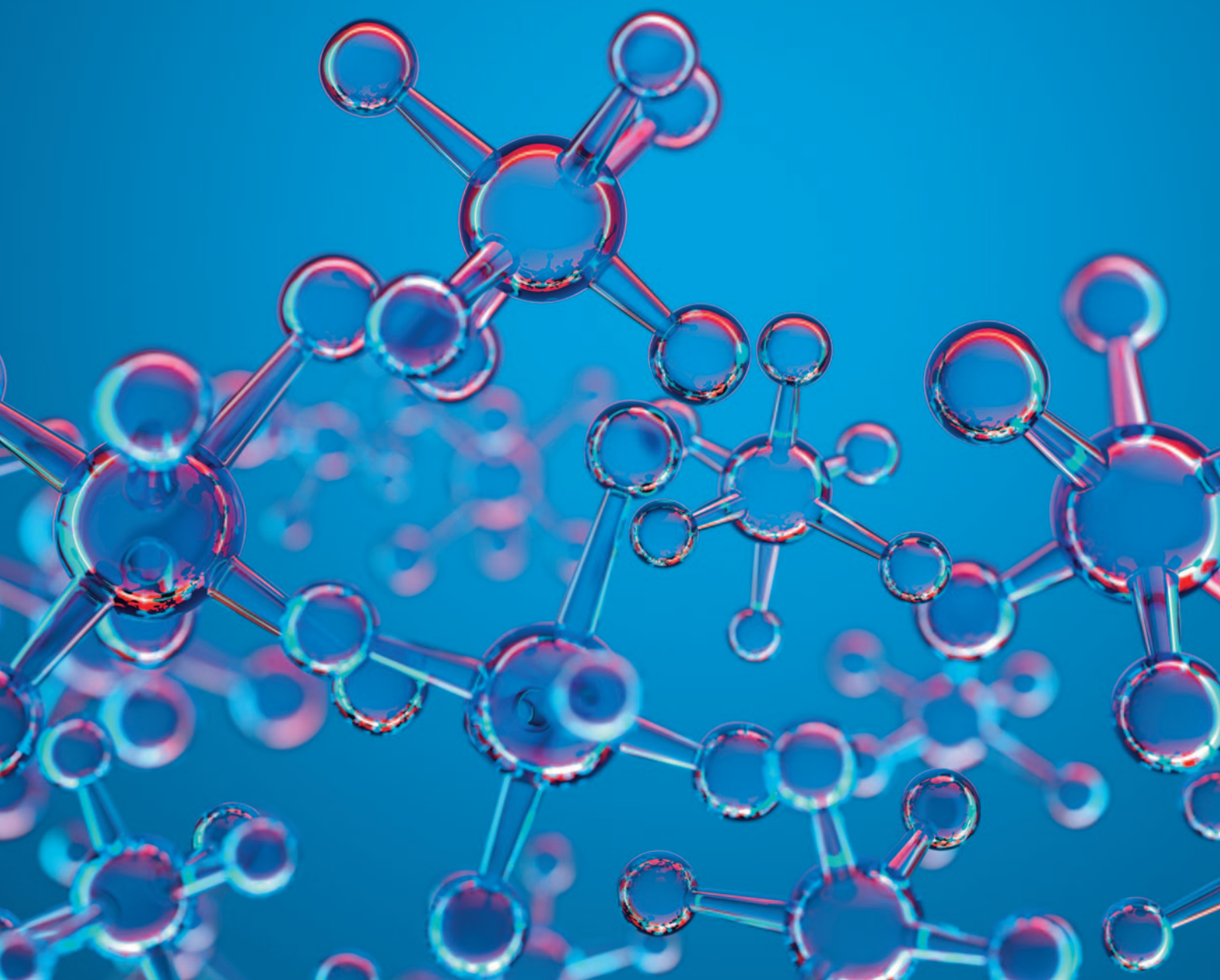


Hidrogênio

*Um vetor energético essencial na transição
para uma economia descarbonizada*



Design e diagramação

Departamento de Marketing e Comunicação
Management Solutions - Espanha

Fotografias

Arquivo fotográfico da Management Solutions
iStock
Adobe stock

© Management Solutions 2023

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução, distribuição, comunicação ao público, no todo ou em parte, gratuita ou paga, por qualquer meio ou processo, sem o prévio consentimento por escrito da Management Solutions.

O material contido nesta publicação é apenas para fins informativos. A Management Solutions não é responsável por qualquer uso que terceiros possam fazer desta informação. Este material não pode ser utilizado, exceto se autorizado pela Management Solutions.

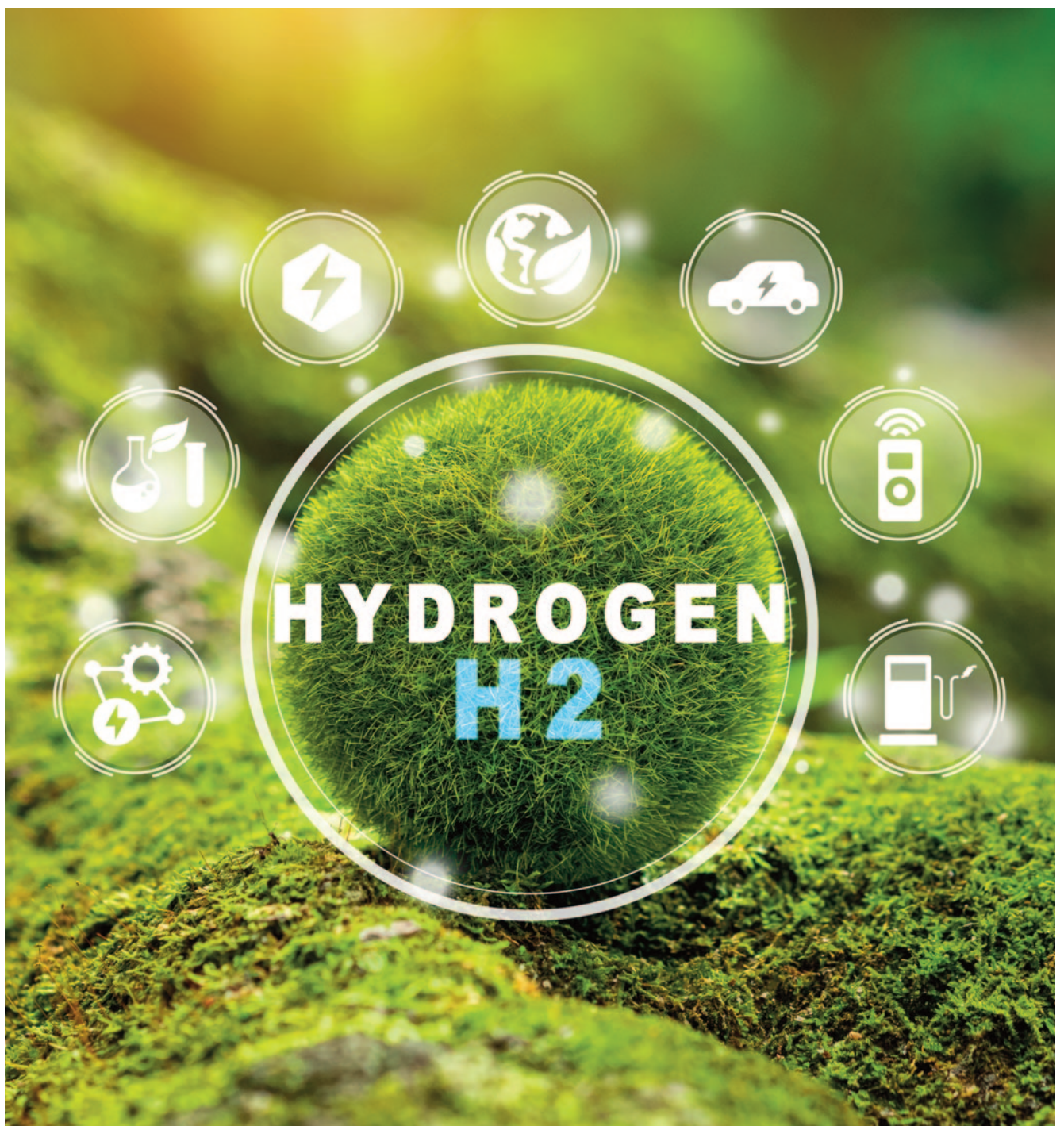
Índice

	Introdução	4
	Resumo executivo	6
	Contexto internacional	10
	Visão geral do hidrogênio	14
	Cadeia de valor	18
	Situação atual e evolução esperada do hidrogênio	26
	Principais desafios do hidrogênio	32
	Análise aplicada à viabilidade do hidrogênio: estudo de caso	44
	Conclusão	52
	Glossário	54
	Bibliografia	56

Introdução

“A energia é essencial para o desenvolvimento, e a energia sustentável é essencial para o desenvolvimento sustentáveis”

Tim Wirth¹



Nas últimas décadas, a população mundial cresceu dramaticamente. Em meados de novembro de 2022, a população chegou a 8 bilhões de habitantes, mais de três vezes o número em meados do século XX, e um quarto desse aumento ocorreu nos últimos 25 anos (11,3% somente na última década)². Esse crescimento populacional veio acompanhado por um processo de industrialização como forma de impulsionar o desenvolvimento econômico. Ambos os elementos intensificaram significativamente a demanda por energia. Especificamente, nos últimos 25 anos, o consumo total³ de energia primária⁴ cresceu 57,8% (na última década, o aumento foi de 14,4% no total, e cerca de 80%⁵ da demanda global total foi atendida por combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás natural).

Esse aumento no consumo de energia apresenta uma série de desafios que precisam ser enfrentados, entre eles a preocupação global com o impacto que a produção e o consumo de energia podem ter sobre as mudanças climáticas. De acordo com as Nações Unidas⁶, os combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, são, de longe, os que mais contribuem para o aquecimento global, sendo responsáveis por mais de 75% do total das emissões globais de gases de efeito estufa e quase 90% de todas as emissões de dióxido de carbono. Outro desafio importante a ser enfrentado é o impacto da produção e do consumo de energia no meio ambiente, decorrente dos processos de poluição do ar e da água, do uso da terra, da necessidade de grandes áreas para a instalação e operação de usinas elétricas ou da gestão de resíduos, entre outros⁷. As energias renováveis, que contribuem de forma decisiva para mitigar o impacto sobre o clima mencionado anteriormente, não estão isentas de produzir impactos ambientais (potencial uso extensivo da terra, impactos sobre a flora e a fauna, etc.).

Além disso, apresentam desafios em termos de acumulação e armazenamento da energia produzida, devido à variabilidade na produção. Por fim, a atual matriz energética representa um desafio geopolítico para os países dependentes de energia proveniente de combustíveis fósseis que não dispõem desses recursos naturais, o que pode comprometer a segurança energética⁸.

Tudo isso levou a uma exploração contínua de fontes de energia adicionais para transformar o mix energético e aumentar a eficiência energética, buscando mitigar os efeitos negativos derivados da produção, do transporte e do uso de energia. Nesse sentido, as energias renováveis (excluindo a hidrelétrica) tiveram o maior crescimento na geração de eletricidade. A produção de eletricidade a partir de energias renováveis aumentou mais de 18 vezes desde o início do século XXI e, embora nem todas as áreas geográficas tenham desfrutado do mesmo impulso (vide figura 1), globalmente elas representaram 14% da produção de eletricidade em 2022, superando a energia nuclear, que representou 9%. No entanto, o carvão e o gás ainda continuam sendo as maiores fontes de energia para a produção elétrica, respondendo por 35% e 23%, respectivamente⁹.

Nesse contexto, o hidrogênio, um gás comumente consumido em processos industriais, está se tornando muito importante

devido à sua capacidade de atuar como um vetor energético decisivo (já que pode ser usado para armazenar e transportar energia para posterior liberação). Estudos recentes¹⁰ indicam que 60% das reduções de emissões poderiam vir da geração renovável combinada com hidrogênio verde¹¹. Portanto, há um consenso sobre o papel fundamental que o hidrogênio verde pode desempenhar no acompanhamento dessa transição energética, melhorando a integração das próprias energias renováveis ou até mesmo atuando como uma solução de descarbonização em alguns setores (transporte, processos industriais etc.). O desenvolvimento do hidrogênio verde é um acelerador para o setor de hidrogênio em geral e não é incompatível com a futura adoção de outros tipos de hidrogênio, como o hidrogênio branco. A criação e a expansão da infraestrutura de transporte, o desenvolvimento do mercado, a transformação da indústria e a adaptação dos padrões de consumo em torno do hidrogênio verde não são apenas perfeitamente compatíveis com o hidrogênio branco, mas também podem convergir de forma sinérgica.

O objetivo desta publicação é fornecer uma compreensão do hidrogênio, explicando os tipos existentes, sua cadeia de valor e os principais desafios que ele apresenta, além de analisar um estudo de caso concreto para ilustrar de forma prática como é possível aproveitar as ferramentas analíticas para enfrentar alguns dos desafios do seu processo de adoção, como a seleção do local ideal para o desenvolvimento de novos projetos.

¹ Timothy Endicott Wirth, Graduado em Harvard e PhD por Stanford, serviu na Casa de Representantes e no Senado dos EUA. Subsecretário de Estado para Assuntos Globais durante a administração Clinton. Desde 1998 até 2013, foi presidente da Fundação das Nações Unidas, e atualmente é parte de sua junta diretiva.

² Fonte: Nações Unidas "2022 Revision of World Population Prospects".

³ Energy Institute: Statistical review of world energy 2022.

⁴ Energia primária: energia de fontes renováveis e não renováveis que não passou por nenhum processo de conversão ou transformação (RAE).

⁵ Fonte: U.S. EIA "International Energy Outlook 2021 (IEO2021)".

⁶ Fonte: Nações Unidas. Renewable Energy: Energy for a Safer Future. Obtido de <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>.

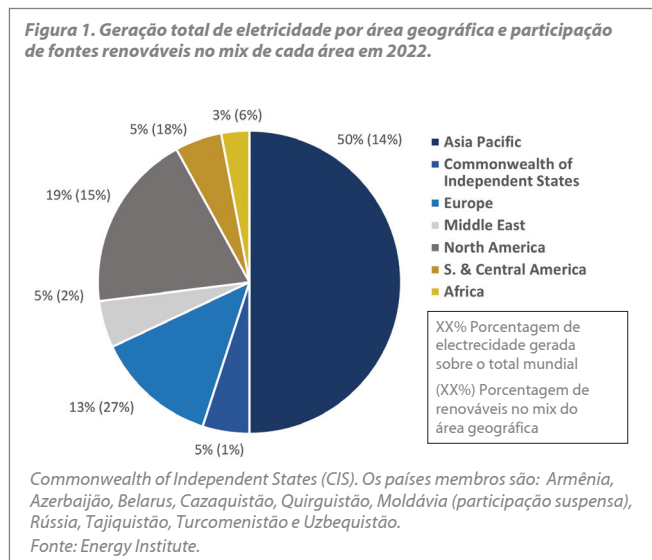
⁷ IPCC, "Relatório especial sobre o aquecimento global de 1,5°C" (2019).

⁸ De acordo com a Agência Internacional de Energia, a segurança energética é definida como a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço acessível.

⁹ Energy Institute: "Statistical Review of World Energy".

¹⁰ B.E. Lebrouhi: "Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview" (2022).

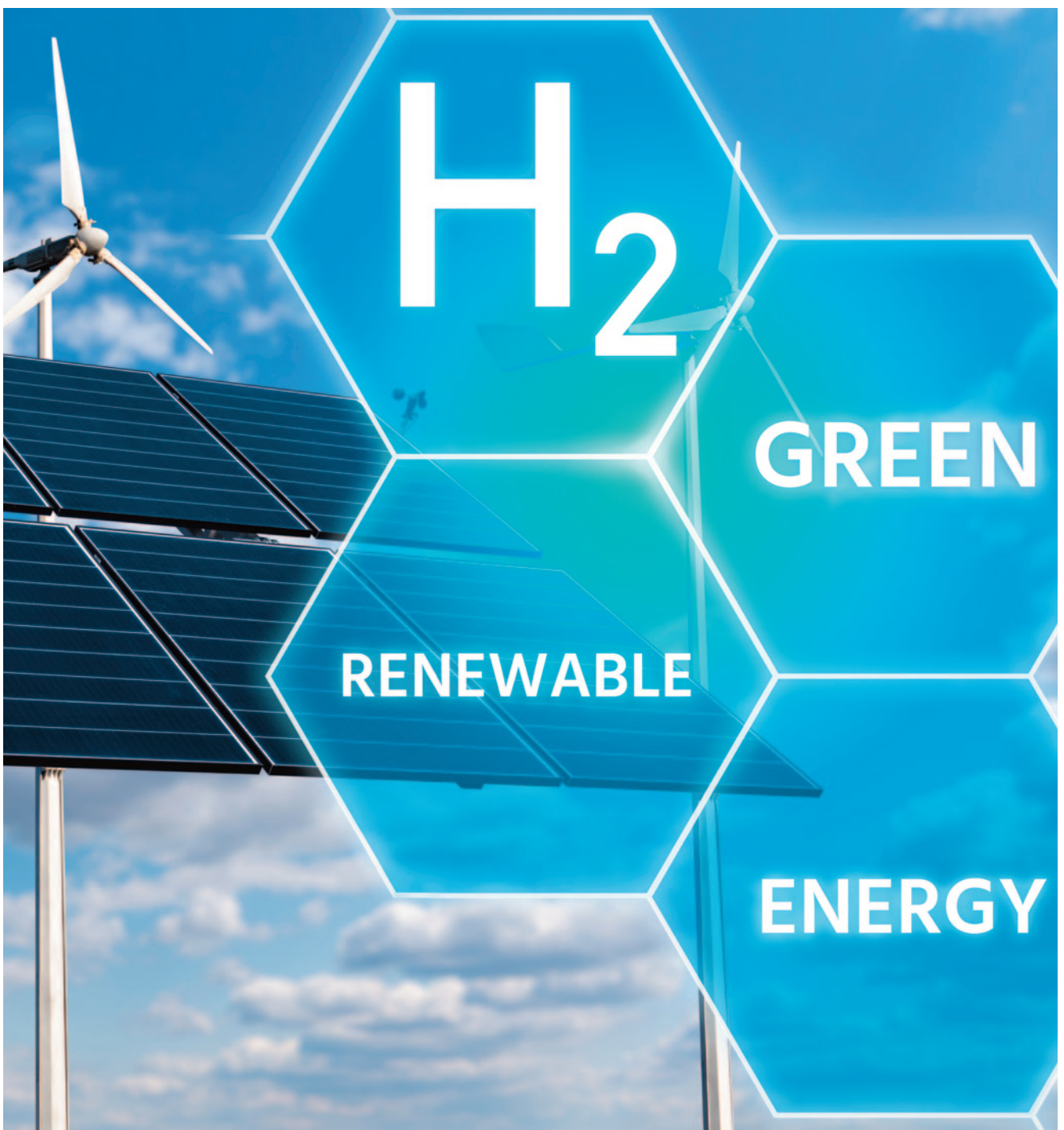
¹¹ É o hidrogênio gerado pela eletrólise da água, usando eletricidade de fontes renováveis.



Resumo executivo

“A ciência é a aproximação progressiva do homem ao mundo real”

Max Planck¹²



O hidrogênio é o elemento químico mais leve e mais abundante do universo e é um vetor energético, pois pode ser usado para armazenar e transportar energia para ser liberada posteriormente. Ele tem um alto valor calorífico (embora tenha uma densidade de energia por volume muito menor do que a de outros combustíveis), é inesgotável e pode ser combinado com outros elementos para formar uma infinidade de subprodutos.

Esse gás pode ser produzido a partir de uma variedade de fontes de energia e por diferentes métodos, dando origem a diferentes designações. Entre elas estão o hidrogênio verde (produzido principalmente por eletrólise da água e fontes de energia renováveis), o hidrogênio rosa (produzido por eletrólise, mas usando a energia nuclear como fonte de energia), o hidrogênio azul (produzido a partir de hidrocarbonetos, mas capturando e armazenando as emissões de poluentes produzidas), amarelo (produzido por eletrólise, mas usando eletricidade não renovável como fonte), turquesa (obtido por pirólise de gás natural em um reator de metal fundido), branco (presente na natureza) ou preto, cinza e marrom (gerados a partir de hidrocarbonetos).

Desses, o hidrogênio verde é o que está recebendo cada vez mais atenção (inclusive dos órgãos reguladores), pois a ausência de emissões de gases de efeito estufa durante sua produção, sua capacidade de equilibrar a variabilidade das energias renováveis, o papel que pode desempenhar na descarbonização de alguns setores e suas múltiplas aplicações fazem dele o principal catalisador no processo de transição energética para uma economia neutra em carbono. Além disso, a extração de hidrogênio branco de grandes depósitos naturais está sendo avaliada e estudada recentemente, o que poderia contribuir para o desenvolvimento do setor e posicionar o hidrogênio como uma fonte de energia, além de suas capacidades como vetor energético.

A grande maioria do hidrogênio consumido é produzida a partir de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, carvão e nafta reformada. Essas formas de produção são responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono e contribuem para o aquecimento global, portanto, há um consenso sobre a necessidade de gerar hidrogênio usando métodos que não liberem gases de efeito estufa no processo, como a eletrólise da água a partir da eletricidade produzida por energia renovável (apenas 0,1% do hidrogênio foi produzido dessa forma em 2022).

Depois de gerado, o hidrogênio deve ser armazenado e transportado até o local de consumo final, o que é um desafio por si só. O hidrogênio pode ser transportado por navio, caminhão ou duto, dependendo da distância entre o produtor e o consumidor, e em diferentes estados: gasoso, líquido, sólido (por adsorção em determinados materiais) ou em transportadores orgânicos líquidos (por exemplo, metanol, amônia).

Do lado da demanda, o hidrogênio tem uma ampla gama de aplicações, sendo os processos industriais e metalúrgicos alguns dos principais consumidores, como refino de petróleo, produção de produtos químicos (por exemplo, amônia ou metanol) ou redução de aço. No transporte, o hidrogênio é usado em veículos com células de combustível, especialmente em veículos comerciais e ônibus, embora sua aplicação em carros particulares deva crescer na próxima década. Ele também é usado para a produção de "e-fuels" (combustíveis sintéticos). Além disso, aplicações em outros setores, como energético e construção, estão sendo investigadas como uma alternativa aos combustíveis fósseis.

