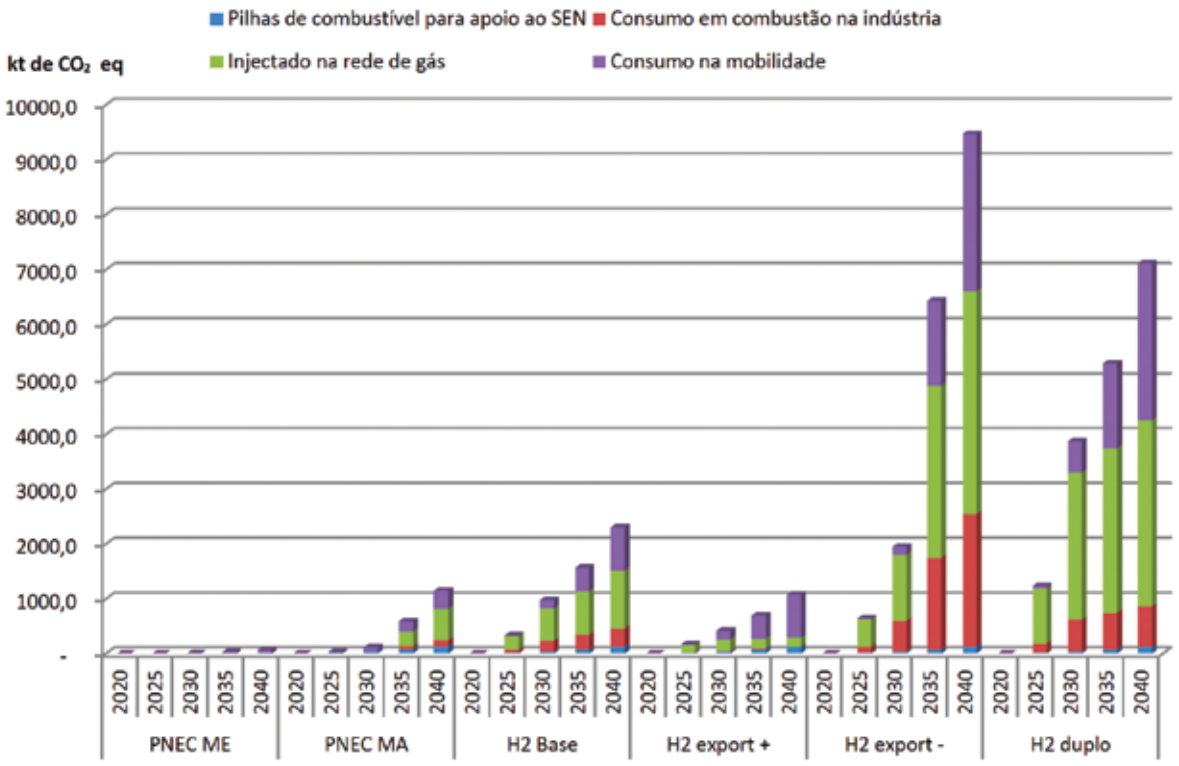


Figura 15 – Potencial previsional de redução das emissões de GEE decorrentes da introdução do hidrogénio

5.2.6 - No domínio do mercado

A economia de hidrogénio é uma componente importante da futura economia de baixo carbono. Seja nas aplicações no sistema energético nacional, seja nas aplicações não energéticas (*i.e.* matéria prima industrial), o hidrogénio oferece desempenhos interessantes na redução gradual da utilização dos combustíveis fósseis e na mitigação do aquecimento global associado - atraindo empresas, países e áreas económicas. A versatilidade resultante das suas características e as exigências técnicas e económicas que daí derivam, permite aplicações transversais aos vários setores com uma necessária mobilização de *stakeholders* privados e públicos. Esta diversidade e a exigência de escala crítica conduzem à necessidade de combinação e sincronização de um *mix* de medidas de incentivo à oferta e à procura orientadas para o mercado e apoiadas por parcerias orientadas por objetivos. Um forte alinhamento das atividades

des nas cadeias de inovação, da investigação, desenvolvimento, demonstração até à primeira introdução no mercado é também necessário, com uma estrutura de missão para gerir e operacionalizar o quadro estruturante adotado e a subsequente implantação das medidas apoiadas, a fim de garantir uma transição com sucesso (eficiente, eficaz) do hidrogénio nas cadeias de valor.

Na resposta a falha(s) de mercado, além da necessidade de competências e treino nas diferentes áreas da cadeia de valor, devem ser consideradas medidas de estímulo e apoio em duas áreas principais: i) Incentivos fiscais e apoios financeiro; e ii) Mitigação do risco de desenvolvimento da tecnologia, dado existir risco financeiro dos pioneiros (lado da oferta) e primeiros adotantes (lado da procura) da tecnologia inovadora lançada no mercado.