¹²Max Planck, físico teórico alemão, considerado o fundador da teoria quântica. Em 1901 Planck publicou a lei espectral da radiação do corpo negro. Por seus trabalhos na teoria quântica, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918.

Apesar do progresso e do crescente interesse pelo hidrogênio verde, há desafios significativos no caminho para sua adoção generalizada e sustentável. Estes desafios podem ser agrupados em várias áreas:

- ▶ **Produção de hidrogênio:** um dos principais desafios é reduzir seu custo de produção para torná-lo competitivo em relação a outras fontes de energia. O principal componente desse custo é o consumo de energia, portanto, sua redução envolve o aprimoramento da tecnologia de eletrólise e maiores economias de escala, entre outros.
- ▶ **Criação de demanda:** outro desafio é gerar demanda suficiente para o hidrogênio verde em diferentes setores, como indústria, transporte e geração de energia, para justificar os investimentos em produção e distribuição. Isso implica a necessidade de tecnologias aprimoradas de produção e armazenamento.
- ▶ **Mercado de hidrogênio:** ao contrário de outros recursos energéticos, atualmente o hidrogênio é predominantemente um gás industrial produzido e consumido no local, o que dificulta a formação de um mercado com índices de preços de referência. Entretanto, à medida que o setor se desenvolve, é de se esperar que os mercados de hidrogênio se desenvolvam, o que é essencial para incentivar o investimento e a concorrência.

- ▶ **Infraestrutura de transporte:** o desenvolvimento de uma infraestrutura adequada para o transporte de hidrogênio, seja por estrada, dutos ou outros meios, é fundamental para sua distribuição eficiente e segura. Para que isso seja possível, será necessário abordar questões técnicas, como o gerenciamento do blending na rede ou os requisitos para garantir a segurança.
- ▶ **Regulação:** os principais desafios em nível regulatório incluem a criação de marcos específicos para o hidrogênio verde, a definição técnica do que pode ser considerado hidrogênio verde ou renovável, o desenvolvimento dos incentivos financeiros e não financeiros necessários, a criação de sistemas de garantia de origem, o desenvolvimento de regulações específicas para promover o transporte de veículos com emissão zero e o uso do hidrogênio como combustível no transporte marítimo, além da evolução das regulações de transporte de gás em dutos.

Nesse contexto, as organizações enfrentam esses desafios definindo estratégias, selecionando novos projetos com base em uma análise de investimento adequada, gerenciando os riscos associados (por exemplo, transformando suas operações para implementar novos processos), adaptando-se às regulamentações e atendendo aos objetivos de sustentabilidade.





A transição das empresas para o mercado de hidrogênio exige uma abordagem holística, da estratégia às operações, que considere não apenas a viabilidade econômica, mas também o compromisso com a sustentabilidade e a conformidade com as regulamentações em evolução. Da mesma forma, o investimento em tecnologias avançadas e a colaboração com parceiros e fornecedores são essenciais para o sucesso nesse mercado.

Para resolver alguns desses desafios, é necessário contar com ferramentas específicas para melhorar a tomada de decisões. Um exemplo disso é o aplicativo desenvolvido pela Cátedra de Estudos de Hidrogênio da Universidade Pontifícia Comillas - patrocinado pela Management Solutions-, que se baseia em Sistemas de Informação Geográfica (GIS) para identificar as

localizações ideais para a construção de projetos de produção de hidrogênio renovável. O modelo calcula um índice de compatibilidade do hidrogênio que categoriza as diferentes variáveis analisadas em cada local (compatibilidade do terreno para a instalação de energias renováveis e disponibilidade de água; infraestrutura existente de eletricidade, gás e estradas; possíveis "off-takers"¹³; etc.) e determina a melhor alternativa de acordo com os critérios escolhidos.

O hidrogênio verde ou renovável emerge como um pilar essencial na transição para uma economia sustentável, mas somente por meio de esforços colaborativos, investimento em tecnologia e apoio regulatório será possível superar os desafios atuais e liberar todo o seu potencial como um vetor energético transformador.

¹³Partes interessadas ou consumidores potenciais

Contexto Internacional

“A energia renovável é o único caminho crível se o mundo quer evitar uma catástrofe climática”
António Guterres¹⁴



Nas últimas décadas, o consumo mundial de energia tem apresentado uma trajetória ascendente constante, impulsionada pelo crescimento populacional, pela industrialização e pelo aumento do nível de vida, especialmente nos países em desenvolvimento. Portanto, o consumo global de energia varia significativamente entre os países, influenciado, por sua vez, por seus níveis de industrialização e urbanização (vide Figura 2).

De 2012 a 2022, o consumo total de energia primária¹⁵ aumentou em 14,4%. Atualmente, o consumo aumentou para 442 EJ e cerca de 80%¹⁶ da demanda mundial de energia primária, necessária para indústrias, transporte e residências, é atendida por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural). Em 2022, o carvão foi responsável por cerca de 27% da matriz energética primária mundial; o petróleo, a fonte de energia mais usada, foi responsável por 32%; enquanto o gás natural, valorizado por suas propriedades de combustão mais limpas em relação ao carvão e ao petróleo, foi responsável por cerca de 23%¹⁷ (vide Figura 3).

Em termos de energia elétrica, os dados de 2022 mostram que o carvão contribuiu com cerca de 35% de sua geração, a geração de gás permaneceu em 23% - perto de sua média dos últimos 10 anos¹⁸ e as energias renováveis tiveram o maior crescimento, atingindo 14% da energia total e superando a energia nuclear, que responde por 5% do total.

A luta contra as mudanças climáticas exige a redução da dependência de combustíveis fósseis, alcançando uma sociedade neutra em carbono com base em fontes de energia sustentáveis. Globalmente, há um compromisso com as

¹⁴Antônio Guterres es o atual Secretário Geral das Nações Unidas, desde onde foi uma voz influente em temas globais, incluindo as mudanças climáticas, os direitos humanos e o desenvolvimento sustentável.

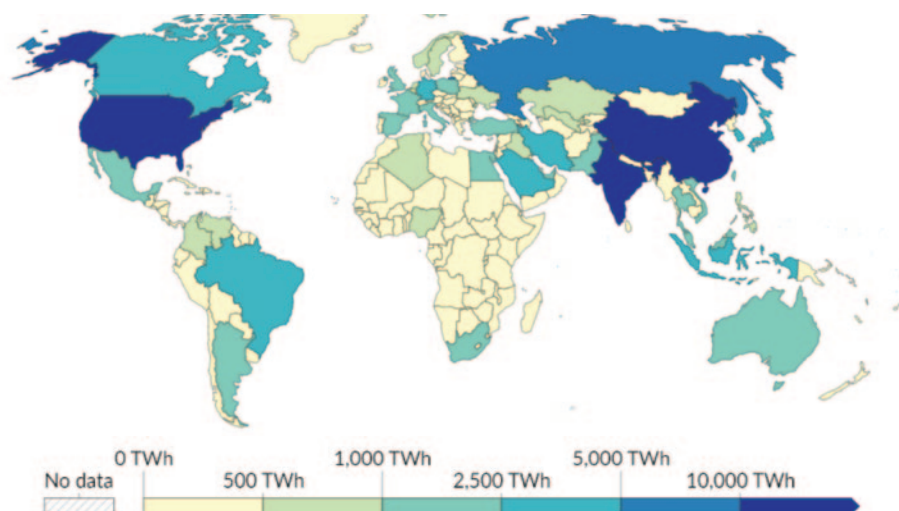
¹⁵Energia primária: energia de fontes renováveis e não renováveis que não passou por nenhum processo de conversão ou transformação (RAE).

¹⁶Fonte: U.S. EIA "International Energy Outlook 2021 (IEO2021)".

¹⁷Energy Institute: "Statistical Review of World Energy".

¹⁸Ibid.

Figura 2. Consumo mundial de energia primária em 2022.



Fonte: Our world in data, "energy production and consumption 2022".

energias renováveis como fonte para alcançar essa neutralidade, pois elas não emitem gases de efeito estufa durante a geração de eletricidade.

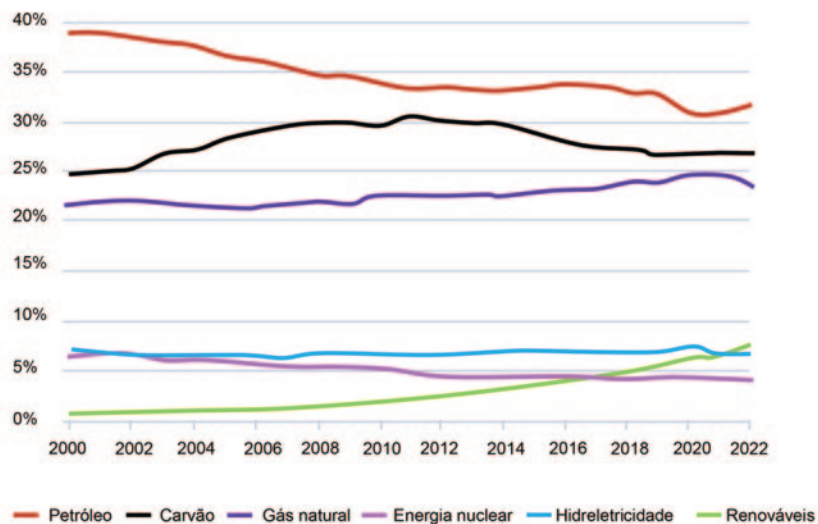
No entanto, essas fontes de energia não estão isentas de desafios, pois têm impactos ambientais (potencial uso extensivo da terra, impactos na flora e na fauna, etc.) e apresentam desafios em termos de acumulação e armazenamento da energia produzida, devido à variabilidade na geração.

Nesse contexto, o hidrogênio pode desempenhar um papel essencial na aceleração da transição para um sistema energético neutro em carbono. Ele pode ser produzido a partir de fontes de energia renováveis, armazenado de forma eficiente e pode ser usado para equilibrar a variabilidade das fontes de energia renováveis (usando o excesso de energia

para produzir hidrogênio verde por meio de eletrólise) e contribuir para aumentar sua participação no mix energético global.

Além disso, esse elemento também poderia desempenhar um papel relevante na distribuição de energia, devido às possibilidades que oferece para seu potencial de transporte e transformação nos setores em que a eletrificação apresenta mais desvantagens e limitações.

Figura 3. Consumo mundial de energia primária.



Fonte: Energy Institute. "Statistical Review of World Energy 2023."



Visão geral do hidrogênio

“Reconhecemos que o hidrogênio renovável e de baixo carbono [...] deve ser desenvolvido e usado onde tiver impacto como uma ferramenta eficaz de redução de emissões para promover a descarbonização de todos os setores e indústrias”

Declaración G7 2023¹⁹



O que é H₂?

O hidrogênio (H₂) é o elemento químico mais leve e a substância mais abundante no universo (75% é H₂)²⁰. Ele tem as propriedades de um vetor energético, ou seja, pode ser usado para armazenar e transportar energia para ser liberada posteriormente. Além disso, no caso do hidrogênio, essa liberação de energia é realizada sem a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, ao contrário dos combustíveis fósseis. Essa propriedade, juntamente com o fato de que seu uso pode ser estendido a uma infinidade de aplicações industriais e comerciais, faz dele um elemento essencial na transição energética para um ecossistema mais sustentável.

As propriedades mais marcantes que dão ao hidrogênio o potencial de ser um fator de transformação do modelo energético atual são as seguintes:

- ▶ **Alto poder calorífico e baixa densidade energética por volume.** O hidrogênio tem um alto poder calorífico (a energia de 1 quilograma de gás de hidrogênio é aproximadamente a mesma de 2,8 quilogramas de gasolina), mas, por ser um gás leve e ocupar muito volume em sua forma natural, tem uma densidade energética por volume muito menor do que a de outros combustíveis (vide LH₂ e CH₂ na Figura 4). Isso significa que, dependendo da aplicação, ele não é necessariamente a opção mais eficiente em termos de energia²¹, pois, embora um motor elétrico alimentado por uma célula de combustível de hidrogênio seja de duas a três vezes mais eficiente do que um motor de combustão interna a gasolina²², quando se consideram as transformações anteriores necessárias para produzir o hidrogênio (por exemplo, o processo de eletrólise com uma eficiência de cerca de 60%) ou em comparação com a mobilidade elétrica, que tem eficiências de cerca de 90% para carros com baterias, sua eficiência não é um fator decisivo.
- ▶ **Inesgotável.** Ele se encontra armazenado na água, em hidrocarbonetos (como o metano -CH₄ -) e em outras matérias orgânicas, portanto, a priori, o hidrogênio pode ser considerado inesgotável.

- ▶ **Armazenável.** Diferentemente de outras formas de energia, ela pode ser armazenada e transportada de várias maneiras (transporte de hidrodutos, transporte marítimo, transporte terrestre etc.).
- ▶ **Flexibilidade de produção.** Ele pode ser produzido a partir de diferentes fontes e em diferentes partes do mundo, adaptando-se à disponibilidade de energia renovável em cada região.

¹⁹ G7 Ministers meeting on Climate, Energy and Environment in Sapporo, Japan April 15, 2023.

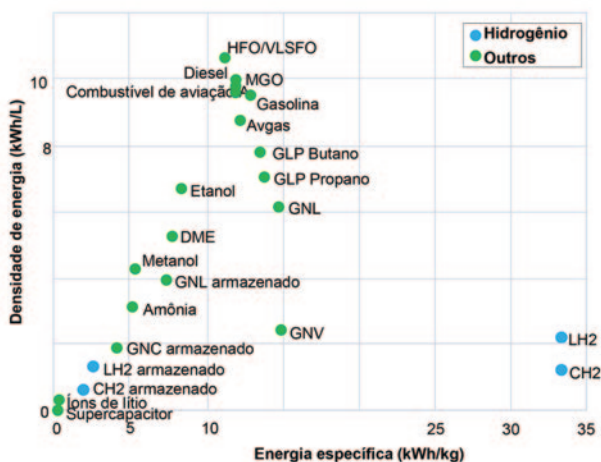
²⁰ PNA – CSIC: “A origem dos primeiros elementos químicos”.

²¹ National Renewable Energy Laboratory. “National Renewable Energy Laboratory” (2020).

²² US Department of Energy, “Hydrogen Basics” (2022).

²³ IRENA: International Renewable Energy Agency.

Figura 4. Densidade energética e energia específica de diversos combustíveis e sistemas de armazenamento de energia.



Notas: Avgas = gasolina de aviação; CH₂ = hidrogênio comprimido a 70 Mpa; CNG = gás natural comprimido a 25 Mpa; DME = éter dimetilico; HFO/VLSFO = óleo combustível pesado/óleo combustível com baixíssimo teor de enxofre; LH₂ = hidrogênio liquefeito; Li-ion = íons de lítio Bateria; GNL = gás natural liquefeito; GLP = gás liquefeito de petróleo; GNC armazenado = tanque Tipo IV a 250 bar; CH₂ armazenado = melhores tanques de CH₂ disponíveis a 70 Mpa; LH₂ armazenado = tanques de bordo de LH₂ atuais de pequena escala; GNL armazenado = tanques de bordo de pequena escala Armazenamento em condições criogênicas; MGO = gásóleo marítimo. Os números são expressos em uma base de menor valor de aquecimento (LHV). O peso do equipamento de armazenamento está incluído.

Fonte: IRENA²³. “Hydrogen Overview” (2022).

- ▶ **Versatilidade de conversão em derivados.** Ele pode ser combinado com outros elementos para formar vários produtos derivados (como hidrocarbonetos, amônia, metanol e combustíveis sintéticos etc.), com maior densidade por unidade de volume do que o gás e, portanto, maior eficiência, por exemplo, para fins de transporte.

Além das propriedades acima, se o hidrogênio for produzido sem emissão de gases de efeito estufa, ele é considerado um combustível limpo. Isso ocorre, por exemplo, no caso da produção por eletrólise da água de fontes renováveis, com a emissão de oxigênio como subproduto do processo e, em seguida, de vapor de água durante a combustão. Deve-se observar que o hidrogênio produzido a partir de outras fontes de energia não renováveis também é considerado hidrogênio limpo, mas quando a emissão de CO₂ no processo de produção é controlada e não ultrapassa os limites estabelecidos, o que dependerá do país e de sua legislação.

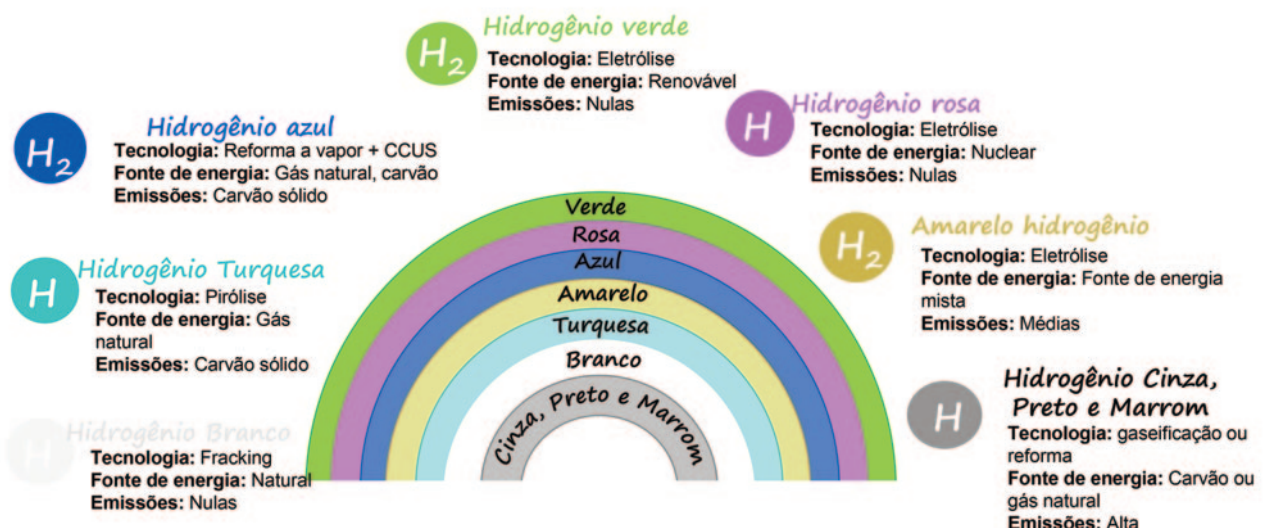
Que tipos de H₂ existem?

No planeta, o hidrogênio é encontrado combinado com outros elementos, como o carbono, formando compostos orgânicos, ou o oxigênio, formando moléculas de água. Para separar o hidrogênio do elemento que o acompanha, é necessário submeter os compostos a processos específicos. Dependendo do processo e da energia utilizada no processo, o hidrogênio é chamado por diferentes nomes (vide figura 5):

- ▶ **Verde.** Esse é o hidrogênio gerado pela eletrólise da água, usando eletricidade de fontes renováveis (hidrogênio renovável). O hidrogênio gerado pela reforma do gás natural, mas substituindo-o por biometano, e o hidrogênio gerado por métodos baseados em fotocatalise e fotoeletrocatalise em que o recurso energético é renovável e não há emissão de CO também são considerados verdes.
- ▶ **Rosa.** Ele é chamado de rosa quando é obtido por eletrólise, mas a fonte de energia usada para produzir a eletricidade é a energia nuclear. Ela é considerada limpa devido às baixas emissões de carbono em sua produção.
- ▶ **Azul.** Esse hidrogênio também é obtido a partir de hidrocarbonetos, mas, nesse caso, as emissões de poluentes são capturadas e armazenadas usando tecnologias CCUS²⁴. Isso possibilita a produção de hidrogênio com baixo teor de carbono, que é considerado hidrogênio limpo.
- ▶ **Amarelo.** Nesse caso, o método de produção de hidrogênio também é a eletrólise, mas a fonte de eletricidade usada é mista (não totalmente renovável).
- ▶ **Turquesa.** O hidrogênio é gerado por meio da pirólise de um metal fundido, passando gás natural por ele, liberando hidrogênio e carbono em estado sólido.

²⁴Carbon capture, utilization and storage (CCUS).

Tipos de hidrogênio por método de produção, fonte de energia e emissões.



Fonte: Técnicas Reunidas "Presente e futuro do hidrogênio".

- ▶ **Branco.** O hidrogênio encontrado na natureza, geralmente encontrado em depósitos subterrâneos, e portanto considerado renovável, é chamado de branco .
- ▶ **Preto, cinza e marrom.** É obtido a partir de hidrocarbonetos (metano, carvão, etc.), por meio de técnicas de reforma a vapor, oxidação parcial e reforma autotérmica; ou gaseificação do combustível fóssil, separando assim a ligação de carbono e hidrogênio.

Entre todas as formas de produção de hidrogênio, é o hidrogênio verde que está recebendo o maior impulso regulatório, pois a ausência de emissões de gases de efeito estufa durante sua produção o torna o principal catalisador no processo de transição energética para uma economia neutra em carbono.

²⁵Earth-Science Reviews. "The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review" (2020).



Consideração do hidrogênio como renovável

Para impulsionar o papel do hidrogênio, os diferentes órgãos reguladores estão definindo as premissas sob as quais o hidrogênio pode ser considerado verde ou renovável . A título de exemplo, a União Europeia considera o hidrogênio renovável se ele atender às seguintes características:

- Os combustíveis líquidos e gasosos de origem não biológica que são produzidos a partir da eletricidade são considerados renováveis somente quando a eletricidade usada em sua geração provém de fontes renováveis.
- Essa eletricidade renovável pode ser fornecida de duas maneiras: (i) conexão direta a uma usina de produção renovável (eólica, fotovoltaica etc.) ou (ii) eletricidade retirada da rede como totalmente renovável.
 - (i.a) "As instalações de geração de eletricidade renovável devem ter sido comissionadas menos de 36 meses antes da entrada em operação da usina que gera combustíveis líquidos e gasosos de origem não biológica".
 - (i.b) "Se a instalação que produz eletricidade renovável estiver conectada à rede, com exceção da usina que gera combustíveis líquidos e gasosos de origem não biológica, é preciso demonstrar que nenhuma eletricidade proveniente da rede é usada por meio de um sistema de medição inteligente".
 - (ii.a) "A eletricidade será considerada totalmente renovável se a instalação que produz o combustível líquido e gasoso de origem não biológica estiver localizada em uma zona de leilão em que a produção média de eletricidade renovável seja superior a 90% no ano civil anterior e a produção de combustível líquido e gasoso de origem não biológica não exceda um número máximo de horas em relação à produção de eletricidade renovável na zona de leilão".
 - (ii.b) "Nas zonas de leilão em que a produção média de eletricidade renovável representa a parcela dominante, mas menos de 90%, a eletricidade usada deve ser considerada totalmente renovável, desde que as horas de produção de combustível líquido e gasoso de origem não biológica não excedam a parcela de eletricidade renovável gerada na zona de leilão".
 - (ii.c) "Se as condições acima não forem atendidas, a eletricidade será considerada totalmente renovável se for originária de uma área de leilão onde a intensidade de emissão for menor que (18 g [CO₂] eq.) / MJ desde que a seguinte condição seja atendida:

Há um ou mais contratos de compra de energia renovável justificados por um PPA (Power Purchase Agreement) em uma ou mais instalações de geração renovável para uma quantidade de eletricidade equivalente àquela declarada como totalmente renovável na produção de combustível líquido e gasoso de origem não biológica".

Além disso, a estratégia de hidrogênio da Comissão Europeia define o hidrogênio renovável como o hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água impulsionada pela eletricidade de fontes renováveis ou também por meio da reforma do biogás ou da conversão bioquímica da biomassa. Na legislação da UE, o hidrogênio renovável e os combustíveis derivados do hidrogênio produzidos sem o uso de biomassa são chamados de combustíveis renováveis de origem não biológica (RFNBO).

¹European Commission. "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023).

²PPA: um contrato de compra e venda de energia limpa de longo prazo, baseado em ativos e com preço fixo, entre um desenvolvedor de energia renovável e um consumidor.

Cadeia de valor

“Se você não consegue descrever o que está fazendo como um processo, você não sabe o que está fazendo”
W. Edwards Deming²⁶



A cadeia de valor do hidrogênio envolve um grande número de agentes ao longo de seus três estágios (produção, transporte e armazenamento e consumo), embora alguns deles possam estar integrados verticalmente em várias partes da cadeia. A Figura 6 resume os principais estágios da cadeia.

Produção

O hidrogênio pode ser extraído da água ou de combustíveis fósseis. Esses últimos são usados em 95% da produção atual²⁶ de hidrogênio e são responsáveis pelas emissões de CO₂ no processo. Conforme descrito na seção 4.2, há diferentes origens de acordo com seu modo de produção:

a) Hidrogênio de combustíveis fósseis.

O hidrogênio obtido de combustíveis fósseis vem principalmente do gás natural, seguido pelo petróleo e pelo carvão. As vias de produção termoquímica mais comuns são a reforma (a vapor, oxidação parcial e reforma autotérmica) e a gaseificação, métodos pelos quais se obtém o hidrogênio cinza, que pode se tornar azul se as emissões de carbono forem capturadas no processo (CCUS).

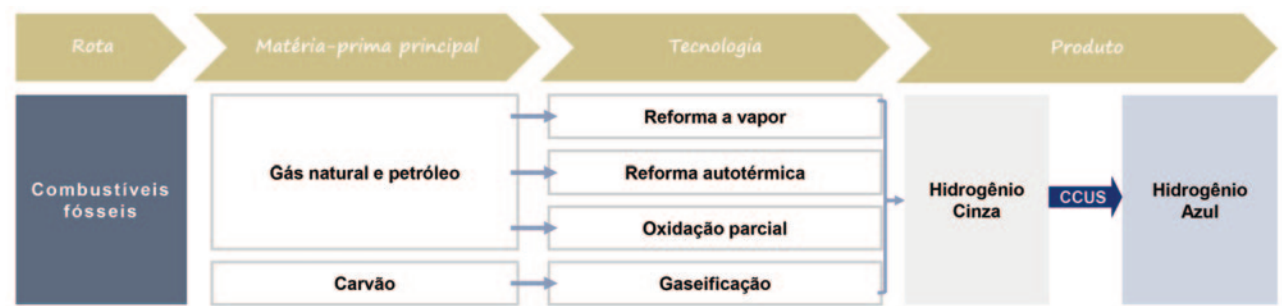
²⁶W. Edwards Deming é um estatístico americano que revolucionou o setor de manufatura, famoso por seus 14 pontos de gerenciamento e pelo ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Verificar, Agir), que se concentrou na melhoria contínua dos processos para aumentar a qualidade e reduzir os custos.

²⁷IRENA, "Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor" (2022).

Figura 6. Cadeia de valor do hidrogênio diferenciada em três estágios: produção, transporte e armazenamento, e consumo/aplicação.

	Produção	Transporte e armazenamento	Consumo/aplicação
Fase	<p>Métodos convencionais</p>  <p>Eletrólise</p> 	<p>Caminhões/ Navios</p>  <p>Hidrodutos</p>  <p>Armazém</p> 	<p>Mobilidade</p>  <p>Setor</p>  <p>Injeção na rede</p> 
Descrição	Produção de hidrogênio por métodos convencionais ou por eletrólise.	Transporte por caminhão-tanque e tubulação para centros de distribuição (usinas hidrelétricas) ou para redes de baixa pressão para distribuição aos clientes finais (por exemplo, indústrias).	Consumo por clientes finais: mobilidade, indústria, injeção na rede de distribuição, etc.
Atores	<ul style="list-style-type: none"> Fabricantes de tecnologia. Utilidades. Petróleo e gás. Outros setores (por exemplo, fornecedores de gás). 	<ul style="list-style-type: none"> Gestores de sistemas técnicos. Distribuidores. etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Comercializadoras. Consumidores: indústria pesada, automotiva, mobilidade e outros setores Certificadores de origem, etc.
	<ul style="list-style-type: none"> Instituições financeiras, companhias de seguros e órgãos reguladores (UE, administrações públicas, etc.), etc. 		

Figura 7. Vias de produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis.



Fonte: Elaboração própria.

b) Hidrogênio de fontes renováveis.

Hidrogênio eletrolítico.

A outra principal via de produção de hidrogênio é a eletrólise da água; uma tecnologia eletroquímica que envolve a decomposição da água em seus elementos constituintes, hidrogênio e oxigênio, por meio da passagem de uma corrente elétrica por um eletrolisador. Esse processo é realizado sem a emissão de gases de efeito estufa (GEE), desde que possa ser integrado a fontes renováveis que forneçam a energia necessária para dividir a molécula de água. A produção de hidrogênio por eletrólise é muito mais cara do ponto de vista tecnológico e econômico do que os processos termoquímicos baseados em combustíveis fósseis, e há espaço para melhorias nas tecnologias usadas para torná-las mais eficientes. As tecnologias de eletrolisador mais usadas até o momento são:

- ▶ Eletrólise alcalina (Alkaline Electrolysis, AE). Elas são caracterizadas pelo uso de uma solução alcalina como eletrólito.
- ▶ Eletrólise de membrana de troca de prótons (Proton Exchange Membrane, PEM). Elas usam uma membrana de polímero para separar os íons de hidrogênio e oxigênio durante a eletrólise.
- ▶ Célula de eletrólise de óxido sólido (Solid Oxide Electrolysis, SOEC). Elas usam um eletrólito de cerâmica sólida para eletrólise com entrada de alta temperatura.



Figura 8. Via de produção de hidrogênio a partir de recursos renováveis.



Fonte: Elaboração própria.

Hidrogênio a partir de biomassa.

A conversão de biomassa em hidrogênio é classificada em duas via principais: produção de hidrogênio por processos termoquímicos (pirólise e gaseificação) e por conversões biológicas (fermentação e biofotólise).

- ▶ Processos termoquímicos: um dos métodos mais comuns é a pirólise, que permite a geração de gás hidrogênio puro a partir da biomassa, aquecendo-a na ausência de ar. Por outro lado, o hidrogênio também pode ser produzido pela gaseificação da biomassa por meio da oxidação parcial em altas temperaturas.
- ▶ Conversões bioquímicas: todos esses processos são considerados de emissão zero e, portanto, o produto final é o hidrogênio verde. Entre as conversões biológicas, as mais relevantes são a fermentação de biomassa e a biofotólise.

A intervenção de diferentes agentes é de especial relevância na etapa de produção:

- ▶ Desenvolvedores de tecnologia: agentes envolvidos na pesquisa e no aprimoramento da tecnologia existente, reduzindo os custos ou melhorando o desempenho, como institutos de pesquisa ou departamentos de P&D.
- ▶ Fabricantes de tecnologia: principais desenvolvedores de eletrolisadores, componentes para parques eólicos e solares fotovoltaicos, fabricantes de compressores, etc.
- ▶ Fornecedores de matéria-prima: a curto e médio prazo, são necessários fornecedores que forneçam os recursos necessários para a produção de hidrogênio (não verde); essas matérias-primas incluem metano, carvão, compostos inorgânicos ou enzimas. No longo prazo, no entanto, espera-se que o hidrogênio seja principalmente verde, portanto, não haverá necessidade de fornecimento dessas matérias-primas.

Figura 9. Tecnologias de eletrólise de hidrogênio.

	AE	EMP	SOEC
	A eletrólise alcalina é a mais madura, eficiente e tem o menor CAPEX das tecnologias de eletrólise existentes, o que a torna perfeita para demandas grandes e contínuas de hidrogênio. No entanto, ela tem pouco espaço para melhorias.	A tecnologia de membrana tem um grande potencial de desenvolvimento graças às sinergias com as células de combustível PEM . Sua resposta rápida às mudanças de carga permite que ela forneça serviços de rede e se adapte às variações de preço da energia renovável.	Os eletrolisadores (SOECs) são a tecnologia de eletrólise mais promissora devido à sua alta eficiência energética e à sua capacidade de operar em modo reverso, como as células de combustível . A vida útil e o alto CAPEX são o principal obstáculo para o aumento da escala comercial da tecnologia.
Eletrólito	KOH ou NaOH	Membrana polimérica	Membrana de óxido metálico
Eletrodo	Aço níquelado	Platina ou irídio	Níquel, LSM-YSZ
Temperatura	70-90 °C	80-100 °C	650-1000°C
Vida útil	60000 -90000 h	30000-90000h	10000-30000 h
Eficiência (%)	63-70 %	56-60 %	74-81%
CAPEX (€/kW_e)	445 - 1190 €/kW _e	980 - 1600 €/kW _e	2500 - 5000 €/kW _e
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Escala comercial. • Alta durabilidade. • Baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eletrólito sólido. • Capacidade de operar como uma célula de combustível. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eletrólito sólido. • Alta eficiência. • Capacidade de operar como célula combustível.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Eletrólito corrosivo. • Requer o estágio de purificação do hidrogênio produzido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos custos associados ao eletrodo e à membrana. • Alta necessidade de água. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de altos investimentos (CAPEX). • Vida útil curta.

Fonte: Elaboração própria.



- ▶ Empresas de serviços públicos e de petróleo e gás: grandes empresas estão se posicionando no mercado de hidrogênio para impulsionar sua transição energética, conforme declarado em seus planos estratégicos.

Transporte e armazenamento

O transporte de hidrogênio representa um grande desafio nos próximos anos, pois o método de conexão entre o produtor e o consumidor pode variar dependendo da distância de transporte e do uso final pretendido. Existem várias opções de transporte, como o transporte por dutos e o transporte na forma líquida ou gasosa por meio de navios ou caminhões-tanque. A escolha da opção mais adequada dependerá das circunstâncias específicas de cada caso.

O hidrogênio pode ser armazenado de diferentes maneiras: no estado gasoso ou líquido, em sólidos ou em portadores orgânicos líquidos. A seguir cada uma destas formas de armazenamento é analisada.

Armazenamento em estado gasoso ou líquido

O hidrogênio pode ser armazenado fisicamente em dois estados diferentes: gasoso e líquido. No armazenamento gasoso, dada a baixa densidade do hidrogênio, ele deve ser comprimido e armazenado em tanques de pressão muito alta. Se for necessário armazenar grandes volumes, podem ser usadas cavernas de sal, campos de gás natural recondicionados ou aquíferos. Por outro lado, o armazenamento líquido exige que o hidrogênio passe primeiro por um processo de liquefação a -253°C .

Armazenamento em sólidos

Outra forma de armazenar o hidrogênio é por meio de compostos intermediários, como hidretos metálicos, através de processos químicos reversíveis. Nesses processos, o hidrogênio é absorvido por um metal por meio da entrada de calor e, posteriormente, liberado pela redução da pressão do hidreto metálico abaixo da pressão de equilíbrio^{28,29}. O armazenamento sólido oferece maior densidade e menor risco de vazamento, embora ainda esteja em desenvolvimento e exija processos químicos adicionais.

Armazenamento em portadores orgânicos líquidos

Por fim, outra maneira de armazenar hidrogênio temporariamente é por meio de portadores de hidrogênio orgânico líquido, formados a partir de hidrogênio e outro composto. Ambos geram uma terceira substância que é armazenada e transportada. Quando o hidrogênio é liberado, a reação química é revertida e tanto o hidrogênio quanto o composto inicial são recuperados. Esse tipo de armazenamento oferece uma solução para a instabilidade do hidrogênio e seu transporte, mas envolve a necessidade de inversão química para recuperar o hidrogênio e pode ser menos eficiente em termos de energia.

De especial relevância na fase de transporte e armazenamento é o envolvimento de diferentes agentes, como distribuidores de hidrogênio, transportadores e gestores técnicos.

²⁸Pressão na qual as taxas de reação de formação e decomposição do composto são iguais.

²⁹NATURGY. "Hidrogênio: Vetor energético de uma economia descarbonizada" (2020).

Mecanismos de transporte de hidrogênio

Dutos

Uma das formas mais comuns de transmissão é o uso da rede de transporte de gás natural. Atualmente, a rede de transmissão tem 1,2 milhão de km instalados em todo o mundo, com mais 200.000 km em construção ou em fase de licitação. Para reutilizar essas instalações, o sistema de dutos existente precisaria ser reconfigurado para acomodar o novo gás. Estima-se que o custo dessa adaptação seja de 50% a 80% menor do que o custo de instalação de uma nova rede de fornecimento de hidrogênio. No curto prazo, existe a opção de blending como alternativa até que os dutos estejam totalmente adaptados. Esse método consiste na introdução de uma baixa porcentagem de hidrogênio na rede de gás, juntamente com o gás natural. No entanto, o blending apresenta vários desafios, como a incompatibilidade de materiais na rede, os requisitos de segurança (o hidrogênio é altamente inflamável e explosivo), a necessidade de sistemas de garantia de qualidade do hidrogênio e a pressão de transporte diferente dos dois gases. Nesse contexto, algumas iniciativas estão trabalhando para atualizar as redes de transmissão de gás para permitir seu uso para o hidrogênio, como a iniciativa HyReady ou o European Hydrogen Backbone (EHB).

Um dos principais problemas do blending de hidrogênio e gás natural é que, devido à sua menor densidade, o hidrogênio exige uma pressão de transporte maior. Para obter uma mistura adequada de ambos os gases na rede de transporte, pode ser necessário aumentar a pressão do gás na rede ou reduzir a pressão do hidrogênio antes da mistura. Normalmente, o gás natural é transportado a pressões entre 5 e 100 bar, enquanto pressões mais altas são usadas para o hidrogênio. Essa diferença pode levar, entre outras coisas, ao aparecimento de bolsas de hidrogênio durante o processo de injeção e à não integração adequada com o gás natural.

Outras alternativas poderiam ser o denominado repurposing (adaptar a rede de gás natural existente às condições do hidrogênio e substituí-lo por gás natural) ou a construção de hidrodutos greenfield em paralelo à rede existente, usando terras e direitos de passagem disponíveis (consulte a seção "Infraestrutura de transporte de hidrogênio").

Navio

Esse meio de transporte é destinado a longas distâncias, pois é mais caro do que o transporte por hidrodutos. O estado em que o hidrogênio é transportado varia de acordo com o tipo de armazenamento e o uso pretendido, e pode ser líquido, na forma de amônia ou como um portador orgânico. O transporte de hidrogênio líquido é semelhante ao transporte de gás natural liquefeito, exceto pelo fato de que o ponto de ebulição do hidrogênio líquido é consideravelmente menor (-253°C para o hidrogênio em comparação com -162°C para o gás natural). Portanto, para conseguir o resfriamento do hidrogênio gasoso a temperaturas tão

baixas, é necessária uma grande quantidade de energia. A principal vantagem de transportar o hidrogênio nesse estado é que se obtém uma pureza maior do hidrogênio para consumo, o que é necessário para algumas aplicações.

Com relação ao transporte na forma de amônia, a experiência e a infraestrutura existentes para a produção de fertilizantes poderiam ser usadas, reduzindo assim a necessidade de investimentos adicionais.

Por fim, o hidrogênio também poderia ser transportado absorvido em compostos orgânicos, chamados de transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHC em sua sigla em inglês). Essas substâncias não requerem refrigeração e, devido às suas propriedades físicas, podem ser armazenadas em navios petroleiros.

A figura 10 mostra os valores numéricos que representam a quantidade percentual de energia subtraída do hidrogênio em função do transporte usado, ao longo da cadeia de suprimentos, supondo que, em cada estágio do transporte, as necessidades de energia sejam atendidas pelo próprio hidrogênio ou por um combustível derivado do hidrogênio.

Caminhão

Devido ao seu alto custo, os caminhões são normalmente usados para distâncias curtas e sempre que um sistema de hidroduto não estiver disponível. O hidrogênio comprimido ou líquido é transportado em contêineres especiais.

Figura 10. Energia disponível ao longo da cadeia de conversão e transporte em termos de equivalente de hidrogênio.

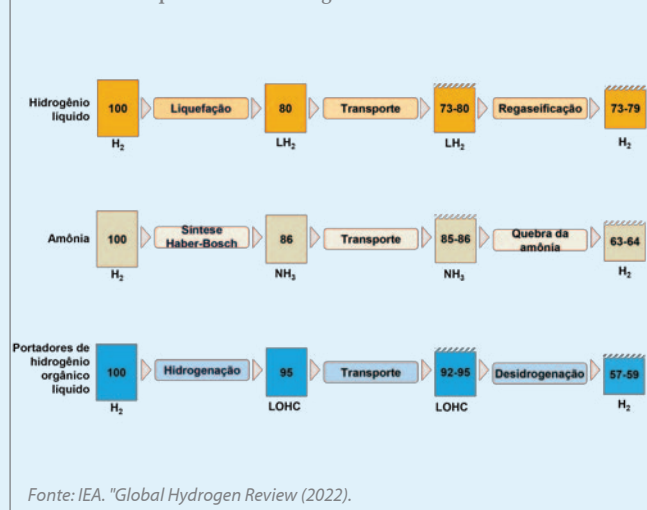
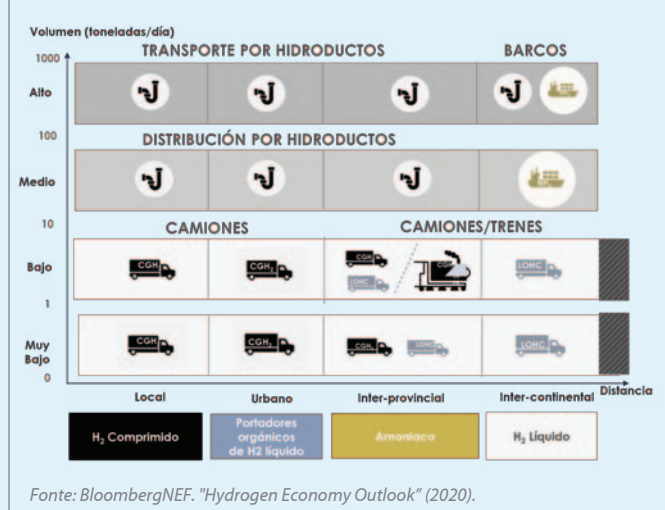


Figura 11. Comparação dos diferentes tipos de transporte de hidrogênio de acordo com o volume e a distância.



Comercialização (Consumo/Aplicação)

O hidrogênio tem várias aplicações, principalmente em quatro áreas principais: Indústria, Transporte, Energia e Outros âmbitos.

Aplicação na indústria.

Atualmente, o maior setor consumidor de hidrogênio é a indústria. As três principais indústrias consumidoras de hidrogênio são o de refino de petróleo, a indústria química (e, em especial, a de produção de amônia e metanol) e a indústria metalúrgica. Praticamente todo esse hidrogênio é cinza, embora possa ser substituído por hidrogênio verde proveniente de recursos renováveis. Além disso, o uso do hidrogênio como substituto dos combustíveis fósseis em aplicações industriais de alta temperatura também está sendo avaliado.

Aplicativo de transporte.

No transporte, o hidrogênio tem duas linhas principais de desenvolvimento tecnológico: (i) o uso direto como fonte de energia em veículos com células de combustível e (ii) a fabricação de combustíveis renováveis (RFNBO - Renewable Fuel of Non-Biological Origin) ou "e-fuels" com emissões líquidas zero, para substituir a gasolina ou o diesel comum.

Atualmente, os veículos rodoviários considerados como transporte pesado são a principal fonte de demanda de hidrogênio no transporte. A maior parte é consumida em caminhões e ônibus devido à alta quilometragem anual, ao peso elevado e à necessidade de autonomia em comparação com os carros elétricos com célula de combustível. Ele também é apresentado como uma solução para o transporte ferroviário,

permitindo a descarbonização de linhas a diesel quando a eletrificação é difícil e as distâncias são muito longas para serem cobertas por trens elétricos a bateria³⁰. Além disso, há um interesse crescente no uso de hidrogênio e de combustíveis sintéticos derivados do hidrogênio nos setores marítimo e de aviação, embora essas sejam tecnologias menos maduras do que as mencionadas acima.