5.2.7 - No domínio da política energética e ambiental

A integração e taxa de penetração do hidrogénio no *mix* energético nacional podem ser incentivadas e intensificadas pelas políticas públicas, contribuindo para as metas de descarbonização do sistema energético nacional, no quadro do PNEC 2030 e do RNC 2050, e para a diversificação das soluções de segurança energética associadas ao armazenamento de longa duração com valorização das fontes de energia renováveis (FER) intermitentes.

A curto prazo os incentivos passam por medidas para enfrentar o diferencial de custos inerente às tecnologias existentes, *e.g.* o caso dos veículos a hidrogénio e o investimento em infraestruturas. Acresce poderem vir a ser necessários instrumentos específicos para minimizar estes investimentos e melhorar os aspetos económicos das cadeias de fornecimento. Será ainda necessário estender o esquema de garantias de origem para certificar o hidrogénio produzido a partir de FER por forma a realçar o valor acrescentado sistémico das tecnologias para produção, armazenamento, distribuição e utilização do hidrogénio.

Há que identificar lacunas e barreiras na legislação nacional e comunitária, *e.g.* no licenciamento das operações ao longo da cadeia do hidrogénio, além de outros aspetos que dificultem a descentralização da produção de eletricidade e o autoconsumo, e adaptar o quadro normativo às necessidades de uma implantação adequada e segura das infraestruturas de armazenamento de hidrogénio e das tecnologias necessárias para a sua utilização (EPSC, 2018; DGEG, 2018 e 2019).

Finalmente, os *stakeholders* nacionais (DGEG, 2018 e 2019) realçam o expectável impacte positivo em Portugal da implementação da economia do Hidrogénio na prossecução de objetivos e metas definidos no âmbito das políticas para a neutralidade carbónica, para a redução da dependência externa de energia primária e para as condições de segurança no abastecimento, à valorização das fontes de energias renováveis e à possibilidade de criar zonas energeticamente autónomas e promover sistemas autónomos de funcionamento híbrido.

5.2.8 - No domínio do desenvolvimento regional/local

Dada a sua capacidade para incentivar a produção descentralizada de eletricidade e de calor, a introdução do hidrogénio apresenta um potencial elevado para contribuir para o desenvolvimento regional/local, quer através da capacitação a nível regional/local - tanto em termos tecnológicos como em termos da criação de novos modelos de negócio, quer através do desenvolvimento de infraestruturas e de *clusters* dedicados a nível local.

Torna-se necessário compatibilizar a atuação à escala nacional, regional e local, bem como definir objetivos regionais/locais, para que a promoção de novas oportunidades de mercado e a especialização de áreas de negócio se traduza na exploração de novos modelos de negócio potenciados pela proximidade e flexibilidade do hidrogénio na distribuição. O hidrogénio poderá ser introduzido nas redes locais de gás ou poderão, a mais longo prazo, construir-se infraestruturas dedicadas a nível local. As estações de abastecimento de veículos a hidrogénio, que numa primeira fase serão destinadas a frotas de veículos pesados, de passageiros ou de mercadorias, poderão também integrar a utilização por veículos ligeiros (DGEG, 2018 e 2019).

A proposta de instalação de uma grande instalação de produção de hidrogénio renovável em Sines, com capacidade instalada de 1 GW de eletrolisadores em 2030, alimentada por energia renovável solar e eólica produzida localmente, juntamente com a instalação de um *cluster* sectorial, incluindo um Laboratório Colaborativo dedicado à ID&I nesta área, será um motor e estímulo para a dinamização e promoção da região de Sines e envolvente. A região beneficiará de uma atividade económica que incluirá toda a cadeia de valor, desde a produção de eletricidade renovável, produção de equipamentos (ex.: eletrolisadores), produção de hidrogénio, armazenamento e encaminhamento para transporte de curta, média e longa distância, beneficiando também as infraestruturas já existentes nomeadamente em termos de transporte de energia e transporte de mercadorias, por via rodoviária, ferroviária e marítima (utilização do porto de águas profundas de Sines) incluindo a componente de exportação. Poderão ser implementados projetos de produção de hidrogénio renovável noutras regiões do país em que existam condições sociais, ambientais e económicas favoráveis de forma a maximizar a capacidade nacional de exportação, favorecendo a economia nacional, aumentando a segurança energética e reduzindo a dependência energética nacional e promovendo a diversificação de recursos e tecnologias, especialmente as que garantam maiores competências nacionais. Neste sentido, considera-se no cenário "H2 esforço duplo" a implementação de 4 GW de electrolizadores a nível nacional até 2030, juntamente com as necessárias instalações para produção dedicada de energia renovável (fotovoltaica e eólica), bem como promoção de projetos de produção de hidrogénio a partir de fontes biomássicas.

6. Monitorização do Plano

Um roteiro é um plano com uma visão estratégica que descreve as etapas principais necessárias a um processo de operacionalização o qual, no âmbito de uma ou mais organizações articuladas entre si, permite alcançar os resultados e metas propostas. Tem por base um conjunto dinâmico de requisitos em C&T, políticas e medidas, legislativas e regulamentares, financeiros, de mercado e outros, e um esforço associado em atividades e recursos intensificado pela escala e sinergias criadas entre as partes. Tem inerente um compromisso e pressupõe a colaboração e partilha entre aquelas partes no respetivo processo de I&I, implementação, monitorização e atualização.