Aplicação em Energia

As energias renováveis precisam de geração complementar para manter a estabilidade da rede. Os ativos de geração convencionais, como as usinas de turbina a gás, são fundamentais para equilibrar a oferta e a demanda. Embora atualmente sejam necessárias, elas estão sendo consideradas para eliminação em um futuro sistema de energia livre de carbono. Isso abre uma oportunidade para incluir o hidrogênio e outros combustíveis de baixo carbono na geração de energia, pois eles podem ser usados para equilibrar essa variabilidade³¹. Isso implica a possibilidade de produzir e armazenar hidrogênio durante períodos de excedente de produção de energia renovável para uso posterior em períodos de alta demanda de energia. Entretanto, deve-se observar que a eficiência desse tipo de armazenamento dependerá diretamente da tecnologia do eletrolisador. Nesse caso, haverá duas maneiras de equilibrar a variabilidade renovável:

- ▶ Power to Power: o excedente renovável é usado para produzir H₂ por meio de eletrolisadores, que é armazenado e depois convertido em eletricidade por meio de células de combustível de hidrogênio.

³⁰IEA. "Future of Rail" (2019).

³¹Shell. "Shell Scenarios – Sky: Meeting the goals of the Paris Agreement" (2018).



- ▶ Power to Gas: o excedente renovável é usado para produzir H₂ por meio de eletrolisadores, que é então armazenado e injetado na rede de gás.

Aplicação na construção civil e em outras áreas

Está sendo explorada a possibilidade de usar o hidrogênio no setor doméstico e terciário, dentro de edifícios, como um suprimento de energia flexível, adaptado e contínuo. Esse uso seria uma possível alternativa aos combustíveis fósseis para aquecimento urbano, por exemplo.

No entanto, a entrada de novas energias nesses casos é complexa, pois depende de vários fatores, como o tipo de edifício, a localização do edifício ou a conveniência geral, o que reforça a probabilidade de que, no futuro, uma variedade de fontes e tecnologias de energia coexistirá nesse setor.

O oxigênio produzido por eletrólise também está sendo usado para propulsão de foguetes, como parte do oxidante na combustão.

Na fase de consumo, os usuários finais incluem o seguinte:

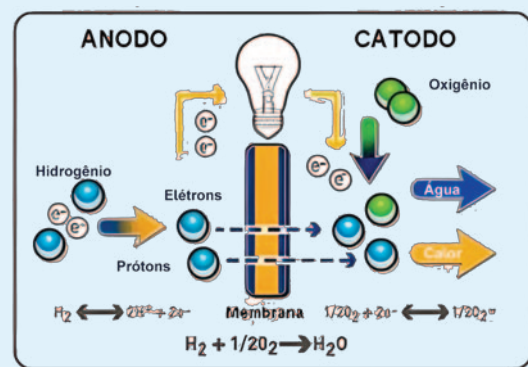
- ▶ Consumidores: principalmente a indústria, o setor de transportes (por exemplo, o setor automotivo), o setor de energia (por exemplo, empresas de petróleo e gás) e outras aplicações em que seu uso dependerá do desenvolvimento do setor.
- ▶ Comercializadoras de hidrogênio: ao longo dos anos, terão um crescimento significativo e se estabelecerão como os principais participantes do setor.
- ▶ Operadores de usinas de hidrogênio: especializados em projeto, construção, operação e manutenção de estações de reabastecimento de hidrogênio para veículos com células de combustível.

Células de combustível de hidrogênio

As células de combustível de hidrogênio (Fuel Cell) são dispositivos nos quais ocorre um processo inverso ao realizado pelos eletrolisadores: a energia química do hidrogênio e do oxigênio é convertida em energia elétrica e água por meio de uma reação eletroquímica. Como pode ser visto na figura 12, o hidrogênio é alimentado ao ânodo e separado em prótons e elétrons por meio da reação de oxidação. Os elétrons se movem para produzir energia elétrica (calor na figura 12), enquanto os prótons se movem pelo eletrólito até o cátodo, onde se combinam com o oxigênio para formar água.

As células de combustível de hidrogênio têm certas vantagens sobre os carros elétricos a bateria, como tempos de recarga mais curtos e menor peso do veículo devido às baterias menores. Além disso, o hidrogênio tem uma densidade de energia maior do que a das baterias e permite maior alcance e menor área ocupada pelo veículo, especialmente em altas pressões ou liquefeito. No entanto, é importante observar que a eficiência energética das células de combustível de hidrogênio é menor do que a dos carros elétricos a bateria, e que a produção e a distribuição de hidrogênio requerem um aporte energético.

Figura 12. Processo químico pelo qual uma célula de combustível de hidrogênio funciona.



Fonte: Biodisol. "Potencial das células de combustível na produção de energia limpa".

RFNBO

"RFNBO significa combustíveis líquidos e gasosos renováveis de origem não biológica. É um grupo de produtos de combustíveis renováveis definido na Diretiva de Energias Renováveis (Art. 2.36). Esses combustíveis são produzidos a partir de fontes de energia renováveis que não sejam a biomassa. Portanto, o hidrogênio renovável gasoso produzido pela alimentação de eletricidade baseada em energia renovável por meio de eletrólise é considerado um RFNBO. Ao mesmo tempo, combustíveis líquidos, como amônia, metanol ou e-fuels (combustíveis sintéticos), são considerados RFNBOs quando produzidos a partir de hidrogênio renovável .

O hidrogênio renovável que é produzido a partir de fontes de biomassa (como o biogás) não é considerado um RFNBO, mas é coberto pela Diretiva de Energias Renováveis sob a definição de "combustíveis de biomassa". Os RFNBOs só serão considerados para a meta de energia renovável da UE se proporcionarem mais de 70% de redução das emissões de gases de efeito estufa em comparação com os combustíveis fósseis, que é a mesma regra que se aplica ao hidrogênio renovável produzido a partir de biomassa.

¹European Commission: EU Delegated Acts on Renewable Hydrogen.

Situação atual e evolução esperada do hidrogênio

“O hidrogênio limpo prova que podemos conciliar nossa economia com a saúde do nosso planeta”
Ursula von der Leyen³²



Situação da produção e consumo atuais

Nesta seção, é feita uma análise quantitativa tanto da produção de hidrogênio, especificando quais países estão na vanguarda da produção desse recurso, quanto da demanda, analisando as porcentagens de hidrogênio que cada setor solicita.

Produção de hidrogênio

Em 2022, a produção global de hidrogênio teve um aumento de 3% em comparação com o ano anterior. Seguindo a tendência de 2021, a produção de hidrogênio continuou a ser dominada pelo uso de recursos fósseis. Especificamente, 62% da produção global veio do gás natural sem captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), enquanto o carvão contribuiu com 21% da produção global. Além disso, 16% da produção global de hidrogênio foi um subproduto, gerado principalmente em refinarias e indústrias petroquímicas durante o processo de reforma da nafta.

Em 2022, apenas 0,1% da produção global de hidrogênio foi realizada por eletrólise³³. No entanto, nos últimos anos, houve um forte crescimento na capacidade de produção de hidrogênio, com aproximadamente 600 projetos anunciados com uma capacidade combinada de mais de 160 GW a partir de 2022. Até o final de 2022, a capacidade instalada global de eletrolisadores de água para a produção de hidrogênio atingiu quase 700 MW, um aumento de 20% em relação ao ano anterior (consulte a Figura 14). Os eletrolisadores alcalinos (ALK) foram responsáveis por 60% da capacidade instalada até o final de 2022, seguidos de perto pelos eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM), com aproximadamente 30%.

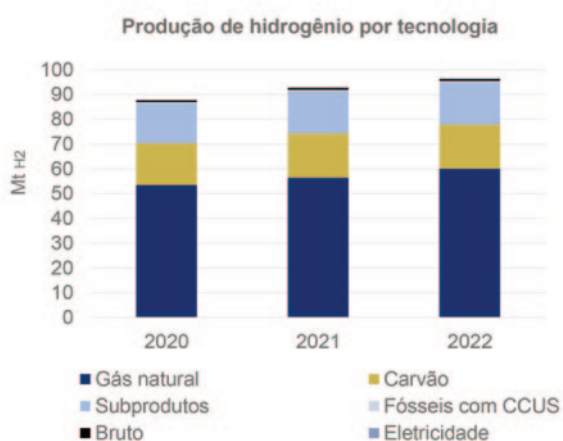
Por fim, a capacidade instalada global poderia triplicar até 2023, chegando a 2 GW até o final de 2023 (equivalente a aproximadamente 0,2 milhão de toneladas de produção de hidrogênio), supondo que todos os projetos sejam realizados conforme planejado.

³²Ursula von der Leyen, Presidente da Comissão Europeia.

³³IEA, "Global Hydrogen review" 2023.

³⁴Dados baseados em projetos que alcançaram pelo menos a decisão final de investimento (FID) ou estão em construção.

Figura 13. Produção de hidrogênio de diferentes fontes.



Fonte: IEA "Global Hydrogen Review 2023".

Figura 14. Capacidade atual de produção de hidrogênio por eletrólise em GW de plantas existentes em todo o mundo³⁴.



Fonte: IEA "Global Hydrogen Review 2023".

Figura 15. Demanda global de hidrogênio por região em 2022.

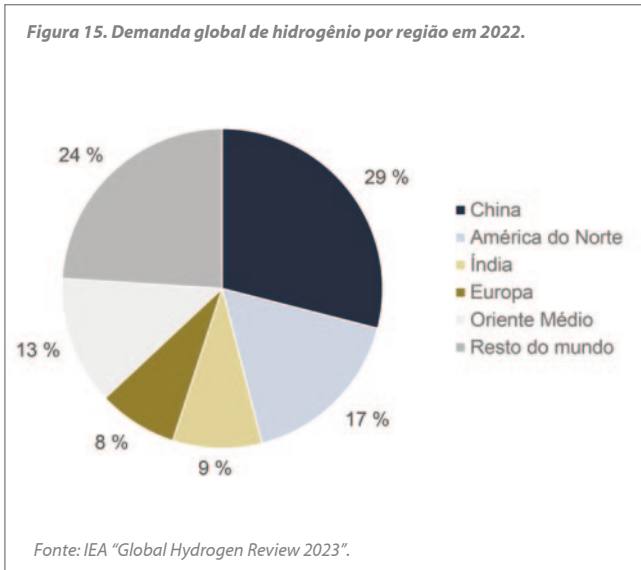
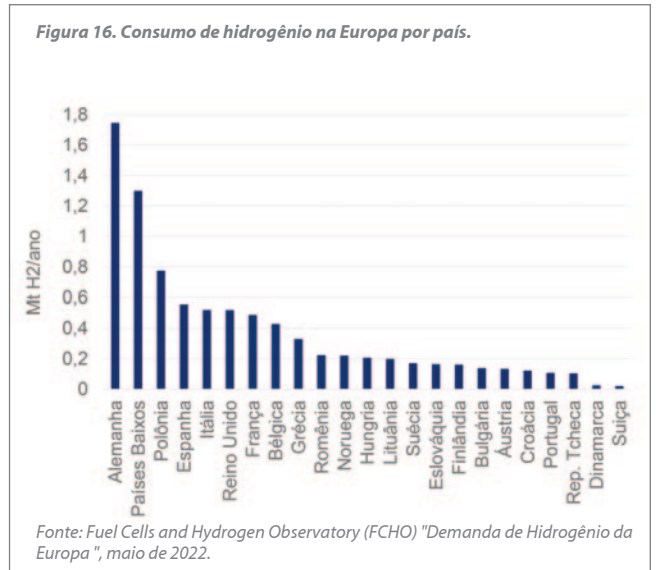


Figura 16. Consumo de hidrogênio na Europa por país.



Consumo de hidrogênio

A demanda global de hidrogênio para 2022 atingiu 95 Mt (milhões de toneladas), um aumento de quase 3% em relação ao ano passado³⁵. O uso de hidrogênio cresceu significativamente em todas as principais regiões consumidoras, exceto na Europa, devido à redução da atividade em decorrência do aumento acentuado dos preços do gás natural³⁶.

Em contrapartida, a América do Norte e o Oriente Médio aumentaram significativamente o uso de hidrogênio (cerca de 7% em ambos os casos). Na China, o uso de hidrogênio cresceu de forma mais modesta, mas o país continua sendo, de longe, o maior consumidor de hidrogênio, respondendo por quase 30% do consumo global.

Como nos anos anteriores, o crescimento do uso global de hidrogênio não é resultado de políticas de incentivo específicas, mas sim de tendências globais de energia. Praticamente todo o

aumento ocorreu em aplicações tradicionais, principalmente em processos químicos e de refino, e correspondeu a um aumento na produção baseada em combustíveis fósseis.

Na União Europeia, a Alemanha tem a maior demanda por hidrogênio, seguida pela Holanda, Polónia e Espanha (vide Figura 16).

Por tipo de atividade, o refino de petróleo, a produção de amônia e a produção de metanol são os principais usuários. No entanto, é o refino de petróleo que consome a maior parte do hidrogênio produzido em todo o mundo. Na Europa, por exemplo, a demanda de hidrogênio é de quase 50% para o refino de petróleo.

³⁵IEA, "Global Hydrogen Review 2023" (2023).

³⁶O setor químico reduziu sua produção, diminuindo o uso de H₂ na Europa em quase 6%.

Figura 17. Consumo de hidrogênio na Europa.

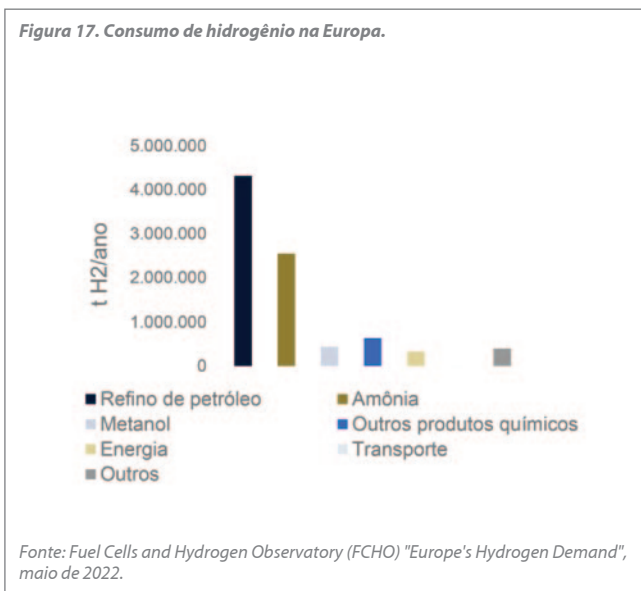
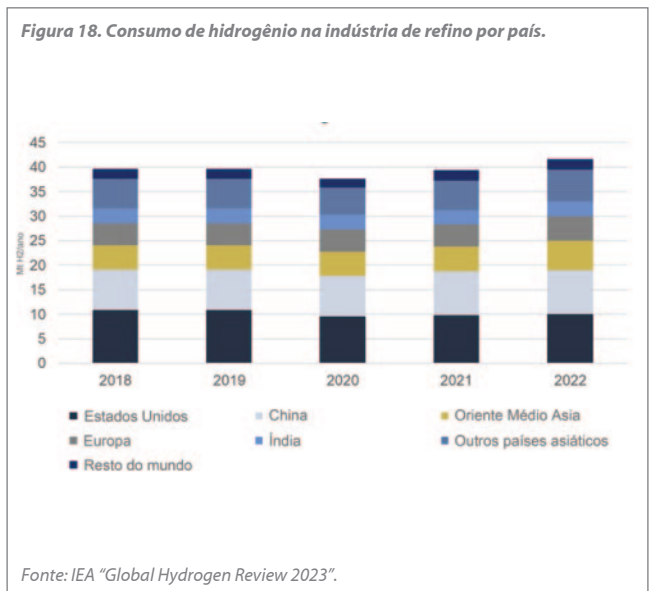


Figura 18. Consumo de hidrogênio na indústria de refino por país.



I. Consumo de hidrogênio na indústria)

a) Indústria de refino

O uso de hidrogênio no refino de petróleo atingiu mais de 41 Mt em 2022. As refinarias o utilizam principalmente para remover impurezas e transformar frações de petróleo em produtos mais leves. Nos últimos seis anos, a demanda permaneceu em torno de 40 Mt de H₂/ano, com a maior parte da produção sendo atendida pelo hidrogênio cinza e apenas 1% por tecnologias de baixa emissão.

b) Indústria química e metalúrgica

A produção de amônia e metanol e a redução do aço são os principais usos em que o hidrogênio desempenha um papel importante. Dos 53 Mt de hidrogênio usados em 2022, cerca de 60% foram para a produção de amônia, 30% para metanol e 10% para ferro de redução direta³⁷ no subsetor de ferro e aço.

II. Consumo de hidrogênio no transporte

Embora o transporte não seja atualmente um dos maiores demandantes de hidrogênio, esse setor teve um crescimento muito significativo. Em 2022, o uso de hidrogênio para o transporte rodoviário aumentou 45% em comparação com 2021 (vide Figura 20).

Embora os carros representem uma demanda menor de hidrogênio para transporte em comparação com os ônibus, vale a pena observar que a produção de veículos elétricos com célula de combustível (Fuel Cell Electric Vehicles ou FCEVs) aumentou consideravelmente nos últimos dois anos. Até o final de 2022, um total de 58.000 veículos elétricos havia sido registrado, representando um crescimento de mais de 40% em relação ao primeiro semestre de 2023. Algumas empresas já têm modelos de veículos elétricos com célula de combustível disponíveis no mercado e continuam investindo no desenvolvimento dessa tecnologia. Nesse contexto, espera-se que o mercado de veículos

elétricos a hidrogênio continue a se expandir na próxima década em todos os segmentos rodoviários.

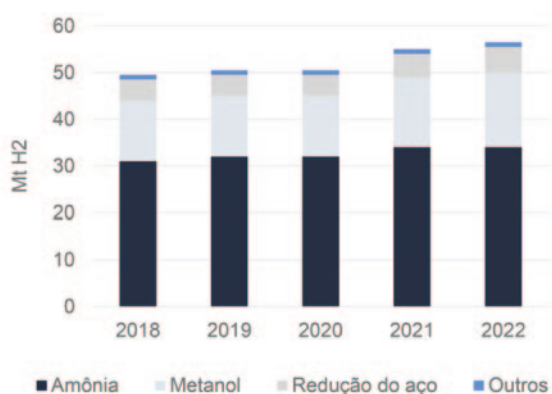
O estoque de ônibus a célula de combustível cresceu de forma semelhante ao de veículos particulares, com um aumento de cerca de 40% em 2022 em comparação com o ano anterior. Em junho de 2023, havia cerca de 7.000 ônibus de célula de combustível em todo o mundo, dos quais aproximadamente 85% estão localizados na China.

Globalmente, havia cerca de 1.100 postos de abastecimento de hidrogênio em operação em junho de 2023, com centenas de outros planejados. Por exemplo, o Regulamento de Infraestrutura de Combustíveis Alternativos da UE exige postos de abastecimento de hidrogênio a cada 200 km ao longo das principais redes rodoviárias e em todos os nós urbanos a partir de 2030.

No setor ferroviário, há muitos projetos em diferentes países europeus, como Itália, Canadá, Espanha e Japão; por exemplo, na Alemanha, há frotas de trens com células de combustível de hidrogênio.

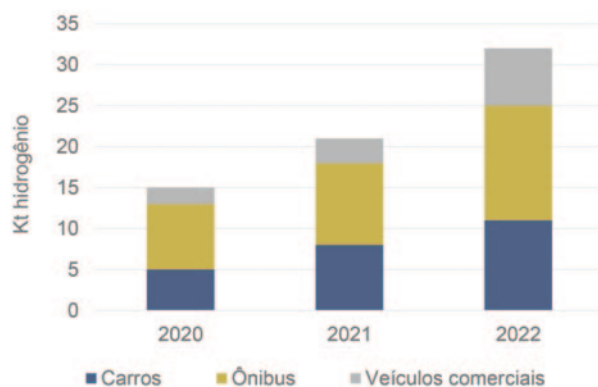
No setor de transporte marítimo, a iniciativa Getting to Zero, que visa reduzir a zero as emissões de gases de efeito estufa no setor marítimo até 2050, publicou vários projetos-piloto e demonstrações em andamento em 2022, dos quais cerca de 45 se concentram no uso de hidrogênio, 25 no uso de amônia e 10 no uso de metanol no transporte marítimo³⁸.

Figura 19. Demanda de hidrogênio na indústria química mundial.



Fonte: IEA "Global Hydrogen Review 2023".

Figura 20. Demanda de hidrogênio no setor de transportes em todo o mundo.



Fonte: IEA "Global Hydrogen Review 2023". Os veículos comerciais incluem veículos comerciais leves, caminhões médios e caminhões pesados.

III. Consumo de hidrogênio no setor de energia

Atualmente, o hidrogênio como combustível no setor de energia é praticamente inexistente, com uma participação de menos de 0,2% no mix geral de geração de eletricidade³⁹ (e, em grande parte, não a partir de hidrogênio puro, mas de gases mistos contendo hidrogênio provenientes da produção de aço, refinarias ou plantas petroquímicas).

IV. Consumo de hidrogênio no setor de construção

A contribuição do hidrogênio para atender à demanda de energia no setor de construção permanece insignificante e não há progresso significativo em 2022. Como parte dos esforços para cumprir as metas climáticas, é necessário mudar o uso de combustíveis fósseis em edifícios para alternativas de baixo carbono, mas opções como a eletrificação por meio de bombas de calor, aquecimento urbano e energias renováveis distribuídas parecem estar muito à frente das tecnologias de hidrogênio.

Desenvolvimento de hidrogênio verde

O nível de desenvolvimento global do hidrogênio verde pode ser medido pela capacidade de eletrólise instalada. Atualmente, até o final de 2022, a capacidade instalada global atingiu quase 0,7 GW⁴⁰. No entanto, o grande potencial do hidrogênio verde levou a um alinhamento global para sua promoção e uso como uma alavanca para a descarbonização. As principais economias do mundo estão promovendo novos projetos e espera-se que alcancem capacidades de 100 a 300 GW até 2030⁴¹, o que implica um aumento notável considerando os 2 GW que serão alcançados em 2023 com os projetos em andamento.



I. Metas globais de eletrólise

Conforme mencionado, a transição energética precisa de um impulso na produção de hidrogênio verde. Atualmente, foram anunciados cerca de 600 projetos com uma capacidade combinada de mais de 160 GW. Se todos os projetos anunciados para hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água e de combustíveis fósseis com CCUS forem realizados, a produção anual de hidrogênio de baixa emissão poderá chegar a mais de 38 Mt (sendo 17Mt de projetos ainda em estágio inicial) até 2030, de acordo com esses projetos anunciados.

Metade do hidrogênio produzido pelos projetos anunciados até 2030 vem de projetos que estão atualmente em estudos de viabilidade, seguidos por projetos que estão em estágios muito iniciais. A primeira prioridade é mudar a demanda existente por hidrogênio na indústria e no refino de hidrogênio fóssil para hidrogênio de baixa emissão. Se esses projetos forem adiante, a capacidade global de eletrolisadores poderá chegar a 175 GW até o final de 2030 e até 300 GW (420 GW se forem considerados os projetos em estágio muito inicial).

A UE está perto de atingir sua meta de 44 GW estabelecida no pacote Fit for 55⁴² em 2021, graças a uma capacidade instalada projetada de 39 GW em 2030 com base nos projetos anunciados. No entanto, ainda há um longo caminho a percorrer para alcançar os 65 GW estabelecidos em 2022 no Plano REPowerEU, uma meta ainda mais ambiciosa. Para isso, será necessário um maior progresso no aumento da capacidade de eletrolisadores.

Mais especificamente, a Espanha, a Dinamarca, a Alemanha e a Holanda lideram a produção de hidrogênio eletrolítico e, juntas, respondem por quase 55% da produção europeia. Em 2022, a Comissão Europeia concentrou-se em projetos que promovem o fornecimento de hidrogênio renovável e de baixo carbono durante a segunda rodada de aprovações de financiamento para Projetos Importantes de Interesse Europeu Comum (IPCEI). Os primeiros leilões do Banco Europeu de Hidrogênio, programados para o final de 2023, também foram anunciados.

A Austrália, aproveitando suas abundantes fontes de energia solar e eólica renováveis, pretende produzir cerca de 6 Mt de hidrogênio de baixa emissão por meio da eletrólise da água até 2030, com muitos desses projetos voltados para os mercados de exportação.

Na América Latina, espera-se que a produção de hidrogênio por eletrólise atinja aproximadamente 6 Mt até 2030, de acordo com os projetos anunciados. O Chile lidera a região, respondendo por 45% da produção de hidrogênio eletrolítico dos projetos anunciados, seguido pelo Brasil e pela Argentina, que juntos respondem por 30% da produção.

³⁹Considerando a energia elétrica produzida com hidrogênio em motores de combustão interna (ICE) e turbinas a gás

⁴⁰IEA, "Global hydrogen review 2023" (2023).

⁴¹IRENA, "Green Hydrogen Cost Reduction" (2020).

⁴²Conjunto de propostas legislativas e medidas apresentadas pela Comissão Europeia em 2021 para combater as mudanças climáticas. Seu principal objetivo é reduzir as emissões de gases de efeito estufa na UE em 55% até 2030.

Nos EUA, projetos de eletrolisadores com uma capacidade total de 9 GW foram anunciados nos últimos 12 meses. Além disso, a China experimentou um desenvolvimento significativo na tecnologia de eletrolisadores e espera-se que atinja 1,2 GW até 2023 (representando metade da capacidade instalada global).

II. Projeções de demanda de hidrogênio: os cenários climáticos

O principal objetivo da UE é alcançar a neutralidade climática até 2050. Para isso, foram desenvolvidos diferentes cenários para simular como o sistema de energia poderia evoluir ao longo do tempo. O cenário Net Zero Emissions (NZE) foi projetado para atingir os resultados específicos de descarbonização, ou seja, reflete uma trajetória de emissões compatível com a manutenção do aumento da temperatura abaixo de 1,5 °C. O cenário de Compromissos Anunciados (Announced Pledges Scenario, APS) e o cenário de Políticas Declaradas (Stated Policies Scenario, STEPS) são exploratórios, pois definem um conjunto de condições iniciais, como políticas e metas, e analisam aonde elas levam com base em diferentes dinâmicas de mercado e progresso tecnológico.

O consumo total de energia final global é atualmente de 442 EJ. Esse consumo é projetado de acordo com o cenário: no NZE, o consumo de energia seria reduzido em uma média anual de 0,9% a cada ano até 2050 ; no APS, ele aumentaria até 2025 e depois começaria a diminuir gradualmente; finalmente, no STEPS, o consumo aumentaria 1,1% ao ano até 2030 e depois continuaria a aumentar em um ritmo mais lento até 2050.

O cenário NZE afirma que, embora a população mundial em 2030 possa aumentar significativamente, seguindo as tendências dos últimos anos, o consumo global de energia seria reduzido em 7% até 2030 . Para atingir esse objetivo, esse cenário se baseia principalmente no aumento da eficiência energética, ou seja, na necessidade de menos energia para os usos finais. A Comissão Europeia está alinhada com esse objetivo e considera fundamental aumentar a eficiência

energética para reduzir o consumo final e, assim, alcançar a ambição climática da UE . Outro dos pilares fundamentais em que esse cenário se baseia é a adoção e a promoção de novas tecnologias, principalmente baterias, eletrolisadores e tecnologias CCUS.

A participação do consumo final mundial total por tipo de combustível no cenário NZE baseia-se principalmente na eletricidade e no aumento das energias renováveis, já que 90% da geração de eletricidade viria dessas fontes. Isso exigiria um grande aumento na flexibilidade do sistema de eletricidade, como baterias, combustíveis à base de hidrogênio ou energia hidrelétrica, para garantir suprimentos confiáveis. Além disso, como a neutralidade de carbono implica uma grande redução no uso de combustíveis fósseis, os combustíveis fósseis passariam de quase quatro quintos do fornecimento total de energia atualmente para pouco mais de um quinto em 2050.

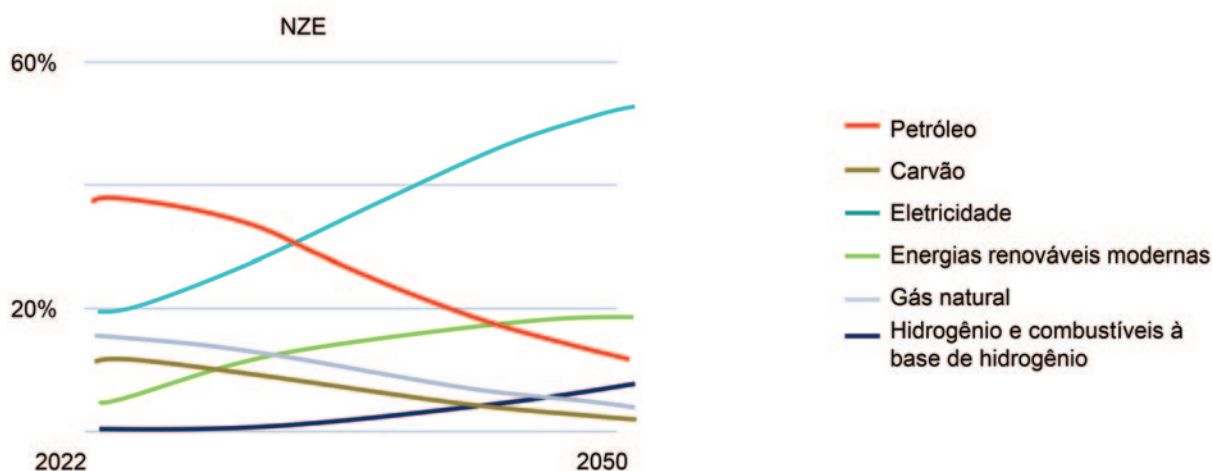
Em termos de hidrogênio limpo, de acordo com a NZE, até 2030, haveria uma capacidade instalada de 850 GW de eletrolisadores e uma produção de 150 Mt (em comparação com os projetos atualmente anunciados, que devem produzir 38 Mt e poderiam atingir uma capacidade instalada de 420 GW até 2030). Até 2050, a produção de hidrogênio limpo atingiria 520 Mt. Isso mostra a grande necessidade de aumentar ainda mais a produção de hidrogênio para atingir as metas de neutralidade de emissões.

⁴³IEA, "World Energy Outlook", (2023).

⁴⁴IEA. "Net Zero by 2050" (2021).

⁴⁵European Commission. "Energy Efficiency Directive". (2023).

Figura 21. Escenário NZE: consumo de energia por combustível.



Fonte: IEA, "World Energy Outlook" (2023)

Principais desafios do hidrogênio

“Na adversidade, a virtude vem à luz”
Aristóteles⁴⁶



Embora tenha grandes benefícios e esteja pronto para se posicionar como um transportador de energia essencial para a descarbonização, o desenvolvimento do hidrogênio verde enfrenta vários desafios ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

Produção de hidrogênio renovável

O primeiro elo da cadeia de suprimentos é a produção do próprio hidrogênio verde, sendo que um dos principais desafios a serem enfrentados é seu alto custo em comparação com as alternativas convencionais. Atualmente, o custo nivelado do hidrogênio verde (LCOH⁴⁷) é de duas a três vezes maior do que os custos de produção do hidrogênio azul, que é produzido a partir de combustíveis fósseis com captura de CO₂ (CCUS)⁴⁸.

Para entender como essa diferença de custo poderia ser reduzida, primeiro é preciso observar que, normalmente, entre 66% e 75% do LCOH é contabilizado pelos custos operacionais, principalmente o custo da eletricidade renovável necessária, enquanto os custos de capital representam entre 25% e 33%. Portanto, a principal chave para diminuir o custo da produção de hidrogênio está na redução dos custos operacionais. Esses custos dependem principalmente de três fatores: o preço da eletricidade, a eficiência da instalação e o grau de carga, sendo o primeiro o mais importante.

A redução do preço da eletricidade e o grau de cobrança dependem, em grande parte, da estrutura regulatória (pedágios e encargos aplicáveis, critérios de adicionalidade/intensidade de emissão/correlação temporal e geográfica a serem definidos para considerar o hidrogênio e seus derivados como renováveis, possibilidade de injeção na rede de gás etc.), enquanto o aumento do desempenho da instalação e, portanto, a redução da quantidade de eletricidade necessária para produzir 1 kg de hidrogênio renovável, exige melhorias na tecnologia de eletrólise e um projeto e operação mais otimizados.

Com relação à contribuição do CAPEX para o LCOH, ela pode ser reduzida na medida em que os custos de produção caem como resultado de custos unitários mais baixos devido ao desenvolvimento tecnológico, mudanças nos materiais usados, economias de escala e efeitos da curva de aprendizado, otimização da capacidade de produção e da cadeia de suprimentos.

Portanto, há espaço para reduzir os custos da eletrólise, mas, a curto e médio prazo, pode haver flutuações de preço causadas por desalinhamentos na cadeia de suprimentos, devido ao crescimento da demanda por eletrolisadores, que é mais urgente do que o desenvolvimento da capacidade de produção.

Além do custo de produção do hidrogênio, a produção de hidrogênio renovável em larga escala também enfrenta desafios associados aos principais insumos da eletrólise: água e eletricidade renovável.

- ▶ Para produzir 1 kg de hidrogênio, 9 a 10 litros de água destilada devem ser fornecidos aos eletrolisadores. Se o uso de água para resfriamento da planta e a água rejeitada (o volume de água, rico em sais dissolvidos, obtido como subproduto da purificação da água) também forem levados em conta, o volume necessário pode chegar a 20-27 litros por kg de hidrogênio.

Isso significa que os projetos precisam planejar adequadamente a captação de água a ser usada. Embora o volume de água necessário, em comparação com outros usos atuais da água, seja muito pequeno, essa é uma questão cada vez mais sensível devido aos períodos de seca e estresse

⁴⁶Aristófanes, dramaturgo grego antigo. Nascido por volta de 446 a.C., é considerado um dos maiores representantes do gênero cômico na literatura clássica.

⁴⁷El LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) es una variable que indica cuánto cuesta en promedio producir 1 Kg de Hidrógeno considerando todos los costes, tanto de capital como de operación, involucrados en su producción a lo largo de la vida útil de la instalación.

⁴⁸IRENA. "Green Hydrogen Overview". (2021).

hídrico que, infelizmente, estão se tornando mais frequentes como resultado das mudanças climáticas. Por outro lado, os projetos também precisam obter autorização para descarregar a água rejeitada mencionada acima, que é principalmente água limpa com uma concentração maior de sais resultante do processo de osmose.

- ▶ O outro grande desafio da produção de hidrogênio em larga escala provavelmente será a obtenção de toda a eletricidade renovável necessária. A título de indicação, com as tecnologias atuais, são necessários de 50 a 60 kWh de eletricidade para produzir 1 kWh de hidrogênio. Se o uso do hidrogênio e de seus derivados também for expandido para novos setores industriais e para o transporte pesado, será necessária uma grande quantidade de eletricidade. Isso implica a instalação de uma grande capacidade de energia eólica e solar, além da necessária para a eletrificação direta de outros setores, como mobilidade leve ou ar condicionado, com os consequentes desafios de conexão à rede, uso do solo etc.

Infraestrutura de transporte do hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio é transportado principalmente por rodovias, em caminhões carregados com cilindros de hidrogênio em diferentes pressões, ou por dutos. É importante destacar os desafios relacionados a esse último modo de transporte de hidrogênio, seja por injeção na rede de gás existente (mistura) ou em uma rede dedicada exclusivamente ao transporte de hidrogênio.

Os dutos de gás natural existentes não podem ser usados diretamente para o transporte de hidrogênio em altas concentrações devido à fragilização do aço que o hidrogênio produz em contato direto com o duto. Conforme discutido acima,

a mistura de hidrogênio com gás natural é considerada uma opção para a saída de hidrogênio das instalações de produção. No entanto, isso é sempre considerado em concentrações muito baixas, que atualmente variam entre 3% e 5% por volume⁴⁹; e mesmo nessas concentrações, a vida útil dos dutos pode ser significativamente afetada.

Além disso, devido à própria operação da rede de gás e da mecânica dos fluidos, não é fácil garantir que as concentrações volumétricas máximas permitidas não sejam excedidas em seções da rede, pois a concentração real de hidrogênio no gás que flui por uma parte da rede depende dos fluxos em um determinado momento, do número e da localização dos pontos de injeção etc. Além disso, os pontos de injeção precisam ser cuidadosamente projetados e localizados para evitar altas concentrações ao seu redor.

Por outro lado, é importante ter em mente que diferentes tipos de usuários estão conectados à mesma rede de gás e, uma vez que o hidrogênio é injetado na rede, não é possível saber quanto hidrogênio está saindo da rede em cada ponto. Quando o gás é usado como combustível, é improvável que as baixas concentrações de hidrogênio tenham um efeito significativo além das variações no valor calorífico do gás (já que a proporção da mistura é volumétrica e a intensidade energética do hidrogênio por volume é muito menor do que a do metano, portanto, quanto maior a proporção da mistura, menor o valor calorífico por unidade de volume do gás resultante). Por outro lado, as indústrias que usam o metano como insumo, principalmente no setor petroquímico, podem ter seus processos afetados pela menor pureza do gás natural.

Uma alternativa (ou evolução) ao blending é a criação de redes

⁴⁹Energy Sci Eng: Howarth RW, Jacobson MZ. "How green is blue hydrogen?". (2021).





dedicadas exclusivamente ao transporte de hidrogênio. Nesse sentido, o “repurposing” ou a conversão da rede de gás existente para o transporte de hidrogênio permite uma economia significativa de custos e de tempo (permitting, desapropriação etc.). No entanto, a transição de um vetor para o outro apresenta novos desafios: quando o transporte de gás natural deve ser interrompido e a infraestrutura deve ser adaptada ao hidrogênio?

Uma possibilidade é começar em seções com dois pipelines paralelos, transformando primeiro um deles. A limitação é que isso provavelmente só será possível em uma pequena parte da rede. Além disso, isso dependerá do fato de a produção e o consumo estarem localizados nos volumes certos exatamente nessas áreas. Outra possibilidade seria não fazer o repurposing de gasodutos existentes, mas construir hidrodutos greenfield novos paralelos à rede existente usando terras e direitos de passagem disponíveis. Nesse caso, um dos principais problemas a serem resolvidos é onde construir as novas estações de compressão de hidrogênio, pois há uma grande probabilidade de não haver espaço suficiente.

Na Espanha, a Enagás anunciou o início do processo não vinculante de “Call for Interest” para os primeiros componentes essenciais da Rede Troncal Espanhola de Hidrogênio. Esse processo tem como objetivo avaliar o nível de interesse dos principais participantes do setor de energia na criação das infraestruturas necessárias para o transporte de hidrogênio renovável.

Uso do hidrogênio

Outro fator importante para que o hidrogênio renovável seja uma alavanca eficaz na descarbonização global é que é necessário não apenas produzi-lo, mas também transformar os usos finais e criar a demanda necessária para justificar o investimento em sua produção e distribuição. Isso implica a necessidade de investir em infraestrutura de fornecimento, tecnologias de produção e armazenamento e criar as políticas certas para incentivar e garantir a adoção.

Conforme discutido ao longo deste documento, a maioria dos usos finais atuais do hidrogênio está concentrada em aplicações industriais, como a produção de amônia ou metanol, ou outros usos, como o refino de petróleo. No entanto, o hidrogênio renovável também precisa ser usado em outros setores, como transporte e geração de energia.

- ▶ No setor de transportes, o hidrogênio renovável pode ser usado em veículos com células de combustível para oferecer uma alternativa de combustível limpo e livre de emissões. No entanto, para que esses veículos sejam adotados em massa, é necessário desenvolver uma infraestrutura de abastecimento de hidrogênio para atender às necessidades dos usuários em diferentes regiões. Isso implica um investimento significativo na construção de estações de hidrogênio e na reforma das estações de combustível fóssil existentes.
- ▶ Em termos de geração de eletricidade, o hidrogênio renovável pode ser usado para equilibrar a variabilidade das fontes renováveis, como a energia eólica e solar. Entretanto, para que isso seja viável, é necessário desenvolver tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio em larga escala. Além disso, também são necessários incentivos e regulamentações adequados para estimular o investimento em projetos de armazenamento de hidrogênio.
- ▶ Outro fator importante na transformação dos usos finais do hidrogênio é a necessidade de uma transição justa e equitativa. A transformação dos setores de fabricação de veículos que dependem de combustíveis fósseis para usar o hidrogênio renovável pode ter um grande impacto sobre os trabalhadores e as comunidades que dependem desses setores. Portanto, são necessárias políticas e programas para garantir que eles tenham acesso a oportunidades de emprego e treinamento para novas habilidades na economia do hidrogênio renovável.

Mercado de hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio é um gás industrial que geralmente é produzido nas mesmas instalações em que será consumido. Portanto, ainda não existe um mercado maduro para ele. Isso significa que não há um índice de preço de referência estabelecido no mercado, o que se traduz em custos mais altos pagos pelos consumidores, pois há pouca transparência e concorrência nos preços. Isso é agravado pela baixa demanda por hidrogênio de baixo carbono no momento, o que significa que os projetos precisam ser integrados desde a produção até a infraestrutura e o uso final.

Entretanto, à medida que o setor de hidrogênio se desenvolve, é de se esperar que os mercados se desenvolvam. Embora seja possível traçar alguns paralelos entre o desenvolvimento desses mercados e o do gás natural (com base no GNL), há algumas particularidades:

- ▶ Enquanto os combustíveis fósseis são extraídos de depósitos geológicos localizados em áreas geográficas muito específicas, o hidrogênio pode ser produzido em praticamente qualquer lugar, desde que haja água e eletricidade. Isso favorece a criação de oferta e dilui o poder de mercado dos produtores.
- ▶ Os custos de transporte de hidrogênio por navio (medidos em quantidade de energia por quilômetro) são muito mais altos do que no caso do GNL devido à sua menor densidade de energia por volume e ao seu ponto de ebulição muito baixo. Além disso, se o hidrogênio for transportado em outra forma (metanol, amônia, LOHC, etc.), as perdas de conversão correspondentes (especialmente relevantes se ele não for usado diretamente na mesma forma em que é transportado) devem ser adicionadas. Isso também significa que o custo do transporte de hidrogênio sob pressão por

duto é muito menor do que por navio e, portanto, o fator de localização é mais relevante na formação de preços do que no caso do GNL.

- ▶ Por isso, a competitividade nos mercados será fortemente influenciada pelo custo agregado tanto da produção quanto do transporte do hidrogênio até a demanda final ou local de referência (não apenas ou principalmente pelo custo de produção).

Por fim, é necessário enfatizar que o produto não deve ser o hidrogênio em si, mas o hidrogênio verde/de baixa emissão. Portanto, é preciso haver uma definição e um sistema de certificação relativamente homogêneos e confiáveis. Sem isso, não é possível saber se o hidrogênio gerado atende a critérios semelhantes e não se está pagando por um hidrogênio sujo, ou não tão limpo, ao preço do hidrogênio verde.

Além disso, um grande desafio para a implantação do mercado de hidrogênio é atender aos requisitos de acesso ao financiamento. Na União Europeia, os leilões do Fundo de Inovação existem para apoiar a produção de hidrogênio renovável não biológico na Europa. Esses leilões representam uma iniciativa fundamental para acelerar a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, mas também exigem uma estrutura financeira sólida e um planejamento cuidadoso para garantir que os projetos de hidrogênio possam ter acesso ao financiamento necessário para seu desenvolvimento e sucesso a longo prazo. Além disso, o Plano Industrial do Pacto Verde anunciou o lançamento do primeiro leilão para a produção de hidrogênio renovável no outono de 2023, com um orçamento do Fundo de Inovação de 800 milhões de euros a ser pago como um prêmio fixo aos produtores de hidrogênio renovável. Também merece destaque o EU Hydrogen Bank, um leilão europeu que fornecerá até 800 milhões de euros para produtores de hidrogênio renovável.



Por fim, há alavancas que poderiam acelerar e incentivar a descarbonização da indústria, introduzindo o hidrogênio nesses mercados. Um instrumento de política que poderia ajudar nesse contexto são os contratos de carbono por diferença (CCfDs), contratos de longo prazo para pagar a diferença entre o preço atual do carbono e o custo real da redução de CO₂. No âmbito da UE, a Comissão planeja lançar CCfDs como parte de seu esquema REPowerEU para apoiar a mudança da atual produção de hidrogênio em processos industriais do gás natural para as energias renováveis.