Ao colocar em execução o presente Roteiro e Plano de Ação para o Hidrogénio em Portugal, as diferentes medidas e ações devem ser traduzidas em projetos e iniciativas e o seu progresso monitorizado apoiado por um conjunto de indicadores de *input* (*e.g.* despesa em I&I, despesa em recursos humanos, investimentos e outros), *output* (*e.g.* nº projetos, procura em hidrogénio, redução GEE, e outros), e mistos (*e.g.* documentos de política alterados, incentivos fiscais introduzidos, e outros), conforme se exemplifica seguidamente.

6.1 Indicadores exemplificativos

- Despesa em I&I
- Despesa em recursos humanos
- Volume de investimento
- Nº localidades envolvidas em Portugal
- Produção Nacional de H_2 (t/ano)
- Produção Nacional de H_2 renovável (t/ano)
- Produção Nacional de H_2 renovável por eletrólise (t/ano)
- Produção Nacional de H_2 renovável por gaseificação (t/ano)
- Produção Nacional de H_2 renovável por gaseificação de biomassa vegetal (t/ano)
- Produção Nacional de H_2 renovável por gaseificação de RSU (t/ano)
- H_2 renovável (TWh)
- Nº projetos iniciados = f (tempo, posição na cadeia de valor)
- Consumo nacional de:

  H_2 na mobilidade (TWh/ano)
  - H_2 na mobilidade – ligeiros (TWh/ano)
  - H_2 na mobilidade – pesados (TWh/ano)

H_2 renovável na indústria (TWh/ano)
H_2 renovável na indústria (energia) (TWh/ano)
H_2 renovável na indústria (matéria prima) (TWh/ano)
H_2 injetado na rede de gás natural (TWh/ano)
H_2 injetado na rede de gás natural (H_2) (TWh/ano)
H_2 injetado na rede de gás natural (CH4 - metanação) (TWh/ano)
H_2 para produção de energia elétrica (TWh/ano)

- % H_2 no Consumo Final Bruto de Energia (CFBE) (% TWh_{H2}/ TWh)
- % H_2 no CFBE - Energia elétrica
- % H_2 no CFBE - Aquecimento e Arrefecimento (A&A)
- % H_2 no CFBE - transportes

- Custo do hidrogénio renovável no mercado (internacional e nacional)
- Mercados energéticos-alvo (eletricidade/calor/ambos)
- Penetração do hidrogénio a nível societal (setores de atividade)
- Nº estações de abastecimento de veículos
- Vendas de veículos a hidrogénio
- Nº de veículos a hidrogénio no parque automóvel

- Emissões GEE do setor da energia (100 anos GWP) (Mt/a)
- Redução em GEE (t/ano)
- Redução em GEE_energia elétrica (t/ano)
- Redução em GEE_mobilidade (t/ano)
- Redução em GEE_rede de gás (t/ano)
- Redução em GEE_indústria (t/ano)

- Documentos de política preparados *
- Documentos de política alterados *
- Incentivos fiscais introduzidos *

Obs (*) Com impacte na implementação do hidrogénio

6.2 Plano de monitorização e revisão

A implementação e revisão do Plano de Ação deverá - numa primeira fase, liga-se ao calendário do PNEC 2030 e do definido no Artigo 17.º "Relatórios nacionais integrados de progresso em matéria de energia e de clima" do Regulamento (UE) 2018/1999 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018, relativo à Governação da União da Energia e da Ação Climática, pelo que se propõe adotar os seguintes momentos de avaliação/revisão:

- 2023: Avaliação do índice de concretização do plano de ação
- 2025: Avaliação do índice de concretização do plano de ação + Revisão objetivos e metas do plano de ação
- 2027: Avaliação do índice de concretização do plano de ação + Revisão objetivos e metas do plano de ação
- 2029: Avaliação do índice de concretização do plano de ação + Plano de ação detalhado para 2031-2040
- 2031: Avaliação final do índice de concretização do plano de ação

7. Conclusões e Recomendações

As tendências futuras no abastecimento acessível e seguro de energia limpa dependem do papel crucial das atividades, recursos, estratégias e das políticas a nível Nacional, bem como do alinhamento das políticas a nível europeu e internacional para a transição energética.

No *design* dos sistemas, a mudança transformacional ir-se-á expressar de maneiras completamente novas. Sendo fundamental integrar o impacto climático na estrutura das atividades económicas, é crítica a forma e ritmo como se desenvolve e consolida o papel das tecnologias limpas nas cadeias de valor. Como não existem soluções únicas e absolutas, dever-se-á recorrer a todas as tecnologias disponíveis – que se revelem úteis à mitigação das emissões de GEE, e desenvolver um sistema de energia mais sustentável e inteligente, incluindo a capacidade de armazenamento apropriada a cada situação.