Regulação

A regulação do hidrogênio verde é um aspecto essencial, pois desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e na implementação desse vetor energético. Alguns dos principais desafios em nível regulatório são os seguintes⁵⁰

- ▶ Criar marcos regulatórios específicos para o hidrogênio verde, evitando que ele seja tratado da mesma forma que outros gases comuns na indústria, por exemplo, limitando sua produção a áreas industriais.
- ▶ Definição do que é considerado hidrogênio verde ou renovável, limitando as condições e as emissões máximas de gases de efeito estufa permitidas no processo de produção, cujo perímetro deve ser especificado.
- ▶ Desenvolvimento dos incentivos financeiros e não financeiros necessários para estimular o investimento em instalações de produção de hidrogênio renovável.
- ▶ Criação de esquemas de garantia de origem para hidrogênio renovável ou de baixa emissão, facilitando o surgimento de um mercado de hidrogênio.

⁵⁰HyLaw: “EU policy paper” (2019).

Resumo de atuações regulatórias por continente e país

Âmbito	Europa		América do Norte		América do Sul		Ásia + Oceania	
	União Europeia	Reino Unido	EE.UU.	Canadá	Colômbia	Chile	China	Austrália
Estratégia nacional para o hidrogênio	EU Hydrogen Strategy REPowerEU	UK Hydrogen Strategy	National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap	Hydrogen strategy for Canada	Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	“Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)”	Australia’s National Hydrogen Strategy
Meta de capacidade instalada em 2030	44 GW (Fit-for-55) 65 GW (REPowerEU)	10 GW	-	-	1-3 GW	5 GW	“Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)”	Australia’s National Hydrogen Strategy
Marco legal e regulatório	Fit-for-55 Renewable Energy Directive (2009/28/EC) 2 actos delegados	Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) Industrial Carbon Capture Business Model (ICC BM) UK Emissions Trading Scheme (ETS)	Bipartisan Infrastructure Law (BIL) Inflation Reduction Act (IRA)	Clean Hydrogen Investment Tax Credit	Decreto 1476 de 2022	Ley 21.305 de Eficiencia Energética	14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of Long-Term Goals for 2035	Commonwealth Hydrogen Regulation Guarantee of Origin scheme
Apoio ao investimento e à inovação	NextGenerationEU IPCEI Hy2Tech IPCEI Hy2Use European Hydrogen Bank European Clean Hydrogen Alliance	Hydrogen Investment Roadmap Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan	Clean Hydrogen Electrolysis Program	Net Zero Accelerator (NZA) Clean Fuels Fund	Ley 2099 de 2021	CORFO	National Key R&D Programs (NKPs)	Hydrogen Headstart Program
Regulação do hidrogênio na rede de gás	EU Directive on Gas and Hydrogen Networks CertifyHy	Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution	HyBlend	G-25—Policy on the use of gas meters in hydrogen-blending activities in the natural gas network	-	-	-	National Gas Law (NGL) National Energy Retail Law (NERL)
Regulação para adaptar o H₂ para o transporte	‘Sustainable and Smart Mobility Strategy’ together with an Action Plan CertifyHy	Targeting net zero - next steps for the Renewable Transport Fuels Obligation: Hydrogen and renewable fuels of non biological origin	Alternative Fuel Excise Tax Credit Alternative Fuel Infrastructure Tax Credit Carbon Reduction Program (CRP)	Emissions Reduction Plan 2030	-	Ley 21.305 de Eficiencia Energética	-	Commonwealth regulation relevant to hydrogen mobility and transport

Detalhe do marco regulatório em diferentes zonas geográficas

União Europeia

- Estratégia de hidrogênio publicada. A estratégia da UE sobre o uso de hidrogênio foi adotada em 2020 e está focada em permitir a produção e o uso de hidrogênio renovável para ajudar a descarbonizar a economia da UE de maneira econômica, de acordo com o Green Deal Europeu, e contribuir para a recuperação econômica após a crise da COVID-19. Hoje, as bases estabelecidas nessa estratégia já estão sendo cumpridas, pois os primeiros 20 pontos de ação definidos em julho de 2020, quando essa estratégia foi adotada, já haviam sido atendidos nos primeiros quatro meses de 2022.

Além disso, com a publicação do plano REPowerEU no segundo trimestre de 2022, a Comissão Europeia completa a estratégia proposta em 2020, ao mesmo tempo em que aumenta suas ambições em relação ao hidrogênio renovável como um importante vetor energético para se afastar das importações de combustíveis fósseis da Rússia.

- Marco legal e regulatório. Em termos de regulação, em 2021, a UE aprovou o pacote "Fit for 55", que inclui uma série de propostas legislativas para promover a redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa. Além disso, em fevereiro de 2023, a Comissão Europeia deu mais um passo para definir o marco regulatório do hidrogênio e sua relação com outros padrões existentes, especificando a definição de hidrogênio renovável em dois atos delegados. O primeiro ato estabelece os requisitos para considerar os combustíveis à base de hidrogênio como combustíveis renováveis¹. O segundo define como as reduções de emissões devem ser calculadas ao usar esse tipo de combustível².

Além disso, a REPowerEU estabeleceu uma meta de produção de 10 milhões de toneladas de RFNBOs até 2030, o que equivaleria a 500 TWh de eletricidade renovável (14% do total de eletricidade consumida na UE)³.

- Apoio ao investimento e à inovação. Nos últimos anos, a UE vem promovendo várias iniciativas para incentivar o investimento e a inovação no mercado de hidrogênio. O programa de recuperação pós-crise da COVID-19, "NextGenerationEU", envolveu grandes investimentos em projetos de transição verde e digitalização. Posteriormente, em 2020, o hidrogênio foi integrado aos Grandes Projetos de Interesse Europeu Comum (IPCEI Hy2Tech e IPCEI Hy2Use). Por fim, nos últimos meses, vem se consolidando o "European Hydrogen Bank", uma proposta que busca criar uma entidade financeira especializada em projetos de hidrogênio na União Europeia. Seu objetivo é mobilizar investimentos privados e públicos para acelerar o desenvolvimento de projetos de hidrogênio verde e contribuir para a transição energética.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Em 2021, a Comissão Europeia propôs a reforma da Diretiva de Gás da UE de 2009 como parte do pacote proposto para o mercado de hidrogênio e gás descarbonizado. A reforma visa criar uma estrutura legal para redes de hidrogênio semelhante à estrutura existente para gás e eletricidade, ampliando os direitos do consumidor e regulamentando a integração do hidrogênio nas redes de energia da UE. Essa proposta avançou no Parlamento e no Conselho da UE em 2022 e 2023 como parte de um processo legislativo em andamento.

Além disso, estão sendo promovidas iniciativas para criar um sistema robusto de garantias de origem para o hidrogênio renovável, um exemplo disso é o CertifHy, que forneceu a base para o primeiro esquema não governamental de garantia de origem para o hidrogênio.

- Legislação para adaptar o hidrogênio ao transporte. O desenvolvimento do transporte de hidrogênio na Europa é apoiado pela Estratégia de Mobilidade Sustentável e Inteligente da Comissão Europeia, publicada em 2021⁴, que estabelece uma série de marcos para alcançar um transporte inteligente e sustentável na Europa. Entre esses marcos, destaca-se que, até 2030, espera-se que pelo menos 30 milhões de veículos de

emissão zero estejam nas estradas europeias e que o tráfego ferroviário de alta velocidade dobre. Além disso, planeja-se que as viagens coletivas programadas em distâncias curtas sejam neutras em carbono e que o hidrogênio desempenhe um papel importante para atingir essas metas, especialmente como fonte de energia limpa para veículos com emissão zero e para aplicações marítimas.

Reino Unido

- Estratégia de hidrogênio publicada. Em agosto de 2021, o Reino Unido publicou sua estratégia nacional de hidrogênio, a UK Hydrogen Strategy⁵. O documento descreve os objetivos e o caminho a ser seguido para atingir a meta "Net Zero by 2050". Posteriormente, em agosto de 2023, o "Department of Business, Energy and Industrial Strategy" publicou uma atualização da estratégia, aumentando a meta de capacidade instalada para 2030 para 10 GW.
- Marco legal e regulatório. O Low Carbon Hydrogen Standard (LCHS) estabelece os requisitos necessários para definir o hidrogênio gerado com baixas emissões de carbono, incluindo as emissões no ponto de produção e a metodologia para seu cálculo. Além disso, foram realizados estudos para avaliar o impacto das políticas existentes no desenvolvimento da produção de hidrogênio, incluindo o Industrial Carbon Capture Business Model (ICC BM) e o UK Emissions Trading Scheme (ETS)⁶.
- Apoio ao investimento e à inovação. Em 2023, o Hydrogen Investor Roadmap⁷ foi atualizado, definindo detalhes do financiamento de projetos de hidrogênio, apoiando até £11 bilhões de investimentos privados até 2030. Além disso, em abril de 2023, o plano "Powering Up Britain: Net Zero Growth"⁸ foi publicado, detalhando os últimos desenvolvimentos na entrega de apoio financeiro para incentivar a primeira implantação em larga escala de instalações de produção de hidrogênio eletrolítico e habilitado para CCUS.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. De acordo com a regulação "Gas Safety (Management) Regulations 1996", o conteúdo atual de hidrogênio nas redes de gás é limitado a 0,1% por volume. Entretanto, por meio do "Ten Point Plan"⁹, os testes necessários para misturar até 20% de hidrogênio na rede de distribuição de gás estão sendo promovidos até o final de 2023.
- Legislação para adaptar o hidrogênio ao transporte. Desde 2008, o Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO)¹¹ estabelece a obrigação de demonstrar que uma porcentagem dos combustíveis distribuídos provém de fontes renováveis. Além disso, em julho de 2022, o Departamento de Transportes publicou o documento "Targeting net zero - next steps for the Renewable Transport Fuels Obligation: Hydrogen and renewable fuels of non biological origin"¹².

¹EU Commission, "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023)

²EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023)

³EU Commission, "Commission sets out rules for renewable hydrogen". (2023).

⁴European Commission - "Sustainable and Smart Mobility Strategy". (2021)

⁵HM Government, "UK Hydrogen Strategy" (2023)

⁶Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Carbon Capture, Usage and Storage" (2022).

⁷HM Government, "Developing the UK Emissions Trading Scheme (UK ETS)" (2022).

⁸Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Hydrogen Investment Roadmap" (2023).

⁹Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan" (2023).

¹⁰HM Government, "The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution" (2020)

¹¹Department for Transport, "Renewable Transport Fuel Obligation: Compliance Guidance" (2022).

¹²Department for Transport, "Targeting Net Zero" (2022).

EUA

- Estratégia de hidrogênio publicada. Em setembro de 2022, o Departamento de Energia dos EUA (DOE) publicou uma versão preliminar da "National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap", estabelecendo a base estratégica para o desenvolvimento do hidrogênio limpo nos Estados Unidos.
- Estrutura legal e regulatória. Em novembro de 2021, o Congresso dos EUA assinou a "Bipartisan Infrastructure Law" (BIL)¹³. Essa legislação histórica autoriza e destina US\$ 62 bilhões para o Departamento de Energia dos EUA (DOE), incluindo US\$ 9,5 bilhões para hidrogênio limpo.

Além disso, em agosto de 2022, o presidente sancionou o "Inflation Reduction Act" (IRA), que permite incentivos adicionais para o hidrogênio, incluindo um crédito fiscal de produção que impulsionará ainda mais o mercado americano de hidrogênio limpo.

- Apoio ao investimento e à inovação. Para apoiar o investimento e a inovação, foram criados programas como o Clean Hydrogen Electrolysis Program, que visa melhorar a eficiência e a relação custo-benefício das tecnologias de eletrólise, e a alocação de US\$ 8 bilhões para centros regionais de hidrogênio limpo, permitindo o desenvolvimento de redes de produtores de hidrogênio limpo e sua infraestrutura de conexão.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Além disso, a regulação do hidrogênio na rede de gás está sendo abordada por meio da iniciativa HyBlend, que se concentra na superação de barreiras técnicas para a mistura de hidrogênio em gasodutos de gás natural, incluindo pesquisa de compatibilidade de materiais, ciclo de vida e análise técnico-econômica.
- Regulação para adaptar o hidrogênio ao transporte. O US Department of Energy tem aprovado algumas leis e incentivos fiscais para promover e adaptar o hidrogênio para o transporte. Isso inclui o "Alternative Fuel Tax Credit", que oferece um crédito fiscal de US\$ 0,50 por galão para determinados combustíveis alternativos, como o hidrogênio liquefeito, e a "Alternative Fuel Tax Exemption", um incentivo fiscal que se aplica a equipamentos de combustível, incluindo o hidrogênio liquefeito. Também foi aprovado o "Carbon Reduction Program (CRP)", que inclui atividades de financiamento do estado para a implantação de veículos movidos a combustíveis alternativos.

Canadá

- Estratégia de hidrogênio publicada. Em dezembro de 2020, o governo canadense publicou sua estratégia para o hidrogênio, estabelecendo metas ambiciosas em termos de produção e uso.
- Marco legal e regulatório. O governo do Canadá introduziu recentemente três créditos fiscais destinados a incentivar a transição para uma economia de emissões líquidas zero em seu orçamento para 2023. O mais relevante para o hidrogênio é o Crédito Fiscal para Investimento em Hidrogênio Limpo, um crédito fiscal reembolsável que incentiva a produção de hidrogênio limpo, com créditos que variam de 15% a 40%, dependendo da intensidade de carbono do hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. Em termos de iniciativas destinadas a promover a inovação e estimular o investimento, vários programas foram desenvolvidos, incluindo: (1) Net Zero Accelerator (NZA) é um programa de US\$ 8 bilhões que apoia projetos que permitem a descarbonização de grandes emissores, tecnologia limpa e transformação industrial; e (2) Clean Fuels Fund, um fundo de US\$ 1,5 bilhão criado em 2021 para reduzir o risco de investimento de capital necessário para construir novas instalações de produção de combustíveis

limpos ou expandir as existentes, incluindo conversões de instalações.

- Regulação do hidrogênio na rede de gás. O boletim "G-25 – Policy on the use of gas meters in hydrogen-blending activities in the natural gas network" estabelece os requisitos de tempo e as condições para permitir que concentrações de gás natural de 5 a 25% de hidrogênio sejam injetadas na rede.
- Legislação para adaptar o hidrogênio ao transporte. Por fim, um plano de redução de emissões "Emissions Reduction Plan 2030" foi publicado, estabelecendo uma meta de 35% do total de vendas de veículos médios e pesados com emissão zero até 2030, criando uma oportunidade estratégica significativa para os fabricantes de veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio.

Colômbia

- Estratégia de hidrogênio publicada. No início de 2021, o governo colombiano, em colaboração com organizações multilaterais e institutos de pesquisa, começou a desenvolver um roteiro para estabelecer a base para o mercado de hidrogênio no país. O chamado Roadmap do Hidrogênio¹⁴ estabelece as bases para:
 - Atingir uma capacidade de produção entre 1 GW e 3 GW de produção de hidrogênio verde e 50 kt de hidrogênio azul até 2030.
 - Definir um preço-alvo para a geração de hidrogênio verde de 1,7 USD/kg.
 - Atingir 40% de consumo de hidrogênio verde do total de H₂ atualmente consumido no setor industrial.
- Marco legal e regulatório. Em relação ao status regulatório atual, a Lei 2099 de 2021, por meio dos artigos 21 e 23, abre uma cláusula geral de competência ao Governo Nacional para definir os mecanismos de promoção da inovação, pesquisa, produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. Além disso, o Decreto 1476 de 2022 estabelece disposições destinadas a definir os mecanismos, condições e incentivos para promover a inovação, a pesquisa, a produção, o armazenamento, a distribuição e o uso de hidrogênio para a prestação de serviços públicos de eletricidade, armazenamento de energia e descarbonização de setores como transporte, gás, hidrocarbonetos e mineração.

Chile

- Estratégia de hidrogênio publicada. O governo chileno apresentou em outubro de 2020 um conjunto de políticas com o objetivo de criar uma indústria de hidrogênio verde, a Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde. Ela está dividida em três etapas, cada uma com um objetivo diferente:
 - Primeiro (2020 - 2025): o objetivo é acelerar o uso de H₂ verde em refinarias, produção de amônia e veículos de transporte. Também incentiva a adoção da blending, com até 20% de hidrogênio nas redes de gás.
 - Segundo (2025 - 2030): a experiência adquirida permitiria uma forte entrada nos mercados internacionais por meio de exportações, com uma capacidade de produção de H₂ por eletrólise de até 5 GW até essa data.
 - Terceiro (a partir de 2030): o objetivo seria posicionar o Chile como líder global na exportação de combustíveis limpos, alcançando 25 GW de produção de hidrogênio por meio de eletrolisadores, bem como um preço de hidrogênio verde abaixo de US\$ 1,5/kg.

¹³BIL: Bipartisan Infrastructure Law signed by President Biden on November 15, 2021.

¹⁴Ministério da Energia, Governo da Colômbia, "Hoja de Ruta del hidrógeno en Colombia".(2021).

- Marco legal e regulatório. Em termos de regulamentações, a Lei 21.305 sobre Eficiência Energética, publicada em fevereiro de 2021, definiu o hidrogênio como um combustível, o que permite ao Ministério da Energia regular seu uso, revisar e atualizar as regulamentações do mercado de eletricidade para permitir a participação do hidrogênio no setor, atualizar as regulações de gás natural para introduzir cotas de hidrogênio verde e facilitar o processamento de licenças para projetos envolvendo hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. Dentro da estrutura de reativação econômica sustentável e da estratégia nacional de hidrogênio, a CORFO (Corporación de Fomento de la Producción) promove o acesso ao financiamento para projetos de hidrogênio, acelerando a implementação de iniciativas para a produção de hidrogênio verde e facilitando a criação de alianças industriais e comerciais ao longo de sua cadeia de valor.
- Legislação para adaptar o H₂ ao transporte. A Lei 21.305 sobre Eficiência Energética inclui benefícios fiscais para carros com "emissão zero", incluindo carros a hidrogênio.

China

- Estratégia de hidrogênio publicada. A Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma e a Administração Nacional de Energia publicaram conjuntamente o Plano de Médio e Longo Prazo para o Desenvolvimento da Indústria de Energia de Hidrogênio (2021-2035) em 2022. É o primeiro plano de médio e longo prazo para implementar o uso de hidrogênio na China até 2035. Anos antes, em 2018, foi criada a The National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell (NAHFC). Por outro lado, o governo chinês declarou a meta de alcançar a neutralidade de carbono em 2060, atingindo o máximo de emissões em 2030.
- Marco legal e regulatório. A China não tem uma estrutura legislativa abrangente para o hidrogênio, portanto, algumas províncias decidiram incluir sua própria estratégia no 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of Long-Term Goals for 2035. Os documentos compilam o progresso no desenvolvimento do setor local de hidrogênio, a construção de usinas e sua operação. Por exemplo, o NEV industry action plan publicado pela província de Shanxi em 2019 delineou planos sobre o uso de células de combustível de hidrogênio em veículos e a província de Guangdong também realizou um exercício semelhante por meio do "Implementation Plan for Accelerating the Development of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Industry", publicado em 2020.
- Apoio ao investimento e à inovação. A maior fonte de investimento vem dos National Key R&D Programs (NKPs), fundos de pesquisa aplicada que são uma importante fonte de financiamento público de P&D. Desde 2016, mais de 60 projetos NKP com foco em tecnologias de hidrogênio foram anunciados. Esses projetos promovem a pesquisa em tecnologias de eletrolisadores e visam melhorar a produção de hidrogênio renovável.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Estão em andamento projetos em que o hidrogênio é transportado pela rede de gás por meio de blending com gás natural. A China National Petroleum Corporation transportou hidrogênio na cidade de Yinchuan, no noroeste da China. O hidrogênio foi transportado com sucesso ao ser misturado a um gasoduto de gás natural.
- Regulação para adaptar o hidrogênio ao transporte. Desde a publicação do 13th Five-Year Plan (2016), o ímpeto para o desenvolvimento de veículos movidos a hidrogênio foi estimulado, chegando a 7700 FCEVs até o final de 2020.

Austrália

- Estratégia de hidrogênio publicada. A Austrália desenvolveu uma estratégia nacional de hidrogênio que estabelece uma estrutura para o desenvolvimento, a produção e a exportação de hidrogênio verde.
- Marco legal e regulatório. Atualmente, o "Commonwealth Hydrogen Regulation" fornece orientação regulatória sobre a compreensão de quais leis federais existentes podem ser aplicadas a projetos de hidrogênio. Além disso, no orçamento de 2023-24, foram destinados US\$ 38,2 milhões para a criação de um esquema de Garantias de Origem que certificará a energia renovável e rastreará e verificará as emissões de produtos de energia limpa. Esse esquema é essencial para o comércio internacional de hidrogênio, pois fornecerá uma medida de confiabilidade e sustentabilidade para o hidrogênio produzido na Austrália. Ele também ajudará novos projetos a obter financiamento e aumentará a eficácia dos esforços do governo para ampliar a energia renovável e o setor de hidrogênio.
- Apoio ao investimento e à inovação. A Austrália estabeleceu o programa "Hydrogen Headstart" de US\$ 2 bilhões, que impulsiona a produção e o uso do hidrogênio verde como fonte de energia limpa e sustentável no país, ao mesmo tempo em que estimula o investimento em projetos de hidrogênio em larga escala.
- Regulação do hidrogênio na rede de gás. Em 2022, o Ministério da Energia reformou a "National Gas Law and Regulations". As reformas garantirão que as disposições regulatórias existentes e as proteções ao consumidor funcionem como pretendido quando o hidrogênio e os gases renováveis forem incorporados à rede de gás. Anteriormente, a "National Gas Law (NGL)" e a "National Energy Retail Law (NERL)" referiam-se apenas ao "gás natural". Com os projetos em andamento para introduzir o hidrogênio e o biometano na rede de gás, essa terminologia foi atualizada para oferecer segurança regulatória para o setor emergente.
- Regulação para adaptar o H₂ ao transporte. Dentro dos "Commonwealth regulations", há uma seção dedicada exclusivamente a cobrir todos os regulamentos federais que regem veículos movidos a hidrogênio, embarcações movidas a hidrogênio ou amônia ou o transporte de hidrogênio ou amônia como carga.

- Desenvolvimento de regulações específicas para promover o transporte com veículos de emissão zero, garantindo um lugar para veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio.
- Criação de marcos específicos para o transporte marítimo movido a gás, incluindo o hidrogênio verde.
- Evolução das regulações de transporte de gás por dutos para determinar as condições de conexão/injeção de produtores de hidrogênio na rede (mistura, conexão e injeção, equipamentos, porcentagens máximas, pedágios aplicáveis, considerações de segurança etc.).