Neste quadro global, a dinâmica crescente para descarbonizar as economias tem sido uma condição igualmente importante para o reconhecimento que o hidrogénio vem registando a nível mundial. O número de países que investem em tecnologias de hidrogénio tem progredido de forma expressiva (IEA, 2019), dado o potencial contributo do hidrogénio para esse grande desígnio além de contribuir para a segurança e resiliência energética. A nível Europeu, estão atualmente em preparação 38 projetos industriais, representando um volume de investimento orçamentado entre 3,2 a 4,4 biliões de euros que se irão candidatar no 2º semestre de 2020 ao Fundo Europeu de Inovação (EC, 2019). Acresce estar em preparação uma iniciativa IPCEI para o hidrogénio (EC, 2019), que abrangerá um conjunto amplo de áreas para projeto, como sejam: a produção de hidrogénio renovável, as aplicações para os transportes e setores da mobilidade, as aplicações industriais, as aplicações para o sector energético, edifícios e outras orientadas para os utilizadores finais. O ritmo acelerado da mudança e a escala do desafio significam que os próximos dez anos são absolutamente críticos para a penetração do hidrogénio. Os governos e a comunidade de *stakeholders* têm um papel fundamental a desempenhar neste processo, face aos vários desafios que inclui: custos; incerteza política e complexidade tecnológica; aceitação do público; complexidade da cadeia de valor e requisitos de infraestrutura; regulamentos e normas.

Haverá que ter em consideração ainda os seguintes aspetos:

- O alinhamento de objetivos climáticos e energéticos como condição necessária para o reconhecimento do papel estratégico do hidrogénio na transição energé-

tica. Dentro desse processo é necessário melhorar o entendimento do hidrogénio renovável como uma importante opção de mitigação de GEE;

- O reconhecimento do impacte positivo do hidrogénio na prossecução das metas e objetivos definidos no âmbito das políticas que promovem: as energias renováveis, a eficiência energética, a segurança do abastecimento de energia, a independência energética nacional;
- A oportunidade para reforçar a formação da força de trabalho em novas fontes de energia, bem como vir a estimular fornecedores nacionais;
- A inclusão do hidrogénio enquanto vetor energético no planeamento estratégico nacional, integrando-o de forma sistemática nos modelos de simulação energética às escalas nacional e regional;
- A necessidade de instrumentos específicos para fazer face aos investimentos de curto prazo, de modo a estimular o investimento em tecnologias inovadoras por via do apoio aos sobrecustos comparados à tecnologia de referência e fazendo assim face às falhas de mercado;
- A elaboração de esquemas de certificação, ou garantias de origem, do hidrogénio.

O hidrogénio já está em uso em vários setores importantes e é a própria indústria a demonstrar que pode ser produzido, armazenado e distribuído em larga escala. Atualmente, contudo, quase todo o hidrogénio para uso industrial é produzido usando gás natural, sendo a sua procura na forma mais limpa ou renovável ainda limitada apesar do interesse crescente. Nesta transição, muito contribuirá a curto ou médio prazo a disponibilidade de tecnologia de captura e reutilização de carbono e de eletricidade renovável a baixo custo. De modo geral, o potencial do hidrogénio reparte-se entre aplicações:

- Existentes, para produzir hidrogénio usando tecnologias de produção mais limpas e fazendo uso de um conjunto mais diversificado de fontes de energia;
- Novas, em alternativa aos combustíveis fósseis ou em complementaridade ao uso da energia elétrica nessas aplicações (e.x.: no transporte, calor, ferro e aço e eletricidade) onde o hidrogénio pode ser usado de forma direta ou convertido em combustível sintético.

Assim, tendo presente a realidade nacional, o presente Plano estratégico propõe um conjunto estruturado de medidas e ações para operacionalizar o Roteiro para o Hidrogénio em Portugal. A estruturação deste Roteiro toma como ponto de partida cada fase da configuração geral da cadeia de valor - da produção de hidrogénio até ao seu uso final, acrescidas das suas variantes (e.g. produção de hidrogénio por três vias alternativas) bem como um enfoque específico sobre:

(i) Fontes de energia aplicadas à realidade Portuguesa - condição crítica para a evolução e competitividade da cadeia de valor;

(ii) Um conjunto limitado de facilitadores estruturantes para estimular a sua adoção a curto ou médio prazo;

(iii) A aplicabilidade do hidrogénio exemplificada para as cidades e comunidades.