Muitos países já estão enfrentando esses desafios, publicando estratégias de hidrogênio que definem medidas e metas concretas para promover o hidrogênio verde, criando uma estrutura legal e regulatória com regulamentos específicos para o tratamento do hidrogênio ao longo da cadeia de valor e definições específicas para o hidrogênio verde, apoiando o investimento e a inovação, promovendo mecanismos de garantia de origem, promovendo o transporte de veículos com emissão zero etc.

Embora alguns países tenham demonstrado maior comprometimento do que outros, os impulsos regulatórios e estratégicos buscam o mesmo objetivo: alcançar a descarbonização por meio do aproveitamento do hidrogênio. Para obter uma visão geral do posicionamento de alguns países, foram compiladas várias ações em andamento ou propostas futuras que foram apresentadas em relação ao hidrogênio renovável, entre as quais se destacam as seguintes:

- ▶ Publicação das Estratégias Nacionais de Hidrogênio, que definem medidas e objetivos elaborados por cada país para promover a produção, a distribuição e o uso do hidrogênio

como um combustível limpo e sustentável. Dentro dessas estratégias, as metas nacionais de capacidade instalada de hidrogênio são definidas para o horizonte de 2030.

- ▶ Criação de um marco legal e regulatório, incluindo medidas legais para facilitar a produção e a distribuição de hidrogênio, bem como o estabelecimento de padrões de segurança e qualidade.
- ▶ Apoio ao investimento e à inovação para apoiar e impulsionar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e mais sustentáveis para promover projetos de hidrogênio em toda a cadeia de valor.
- ▶ Regulação do hidrogênio na rede de gás (blending) que define os requisitos técnicos e de segurança para a mistura de hidrogênio com gás natural em redes de distribuição de gás.
- ▶ Adaptação do hidrogênio como combustível de transporte, estabelecendo regulamentos para a instalação de pontos de reabastecimento e a infraestrutura necessária para o transporte de hidrogênio verde.

Por fim, deve-se observar que as empresas também enfrentam desafios significativos em sua estratégia, operações e compromisso com a sustentabilidade nesse novo cenário energético:

- ▶ **Definição da estratégia:** as organizações devem definir seu posicionamento estratégico com relação ao hidrogênio, compreendendo os projetos existentes, mantendo-se atualizadas com os desenvolvimentos regulatórios, analisando o mercado potencial e os clientes ou compradores em potencial, avaliando possíveis alianças comerciais para fortalecer sua posição etc.



- ▶ **Implementação da estratégia:** a implementação da estratégia implicará o desenvolvimento de novos projetos, cujas decisões de investimento devem ser acompanhadas pelas análises técnico-econômicas correspondentes, como a avaliação do local ideal para a produção de hidrogênio renovável ou a análise e a solicitação do possível auxílio financeiro disponível.
- ▶ **Implementação do projeto:** o gerenciamento do portfólio de projetos deve incluir uma correta identificação, avaliação e gerenciamento dos possíveis riscos nos projetos, aplicando metodologias específicas de gestão.
- ▶ **Governança e organização:** a implementação da estratégia definida pode exigir uma reorganização interna e o recrutamento de talentos qualificados. O impacto sobre a governança das informações e a qualidade dos dados relacionados ao hidrogênio também precisará ser considerado.
- ▶ **Operação e governança dos negócios:** no nível operacional, será necessário adaptar processos e sistemas para controlar a qualidade, a segurança e a lucratividade dos projetos, desenvolver estratégias comerciais adaptadas, avaliar contratos de hidrogênio, modelar preços, avaliar a execução de hedging etc.
- ▶ **Vinculação às metas de sustentabilidade:** O desenvolvimento do hidrogênio também oferece uma oportunidade para as empresas atingirem suas metas de sustentabilidade, monitorando a conformidade com seus compromissos e indicadores-chave.

Cronograma do marco regulatório e legislativo europeu do hidrogênio

Várias ações foram realizadas na União Europeia para adotar um marco regulatório para o hidrogênio:

- ▶ Em dezembro de 2015, foi celebrado o Acordo de Paris⁵¹, um acordo global sobre mudanças climáticas com o objetivo de reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa.
- ▶ Em dezembro de 2018, a Diretiva Europeia de Energia Renovável (RED)⁵² foi revisada e incluiu uma nova meta geral da UE para o consumo de energia renovável até 2030 de 32%, incluindo uma seção para o transporte.
- ▶ Em dezembro de 2019, a Comissão Europeia propôs o Pacto Verde Europeu⁵³, um pacote de iniciativas políticas com o objetivo de posicionar a UE como a primeira região neutra para o clima até 2050, identificando o hidrogênio como um meio de combater as mudanças climáticas.
- ▶ Em julho de 2020, foi publicado o Roteiro Europeu do Hidrogênio⁵⁴, colocando essa fonte de energia no centro do plano de descarbonização da UE.
- ▶ Em dezembro de 2020, o hidrogênio foi integrado aos Projetos Importantes de Interesse Europeu Comum (IPCEI)⁵⁵.

⁵¹United Nations, "The Paris Agreement". (2015).

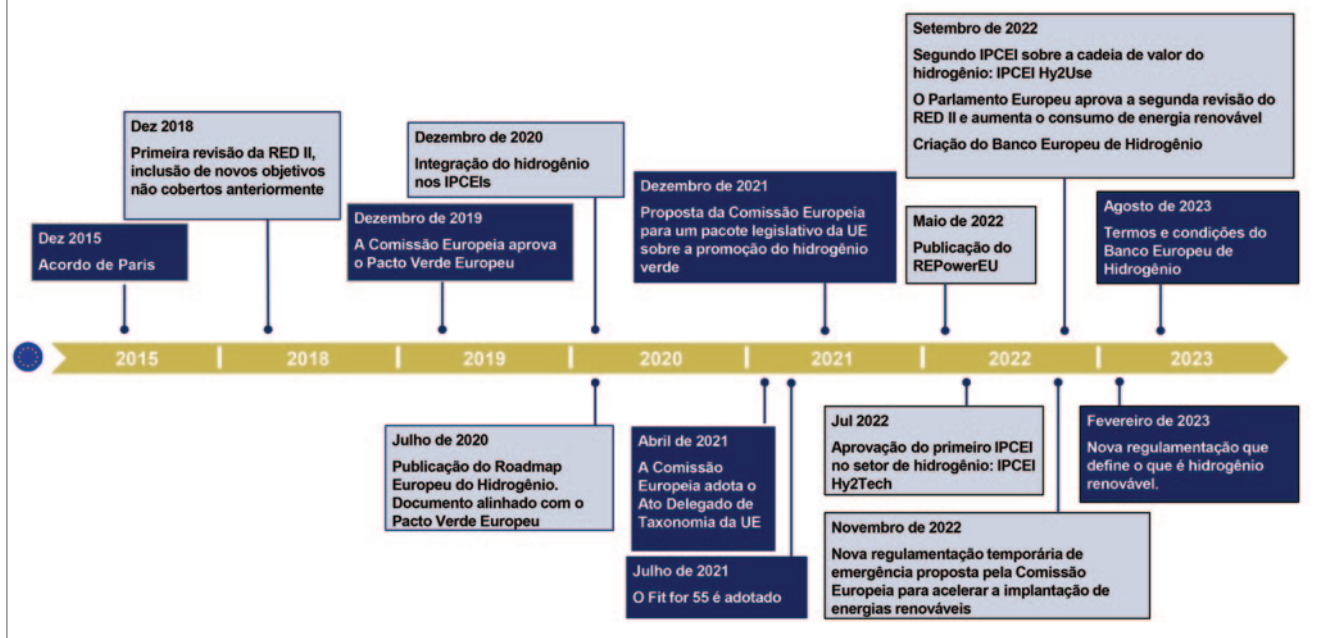
⁵²RED: "Renewable Energy Directive". Aprovada em 2016, é um documento legislativo que define os objetivos da política energética da Comunidade Europeia no campo das energias renováveis e a estrutura legal para seu desenvolvimento.

⁵³EU Commission, "A European Green Deal". (2019).

⁵⁴EU Commission, "Hydrogen". (2020).

⁵⁵EU Commission, "IPCEIs on Hydrogen". (2020).

Figura 22. Timeline regulatório UE.



- ▶ Em abril de 2021, a Comissão Europeia adotou o Ato Delegado de Taxonomia da UE⁵⁶, incentivando a produção de hidrogênio renovável, mas permitindo que as usinas de hidrogênio azul de alta eficiência também atendam aos padrões de classificação europeus.
- ▶ Em julho de 2021, foi adotado o pacote "Fit for 55"⁵⁷, um conjunto de propostas legislativas e emendas à legislação existente da UE que ajudará a UE a reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa e alcançar a neutralidade climática.
- ▶ Em dezembro de 2021, a Comissão Europeia propôs um Pacote Legislativo da UE sobre a descarbonização do gás e a promoção do hidrogênio verde⁵⁸, com o objetivo de criar um mercado de hidrogênio e desenvolver uma infraestrutura dedicada, além de estabelecer a criação de uma Rede Europeia de Operadores de Redes de Hidrogênio (ENHR) para garantir o desenvolvimento e o gerenciamento da rede de hidrogênio.
- ▶ Além disso, em 2021, foi aprovado o primeiro projeto de garantias verdes de origem na UE, o "CertifHy".
- ▶ Em maio de 2022, o documento REPowerEU⁵⁹ foi publicado, estabelecendo uma meta de 10 milhões de toneladas de produção doméstica de hidrogênio verde até 2030 e revisando para cima as metas estabelecidas pelo Roadmap do Hidrogênio.
- ▶ Em julho de 2022, foi aprovado o IPCEI Hy2Tech⁶⁰, que inclui 41 projetos de inovação para desenvolver tecnologias de hidrogênio. Além disso, em setembro de 2022, o IPCEI Hy2Use também foi aprovado, complementando o IPCEI Hy2tech para o desenvolvimento da infraestrutura de hidrogênio.
- ▶ Em setembro de 2022, o Parlamento Europeu aprovou a revisão da RED II⁶¹ para aumentar a participação das energias renováveis no consumo final de energia da UE para 45% em 2030 (em comparação com os 32% propostos inicialmente).
- ▶ Em novembro de 2022, a Comissão Europeia propôs um novo regulamento emergencial temporário para acelerar a implantação de fontes de energia renováveis⁶².
- ▶ Em fevereiro de 2023, a definição de hidrogênio renovável é estabelecida em dois atos delegados. O primeiro ato estabelece os requisitos para considerar os combustíveis à base de hidrogênio como combustíveis renováveis⁶³. O segundo define como as reduções de emissões devem ser calculadas ao usar esse tipo de combustível⁶⁴.
- ▶ Em agosto de 2023, foram publicados os termos e condições do "European Hydrogen Bank", que visa incentivar e apoiar o investimento na produção de hidrogênio renovável.

⁵⁶EU Commission, "Ato Delegado de Taxonomia da UE" (2021).

⁵⁷EU Commission, "Fit for 55". (2021)

⁵⁸EU Commission, "Perguntas e respostas sobre o pacote de hidrogênio e gás descarbonizado" (2021).

⁵⁹EU Commission, "REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition" (2022).

⁶⁰EU Commission, "Remarks by Executive Vice-President Vestager on IPCEI in the hydrogen technology value chain". (2022).

⁶¹Balkan Green Energy News, "O parlamento europeu vota para aumentar a meta de energias renováveis para 2030 para 45%" (2022).

⁶²EU Commission, "REPowerEU: Commission steps up green transition away from Russian gas by accelerating renewables permitting (2022).

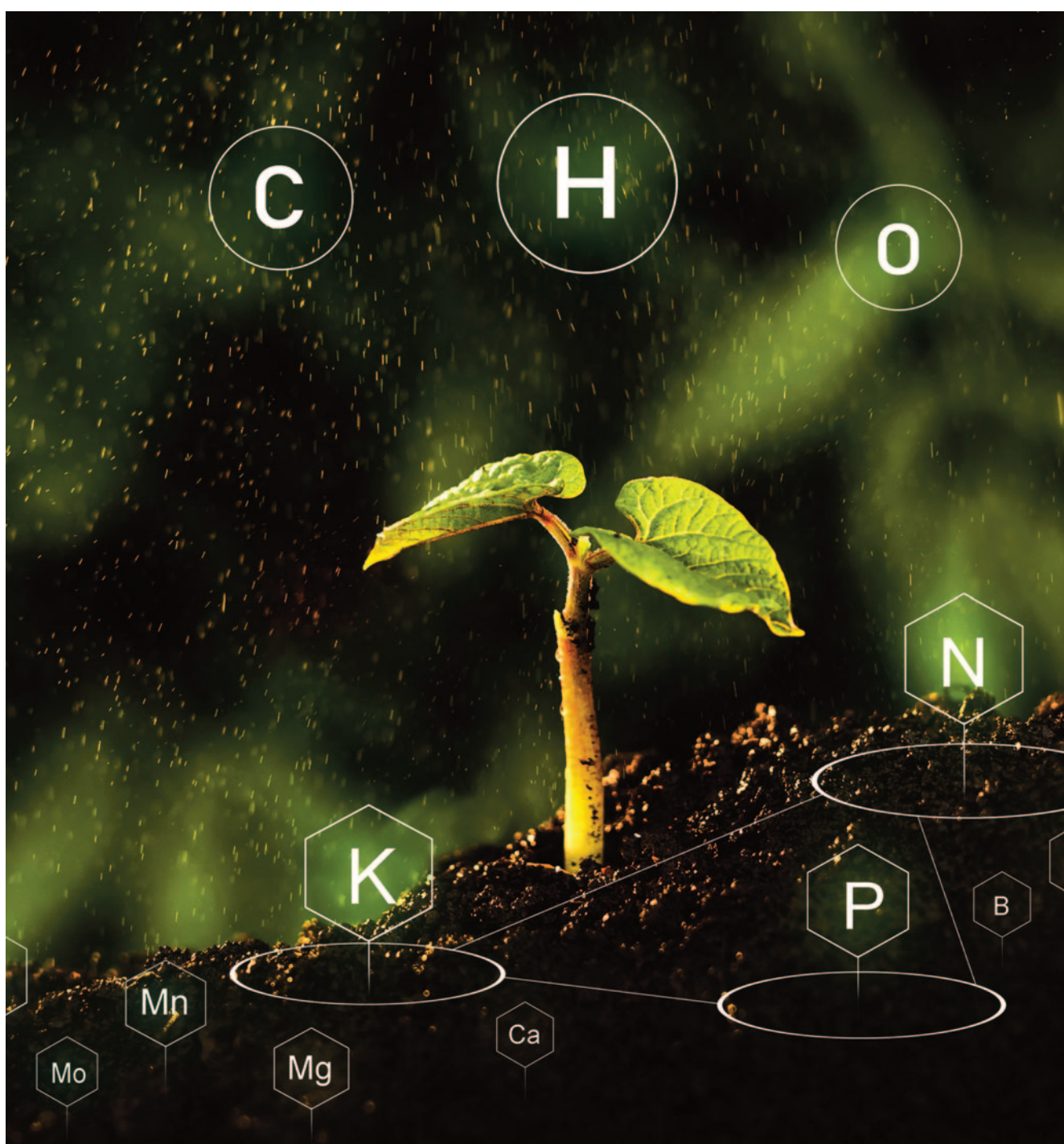
⁶³EU Commission, "Regulamentação delegada sobre a metodologia da União para RFNBOs" (2023).

⁶⁴EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023).



Análise aplicada à viabilidade do hidrogênio: estudo de caso

“O que pode ser medido, pode ser gerenciado”
Peter Drucker⁶⁵



Estudo de caso: selecionando o local ideal para projetos de hidrogênio

Esta seção apresenta um estudo de caso com foco na identificação e seleção de locais ideais para projetos de hidrogênio. A implementação desse modelo oferece aos agentes do mercado de hidrogênio a capacidade de avaliar com precisão as vantagens e desvantagens de diferentes locais para a produção de hidrogênio renovável, facilitando a tomada de decisões mais informadas e sólidas.

Introdução do modelo

A Cátedra de Estudos de Hidrogênio da Universidade Pontifícia Comillas (ICAI-ICADE), da qual a Management Solutions é membro, desenvolveu um aplicativo baseado em ferramentas GIS (Geographic Information Systems) que permite analisar a localização ideal dos locais para a construção de projetos de hidrogênio renovável de acordo com diferentes critérios.

O aplicativo permite o cálculo de um índice de compatibilidade H₂ que pontua a adequação dos locais. O estudo de caso a seguir foi desenvolvido para a Espanha, mas essa tecnologia seria aplicável em qualquer região, logicamente sujeita à disponibilidade das informações necessárias ou com a adaptação necessária das variáveis a serem avaliadas na sua ausência.

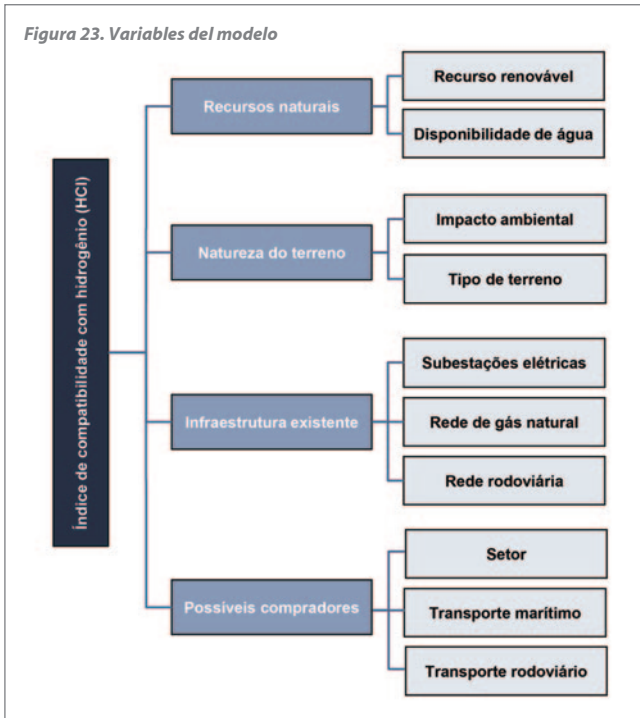
Primeiramente, o mapa da Espanha foi dividido em quadrados (por exemplo, 2x2 km², embora o tamanho possa ser ajustado dependendo da área de estudo) e o modelo gerado foi usado para avaliar a compatibilidade da produção de hidrogênio para cada um deles.

O modelo proposto permitiria que os participantes do mercado de hidrogênio identificassem os pontos fortes e fracos dos possíveis locais para a produção de hidrogênio renovável, o que resultaria em uma melhor tomada de decisão. Além disso, esse modelo poderia ajudar a responder a algumas perguntas, por exemplo:

- ▶ Como os diferentes locais se comparam em termos de adequação para a produção de hidrogênio renovável?
- ▶ Quais são os locais mais promissores para a produção de hidrogênio verde?
- ▶ Onde se espera que os futuros off-takers estejam localizados e qual é sua demanda potencial?
- ▶ Como escolher os melhores locais para evitar conflitos no uso da água, no uso da terra ou nos impactos ambientais?
- ▶ Onde pode ser construída uma usina de hidrogênio renovável para maximizar a eficiência e a lucratividade?
- ▶ Qual é o potencial de produção de hidrogênio renovável em diferentes áreas?
- ▶ Como minimizar os custos de transporte do hidrogênio verde da fábrica para os pontos de consumo?

⁶⁵Peter Drucker, conhecido como o pai da administração moderna e renomado por suas contribuições ao campo da administração de empresas.

⁶⁶Geographic Information Systems.



Explicação do modelo

O modelo desenvolvido baseia-se no estudo de diferentes variáveis para calcular o local ideal para a construção de um projeto de hidrogênio.

Em seguida, é analisado e desenvolvido como essas variáveis são aplicadas como entradas no modelo:

Recursos naturais

Disponibilidade de energia solar e eólica

O modelo avalia as alternativas de produção de H₂ fontes de energia solar ou eólica de acordo com o fator de capacidade⁶⁷ de cada fonte renovável. Dependendo da área geográfica, esse fator de capacidade varia. Um fator de capacidade mais alto implica

uma maior utilização potencial do eletrolisador e, portanto, uma maior capacidade de produção de hidrogênio por eletrólise.

Como às vezes é difícil comparar dois locais com base apenas nos fatores de capacidade, eles podem ser traduzidos em um custo nivelado de hidrogênio (LCOH). O LCOH indica o custo estimado por kg de hidrogênio, levando em conta os custos de investimento (CAPEX) e a produção de hidrogênio, relacionados às horas de operação e, portanto, ao fator de capacidade.

Quanto mais baixo for o LCOH, mais barato será produzir hidrogênio no local em estudo. Além disso, o LCOH permite uma comparação direta entre as energias eólica e solar para a produção de hidrogênio.

Disponibilidade de água

Da mesma forma, a disponibilidade de água é um insumo fundamental como matéria-prima para a produção de hidrogênio renovável. Nesse caso, as informações sobre a disponibilidade de água de superfície (figura 26, gráfico à esquerda) e as localizações das ETARs (estações de tratamento de águas residuais; figura 26, gráfico à direita) estão integradas, mas outras preferências do desenvolvedor, como a distância das fontes de água ou o tipo de água, podem ser incluídas.

Natureza do terreno:

Índice de Sensibilidade Ambiental (ESI). Esse índice mede o impacto ambiental da construção de uma usina de geração renovável em um determinado local com base em vários fatores que influenciam a vulnerabilidade ambiental, como a qualidade do solo ou a presença de áreas naturais protegidas, entre outros. O índice classifica o território em cinco categorias de sensibilidade ambiental (máxima, muito alta, alta, moderada e baixa), e os locais com sensibilidade máxima são excluídos do modelo.

⁶⁷Fator de capacidade: mede a frequência com que uma usina opera com potência máxima. Uma usina com um fator de capacidade de 100% produz energia o tempo todo.