O grande objetivo do Roteiro é introduzir gradualmente o hidrogénio como pilar sustentável, integrando o processo de transição energética para a neutralidade carbónica em 2050. Neste quadro estruturante, identificaram-se as estratégias para a adoção e difusão do hidrogénio nos diferentes setores de atividade a nível nacional. Pretende-se desta forma contribuir de forma estruturada e sistemática para as iniciativas privadas e públicas que estão em preparação. São tidas em consideração as especificidades do País a nível dos recursos, as caraterísticas do sistema energético nacional, bem como a diversidade e maturidade tecnológica das soluções energéticas baseadas no hidrogénio e os respetivos impactes expectáveis. O conjunto de opções apresentado resulta da:

- Análise da penetração do hidrogénio na implementação do PNEC 2030 em que é crucial reconhecer, através de ações, o papel estratégico do hidrogénio no processo de transição energética, embora o seu papel seja modesto na próxima década, esse papel vai ser estruturante. O período 2020-2030 é entendido como um patamar crítico para a aprendizagem (privada, pública) e implementação ampla do hidrogénio renovável e acessível, no qual se irão otimizar as necessárias condições operacionais e reforçar objetivos nas avaliações do PNEC em 2023, 2025, 2027 e 2029, para que o hidrogénio possa robustecer e contribuir substancialmente para o sistema energético até 2050;
- Análise das oportunidades para Portugal e potencial das ações (oferta-procura em hidrogénio renovável, infraestruturas e fatores facilitadores relativamente ao contexto);
- Necessidade de estimular o mercado de energia limpa para aumentar o uso de hidrogénio renovável, o que poderá passar por incluir metas para a utilização do hidrogénio sustentável, quotas obrigatórias a curto prazo para mistura com o gás natural, ou a implementação de regulamentação para promover o uso do hidrogénio renovável nas áreas em que as oportunidades parecem mais promissoras (no curto, e no médio/ longo prazos), com base nas atividades económicas, nas infraestrutura e nas políticas existentes As recomendações expressas no Roteiro são específicas - mas não exaustivas, para cada uma dessas cadeias de valor;
- Necessidade de introduzir através do hidrogénio novos conceitos na eficiência energética e ambiental do sistema, através do fecho dos ciclos (economia circular), designadamente no processo de descarbonização de atividades económicas e infraestruturas associadas utilizando combustíveis fósseis (refinarias; rede de gás natural) por inovação via captura de carbono - esse desafio visa permitir emissões de CO_2 quase nulas em centrais de energia e descarbonizar a rede de gás natural e as indústrias intensivas em carbono. Será necessário identificar

os casos existentes e definir prioridades, lacunas e oportunidades, de modo a envolver as comunidades técnicas e empresarial. Deve ser definida uma agenda de longo prazo focada em objetivos, atividades e colaborações a desenvolver no período 2020-2050;

- Importância da promoção de projetos-piloto de demonstração, que será critica na década 2020-2030, e que constitui um passo crucial para o escalonamento custo-eficaz da integração do hidrogénio no sistema energético; Iniciar projetos de demonstração em locais onde possa haver rentabilização da sua flexibilidade no uso final, combinando e criando sinergias entre setores, ou na combinação da produção do hidrogénio como mercadoria, por forma a reduzir custos no transporte;
- Oportunidade de produzir hidrogénio renovável a baixo custo diretamente a partir de energia solar, ou de outras FER intermitentes, contribuindo para a melhor compreensão da economia e estratégias para o armazenamento sazonal, para aplicação nos processos produtivos e no conteúdo energético em materiais industriais mais descarbonizados, bem como para a gestão integrada da produção de energia com crescente penetração de renováveis no *mix* energético;
- Necessidade de impulsionar soluções de abastecimento energético inovadoras em regime *off-grid*, sistemas estes que permitam a pessoas e comunidades em regiões autónomas ou fora da rede, aceder a energia elétrica ou térmica renovável e com segurança, a desenvolver no período 2020-2050;
- Oportunidade a prazo para desenvolver vias para produzir em escala combustíveis sintéticos avançados e renováveis amplamente acessíveis para diferentes aplicações (rede gás, industria, transportes), a decidir para o período 2030-2050.

Não esgotando as hipóteses existentes, as medidas e ações apresentadas têm por objetivo:

1. Identificar as principais lacunas e oportunidades a partir das iniciativas atuais;

2. Incentivar o setor público e privado à investigação e inovação em energia limpa, em particular recorrendo às cadeias de produção-consumo de hidrogénio renovável;

3. Impulsionar a colaboração e cooperação internacional e acelerar o progresso para enfrentar os principais desafios da inovação ao longo da cadeia de valor neste domínio;

4. Compreender os limites da redução de custos nos eletrolisadores e seu potencial de operação em carga parcial com base na disponibilidade de FER variável, ou outras condições operacionais;

5. Desenvolver sistemas e regulamentos de certificação para o fornecimento de hidrogénio renovável, a promoção do uso limpo e altamente eficiente do hidrogénio, e a harmonização de regulamentos, códigos e normas; a volatilidade do hidrogénio significa que o uso da sua energia para conversão, transporte e armazenamento pode representar perdas significativas de eficiência; ao mesmo tempo, o uso de hidrogénio pode gerar ganhos de eficiência em comparação com o uso convencional de combustíveis fósseis, pelo que são necessárias melhorias tecnológicas para garantir alta eficiência ao longo da cadeia de valor;

6. Promover os sistemas a gás canalizado e a transição da infraestrutura existente para uma rede de hidrogénio; promover o armazenamento subterrâneo e o retrofitting dos queimadores para misturas hidrogénio-gás natural; caso o hidrogénio gasoso venha a demonstrar potencial para aumentar a fração de substituição do gás natural para valores cada vez mais elevados, as condições operacionais existentes precisarão de ser revistas;

7. Desenvolver novos mercados, com aplicações:
    a. A nível interno, na descarbonização de setores específicos (*e.g.* indústria, transportes);
    b. A nível internacional, face aos novos fatores diferenciadores no mercado global e às oportunidades e prioridades identificadas nas dinâmicas de transição energética em outros países - o potencial da produção de hidrogénio renovável em grande escala e baixo custo variará em diferentes regiões e países, ao fazer uso otimizado dos recursos renováveis disponíveis localmente;
    c. Na introdução de aplicações de elevado valor acrescentado, do tipo: "*Power-to-X*" e combustíveis sintéticos, nos setores da aviação, transporte marítimo, químico e petroquímico, cujo custo – apesar de ser atualmente alto, tem potencial para reduzir, podendo conduzir a soluções tecnicamente viáveis, acessíveis e competitivas para descarbonizar setores mais problemáticos onde as opções alternativas são limitadas ou inexistentes;

8. Promover oportunidades para investigadores, inovadores, iniciativa empresarial (privada, pública) e investidores, a fim de criar iniciativa em torno das soluções para os desafios/oportunidades e aumentar o empenho e uma realização efetiva por objetivos;

9. Fortalecer o diálogo e expandir a colaboração entre as principais partes envolvidas (*stakeholders*), incluindo: governos, investigadores, inovadores, empresários e outros atores do setor privado e público.

Referências

- Bloch C, Newcomb J, Shiledar S, Tyson M (2019). Breakthrough Batteries Powering the Era of Clean Electrification, Rocky Mountain Inst. Report.
- DGEG (2018). *O Hidrogénio no Sistema Energético Português: Desafios da integração*. Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa.
- DGEG (2019). Integração do Hidrogénio nas Cadeias de Valor: Sistemas energéticos integrados, mais limpos e inteligentes. Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa.
- EC (2019). The Innovation Fund, (visited oct 31, 2019: https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund_en#tab-0-2).
- EC (2019a) Strategic Forum for Important Projects of Common European Interest (IPCEI) (visited oct 31, 2019: https://www.clustercollaboration.eu/tags/ipcei)
- *Ecoinvent* (2014). *Ecoinvent* version 3.1, allocation, cut-off by classification system model. 8th edition. *Ecoinvent*, Zurich.
- Lund H, Connolly D (2014). EnergyPLAN – version 15, Advanced Energy System Analysis Computer Model. Aalborg University, Denmark. Available at http://www.energyPLAN.eu.
- EPSC (2018). 10 Trends Reshaping Climate And Energy. European Political Strategy Centre, European Union.
- FCH JU, Roland Berger (2017). "Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for European Regions and Cities" commissioned by the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), N FCH/OP/contract 180 , Reference Number FCH JU 2017 D4259.
- Heaps, CG (2016). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. Stockholm Environment Institute, Stockholm. In <https://www.energycommunity.org> (acedido em maio 2018).
- Hydrogen Europe (2018) Hydrogen enabling a zero emission Europe - Tehnology roadmaps, Sept 2018IEA (International Energy Agency) (2019). The Future of Hydrogen – Seizing today's opportunities, Paris.
- IRENA (2012). Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Vol. 1: Power Sector, Issue 5/5, IRENA Secretariat, June 2012.
- IRENA (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- ISO (2006). ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva.

- ISO (2006a). ISO 14044: Environmental Management – Life Cycle Assesment – Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
- PRé (2014). SimaPro 8.0.4.30 Multi user. PRé Consultants, Amesterdam.
- RNC 2050 (2019). Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019.
- Sheikh, Nasir & Kocaoglu, D.F. & Lutzenhiser, Loren. (2016). Social and political impacts of renewable energy: Literature review. Technological Forecasting and Social Change. 108. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.04.022.
- US DOE (2018). DOE H2A Production Analysis. US DOE Hydrogen & Fuel Cells Program, Washington DC. In <http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_production.html> (acedido em dezembro 2018).
- Vita A, Capros P, Evangelopoulou S, Kannavou M, Siskos P, Zazias G, Boeve S, Bons M, Winkel R, Cihlar J, Vos L, Leemput N, Mandatova P (2018). Sectoral integration – long term perspective in the EU Energy System. ASSET project Final report. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_draft_asset_study_12.05.pdf
- WEF (2018). Acelerating Sustainable Energy Innovation, World Economic Forum, Geneva.

ANEXO I

Cenário		PNEC ME	PNEC MA	H2 base	H2 export +	H2 export -	H2 duplo
Parâmetros de controlo da procura @ 2030							
H_2 nos veículos eléctricos de passageiros	*share*	0%	1%	2%	2%	2%	2%
H_2 nos veículos eléctricos de mercadorias	*share*	0%	2%	2%	2%	2%	2%
H_2 injectado na rede de gás rel. à energia final	*share*	0%	0%	10%	3%	19%	25%
H_2 usado directamente na indústria	*share*	0%	0%	2%	0%	5%	3%
Capacidade de instalações (potência nominal) @ 2030							
Limpeza de biogás (biometano)	MW	0	200	100	100	100	100
Metanação de biogás *in situ* biológica	MW	0	0	150	150	150	150
Gasificação de biomassa e metanação catalítica	MW	0	0	100	100	100	100
Gasificação de biomassa para H2	MW	0	160	100	100	100	100
CCUS e metanação catalítica	MW	0	0	100	100	100	200
Centrais eléctricas a biogás	MW	85	85	16	16	16	16
Centrais PV dedicadas à produção de H2	MW	0	0	2 640	2 640	2 640	5 280
Centrais eólicas dedicadas à produção de H2	MW	0	0	2 200	2 200	2 200	4 400
Pilhas de combustível para apoio ao SEN	MW	0	87	84	84	84	84
Electrolisadores distribuídos	MW	0	20	30	30	30	30
Electrolisadores centralizados	MW	0	0	2 200	2 200	2 200	4 400
Utilização (tempo anual equivalente de funcionamento) @ 2030							
Limpeza de biogás (biometano)	horas		6 570	6 570	6 570	6 570	6 570
Metanação de biogás *in situ* biológica	horas			4 818	4 818	4 818	4 818
Gasificação de biomassa e metanação catalítica	horas			5 256	5 256	5 256	5 256
Gasificação de biomassa para H2	horas		4 818	4 818	4 818	4 818	4 818
CCUS e metanação catalítica	horas			0	0	0	0
Centrais eléctricas a biogás	horas	3 504	3 504	3 504	3 504	3 504	3 504
Centrais PV dedicadas à produção de H2	horas			1 820	1 820	1 820	1 820
Centrais eólicas dedicadas à produção de H2	horas			2 374	2 374	2 374	2 374
Pilhas de combustível para apoio ao SEN	horas		876	876	876	876	876
Electrolisadores distribuídos	horas		7884	3276	3276	3276	1638
Electrolisadores centralizados	horas			4555	4311	4311	4311
Produção de H2 @ 2030							
via gaseificação	PJ	0,0	0,3	1,7	1,7	1,7	1,7
via electrólise dispersa	PJ	0,0	2,6	0,3	0,3	0,3	0,3
via electrólise centralizada	PJ	0,0	0,0	36,1	36,1	36,1	72,2
Total	PJ	***0,0***	***2,9***	***38,1***	***38,1***	***38,1***	***74,2***
Consumos intermédios de H2 @ 2030							
em pilhas de combustível para apoio ao SEN	PJ	0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
em Metanação de biogás por via biológica	PJ	0,0	0,0	0,8	0,8	0,8	0,8
em metanação catalítica de biomassa gaseificada	PJ	0,0	0,0	1,3	1,3	1,3	1,3

em metanação catalítica de CO2 de CCUS	PJ	0,0	0,0	1,4	1,4	1,4	2,8
Total	PJ	***0,0***	***0,3***	***3,8***	***3,8***	***3,8***	***5,2***
Consumos finais de H2 @ 2030							
nos veículos eléctricos de passageiros	PJ	0,1	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5
nos veículos eléctricos de mercadorias	PJ	0,1	1,4	1,8	1,8	1,8	1,8
transportes ferroviários	PJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
transportes marítimos domésticos	PJ	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2
transportes marítimos internacionais	PJ	0,0	0,0	1,6	1,6	1,6	1,6
injectado na rede de gás	PJ	0,0	0,0	8,9	3,3	18,2	24,1
em combustão na indústria	PJ	0,0	0,0	3,1	0,2	8,7	5,3
Total	PJ	**0,3**	**2,6**	**15,4**	**6,8**	**30,2**	**32,7**
Trocas com o exterior de H2 @ 2030							
Importações	PJ	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Exportações	PJ	0,0	0,0	17,1	25,7	2,3	34,5
Dependência energética [1]	%	**73**	54	52	52	52	49
Renováveis no consumo de energia final bruto [1]	%	**33**	**48**	**51**	**49**	**55**	**55**
Renováveis na “electricidade” [2]	%	**59**	90	89	88	89	85
Renováveis nos “transportes” [3]	%	**9**	20	20	20	20	20
Renováveis no “aquecimento e arrefecimento” [4]	%	**39**	**45**	**49**	**46**	**54**	**54**
Renováveis no gás da rede [5]	%	**0**	4	11	6	19	23
Consumo bruto de energia final	PJ	840	750	746	746	746	746
Consumo de energia primária [6]	PJ	1084	850	850	850	851	863
Importações [6]	PJ	1086	747	734	742	719	727
Exportações	PJ	292	284	291	299	276	307
H_2 na rede de gás		0,0	0,0	19,0	7,5	35,4	42,5
Participação do H_2 na energia primária [6]		0,0	0,3	4,5	4,5	4,5	8,6
Participação do H_2 na energia final [6]		0,0	0,4	2,3	1,2	4,3	4,6
Fração de H_2 exportada [7]		0,0	0,0	49,9	74,9	6,7	49,9

1 - âmbito nacional; no restante o âmbito é Portugal continental

2 - consumo final bruto de electricidade (a meta PNEC é 80%)

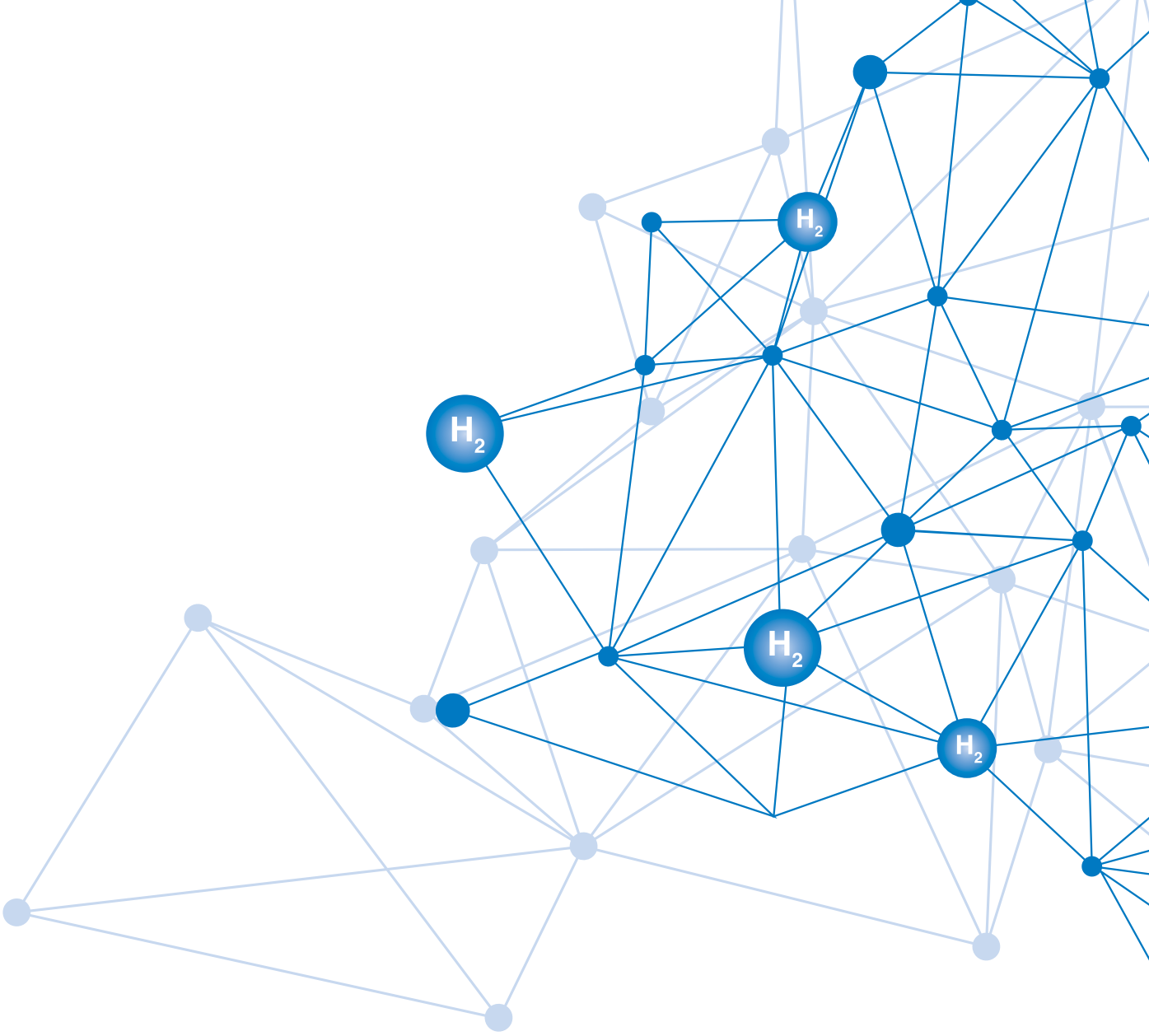
3 - transportes terrestres (a meta PNEC é 20%, sem multiplicadores da RED II)

4 - aquecimento, arrefecimento e processos; inclui combustível para máquinas, exclui electricidade e produtos não-energéticos

5 - biometano, metano sintético, e hidrogénio

6 - sem produtos não-energéticos

7 - fração de todo o hidrogénio produzido nacionalmente (electrólise e gaseificação de biomassa)



Direção-Geral de Energia e Geologia

REPÚBLICA PORTUGUESA
AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA

Cofinanciado por:

POSEUR
PROGRAMA OPERACIONAL SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA NO USO DE RECURSOS 2014 20

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA
Fundo de Coesão