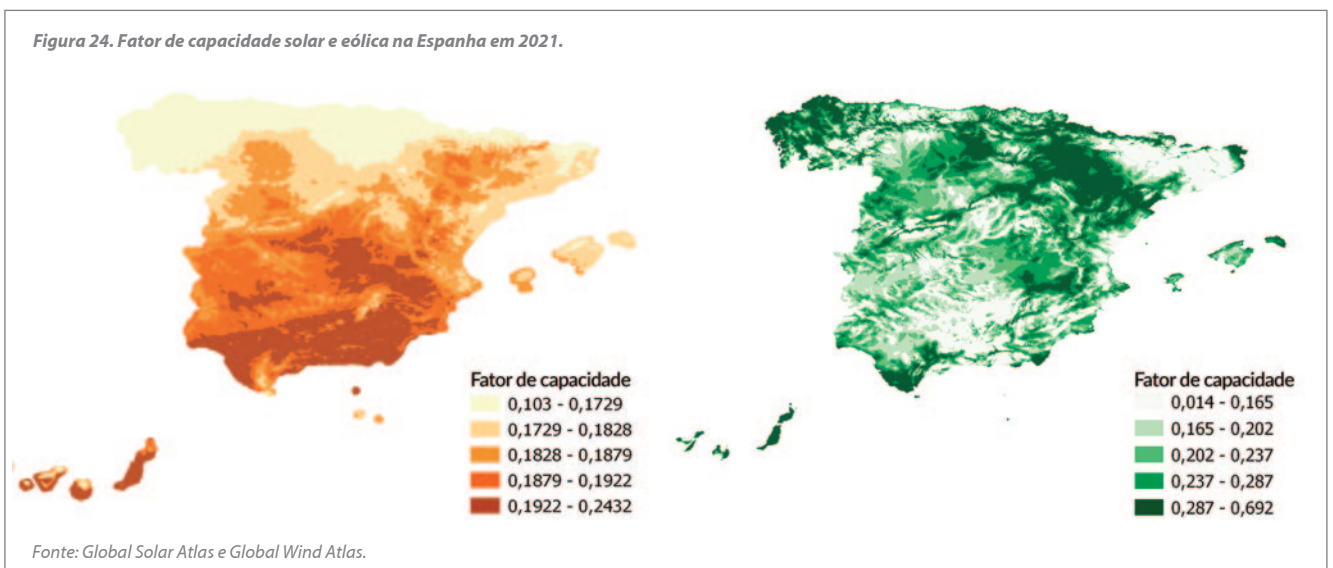


Figura 26. Distância para diferentes fontes de abastecimento de água na Espanha



Figura 27. Índice de Sensibilidade Ambiental (ESI) na Espanha.

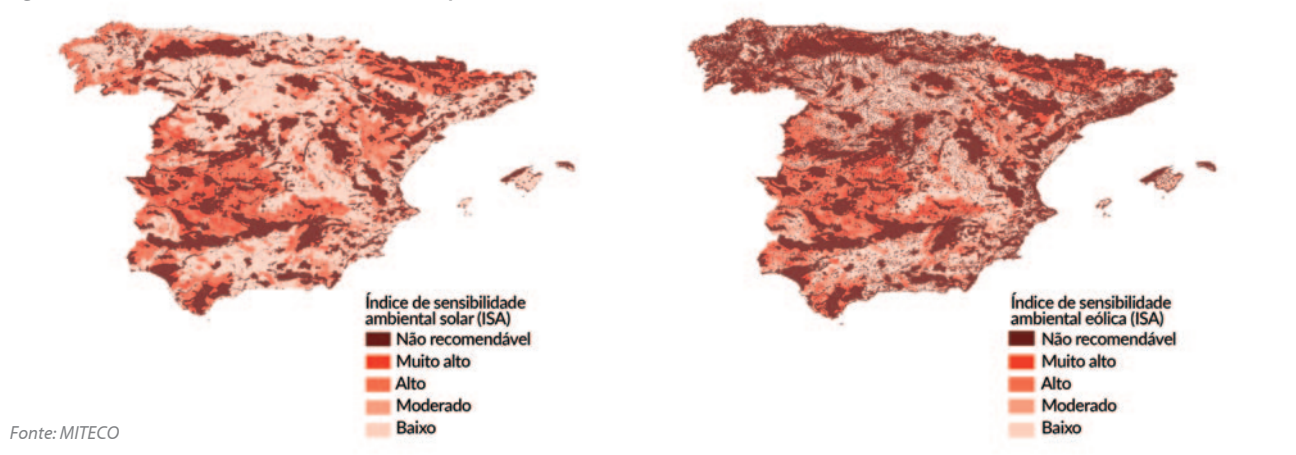


Figura 28. Inclinação do terreno envolvendo locais excluídos.

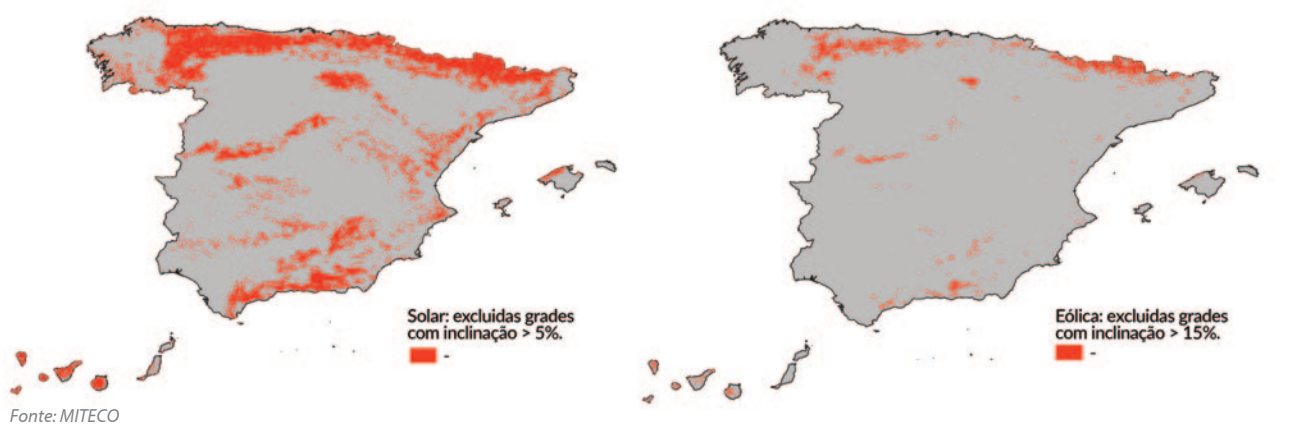


Figura 28. Disponibilidade de terrenos na Espanha.

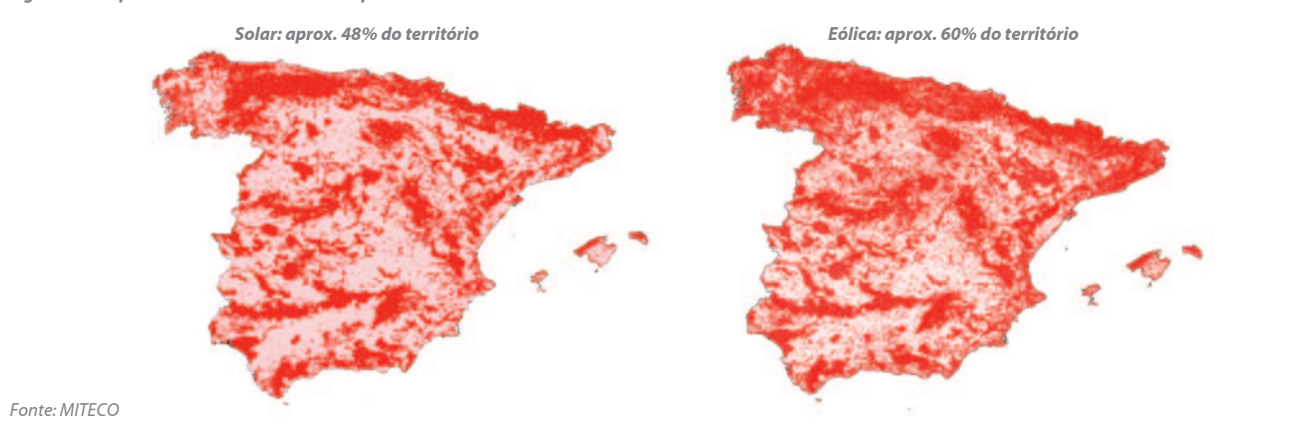
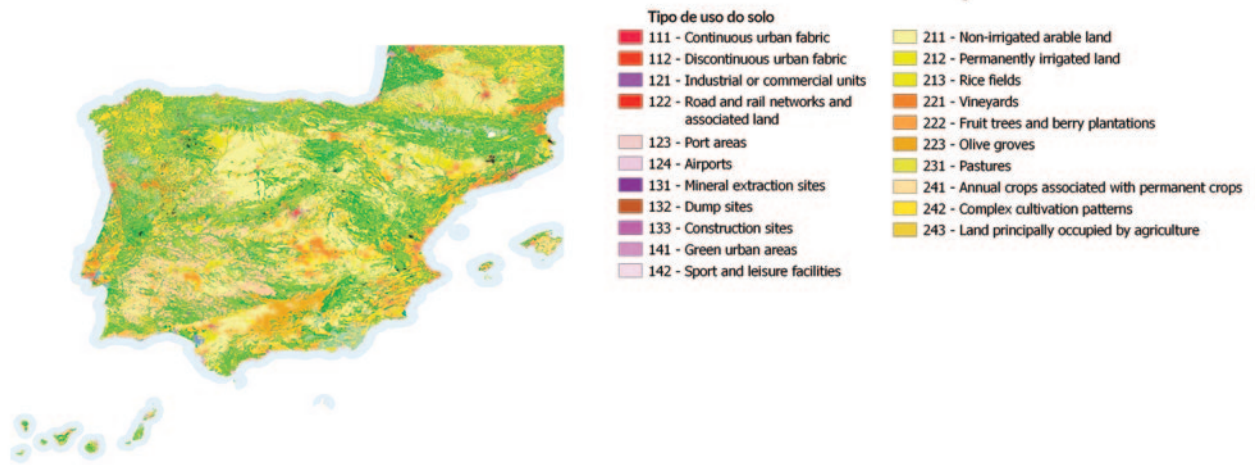


Figura 29. Tipos de solo na Espanha.



Fonte: programa Copernicus

Esse fator é relevante para as plantas de produção de hidrogênio com fontes renováveis dedicadas, uma vez que, nesse tipo de projeto, o estudo de impacto ambiental é um dos processos administrativos mais complexos. Embora o modelo não isente do procedimento de avaliação ambiental relevante, ele permite uma abordagem indicativa desde os estágios iniciais do projeto.

Inclinação do terreno. Com base na literatura científica existente, os locais são excluídos acima de uma determinada inclinação (maior que 5% para a construção de instalações solares e 15% para instalações de energia eólica).

Disponibilidade de terras. Somando os locais excluídos pela ISA com aqueles excluídos pela inclinação, observa-se que aproximadamente 48% dos quadrados da grade seriam excluídos para a produção de hidrogênio com energia renovável dedicada e cerca de 60% para a energia eólica. Esses números refletem áreas que não seriam viáveis para a instalação de plantas dedicadas de geração de hidrogênio renovável devido a restrições ambientais e topográficas.

Tipo de solo. Para cada uma das grades, o tipo de solo é caracterizado de acordo com seu uso (terra seca, terra irrigada, pastagem natural, prado, núcleos urbanos etc.).

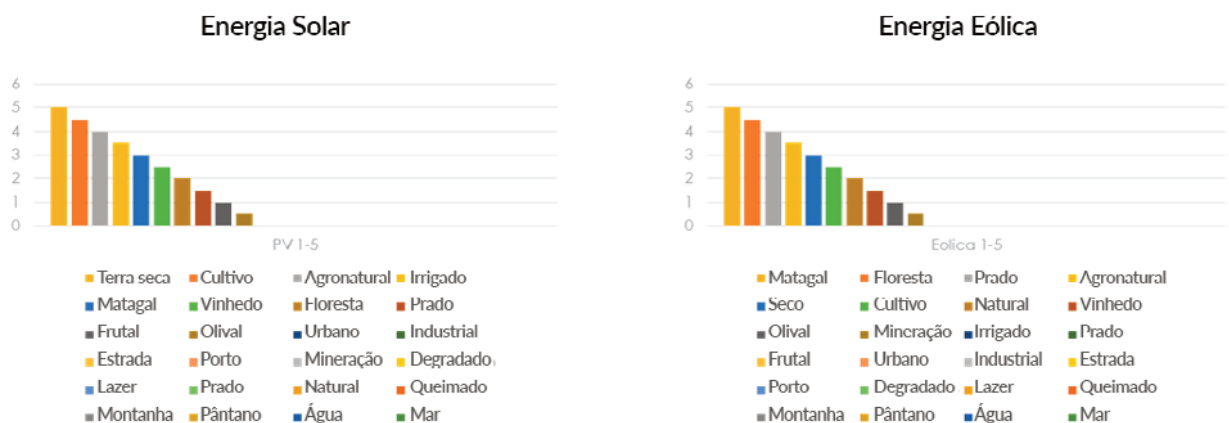
Além disso, os usos estão vinculados à adequação para a construção de parques solares e eólicos e uma pontuação é calculada de 0 a 5, sendo 0 um uso nunca utilizado para tais construções.

Infraestrutura existente

Rede elétrica: distância até as subestações

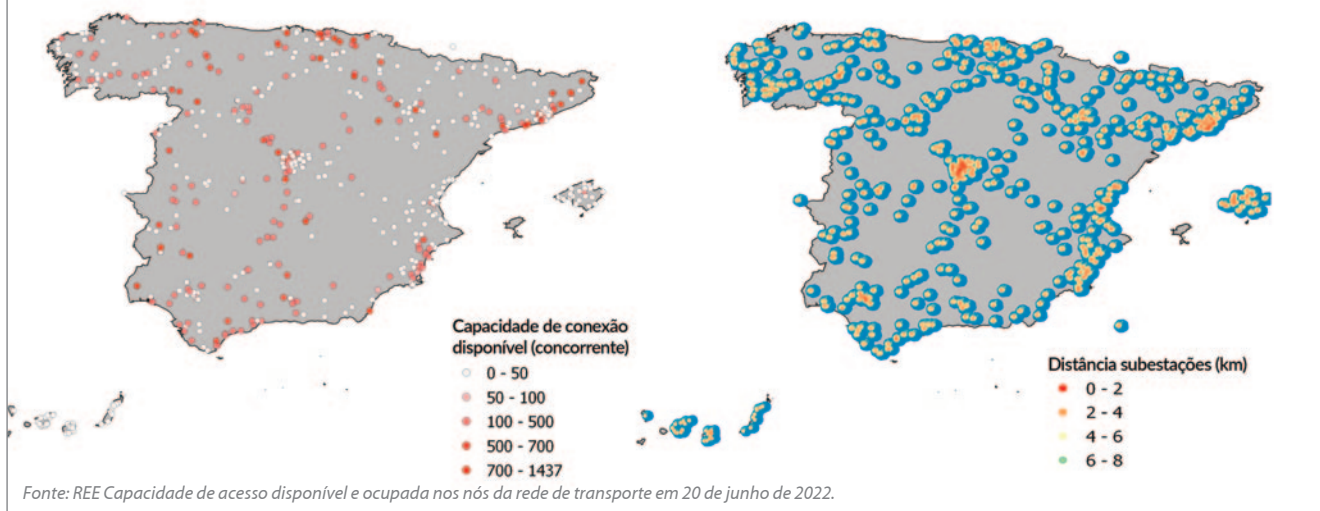
Uma abordagem muito comum em projetos de hidrogênio verde é superdimensionar a planta de produção renovável em relação ao eletrolisador. Por esse motivo, haverá momentos em que o eletrolisador não poderá consumir toda a energia gerada. Nesse caso, o excesso de produção de energia terá de ser alimentado na rede elétrica, sendo a distância até a subestação um critério importante, pois quanto maior a distância, maior o custo e maiores as perdas de eletricidade devido ao transporte.

Figura 30. Classificação do tipo de terreno, dependendo se é para uma instalação solar ou eólica. eólica.



Fonte: Avaliação do banco de dados de uso da terra para a localização e distribuição espacial de energia solar e eólica na Espanha (2018).

Figura 31. Distância até as subestações de eletricidade na Espanha.



Além da distância até uma subestação de eletricidade, a capacidade de conexão para geração disponível em cada nó também pode ser relevante. No exemplo, essas informações são extraídas das publicações mensais feitas pela operadora do sistema (Redeia).

Rede de gás natural: distância até a rede

A distância até a rede de transmissão de gás pode ser uma variável substituta por dois motivos. Em primeiro lugar, porque o blending pode ser um aspecto importante em muitos projetos (embora ainda haja grande incerteza sobre a viabilidade técnica e os limites aceitáveis) e, em segundo lugar, porque se espera que a futura infraestrutura de transporte de hidrogênio siga as mesmas rotas da rede de gás natural existente, sendo uma variável importante no caso de se considerar as possíveis opções de transporte de hidrogênio, como já está sendo visto com a rede de backbone que está sendo considerada.

Rede rodoviária

São incluídas informações sobre a rede rodoviária de acordo com o tipo de estrada (autoestrada, nacional, entre outras) e seu pertencimento à Rede Transeuropeia de Transportes (TEN-T). Tanto para a construção quanto para a operação das usinas, é importante ter uma rede rodoviária próxima. Isso facilitaria o transporte de hidrogênio em caminhões-tanque até os pontos de consumo final.

Potenciais off-takers

Indústria

O modelo considera a distância até os possíveis consumidores de hidrogênio industrial, analisando a existência de indústrias próximas aos locais. Além disso, é feita uma estimativa da demanda potencial de hidrogênio em alguns destas indústrias (refino, amônia, aço, produção de cerâmica, produção de vidro e cimento). Essa estimativa se baseia em informações públicas sobre capacidades de produção, fatores de emissão ou consumo de energia das diferentes instalações.

Transporte marítimo

O hidrogênio e seus derivados, como a amônia ou o metanol, desempenharão um papel fundamental na descarbonização do transporte marítimo. Por esse motivo, foram incluídas informações relevantes sobre os principais portos da Espanha, por exemplo:

- Há informações disponíveis sobre o tráfego e o tamanho dos navios que atracam em cada porto, bem como a demanda por combustível em cada porto.
- Há informações disponíveis sobre a disponibilidade de infraestrutura para exportação de amônia e metanol nos diferentes portos. Com adaptações mínimas, esses portos poderiam fornecer esses combustíveis aos navios

Figura 32. Distância até a rede de gás natural.



Transporte terrestre

É complexo estimar onde e qual será a demanda futura de hidrogênio para a mobilidade terrestre, embora pareça claro que o transporte pesado concentrará a maior demanda de hidrogênio nesse segmento. Por esse motivo, foram incluídas no modelo informações sobre a intensidade do tráfego de veículos pesados nas principais rodovias do país e nos nós de logística existentes ou planejados.

Aplicações do modelo

Esse modelo tem duas aplicações diretas possíveis:

Mapa de camadas/movimentos interativos

A visualização do valor dos diferentes critérios para cada nó ou grade facilita a identificação dos pontos fortes e fracos de diferentes locais. Isso pode facilitar a comparação entre vários locais potenciais previamente definidos ou até mesmo localizar alternativas próximas. Por exemplo, a figura 36 mostra locais adequados para energia eólica e solar, se os seguintes critérios forem selecionados:

Cálculo do índice de compatibilidade com hidrogênio (HCI)

Usando as variáveis definidas acima, o Índice de Compatibilidade H₂ (HCI) pode ser calculado multiplicando-se o valor de cada critério (previamente normalizado) pelo seu peso específico:

$$ICH2 = \sum \text{Critério}_i * \text{Peso_critério}_i$$

Esses pesos podem ser atribuídos por métodos de decisão multicritério, em que especialistas são pesquisados e os pesos são atribuídos usando um método comparativo (por exemplo, processo analítico hierárquico), ou por alocação baseada em

Figura 33. Rede de estradas



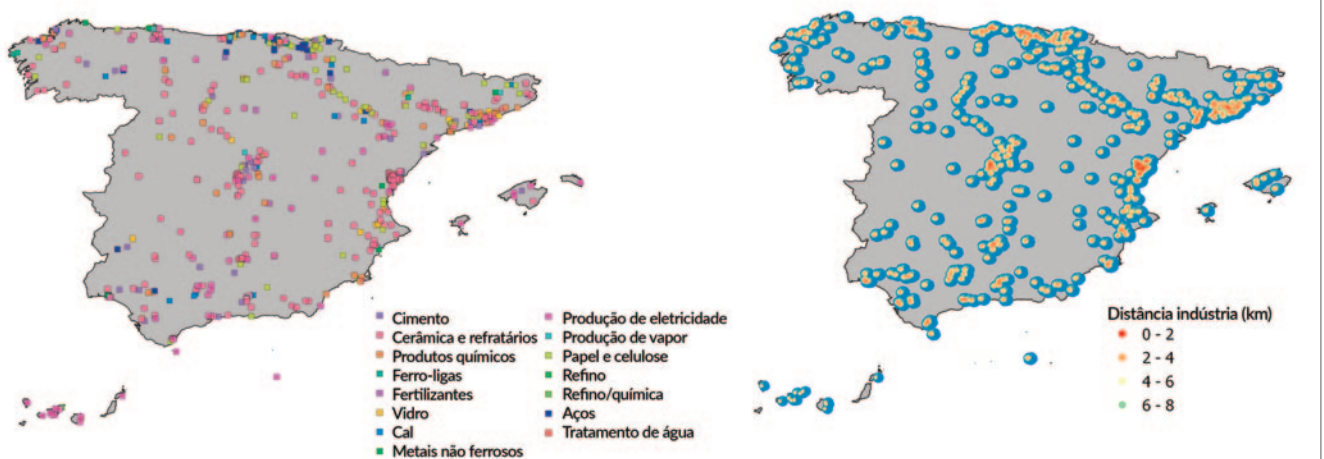
Fonte: MITMA

projetos atuais, atribuindo pesos com base na localização dos projetos existentes. Esses pesos podem ser específicos ao valor, levando em conta as preferências (por exemplo, usina renovável dedicada, diferentes tipos de off-takers, tipo de transporte etc.). Além disso, a ponderação desses critérios, ou a inclusão desses critérios, dependerá de cada caso específico. Por exemplo, no caso da produção de hidrogênio para o transporte marítimo, sem injeção de hidrogênio na rede, o critério de distância dos pontos de injeção de hidrogênio não seria levado em conta.

Exemplos de critérios são:

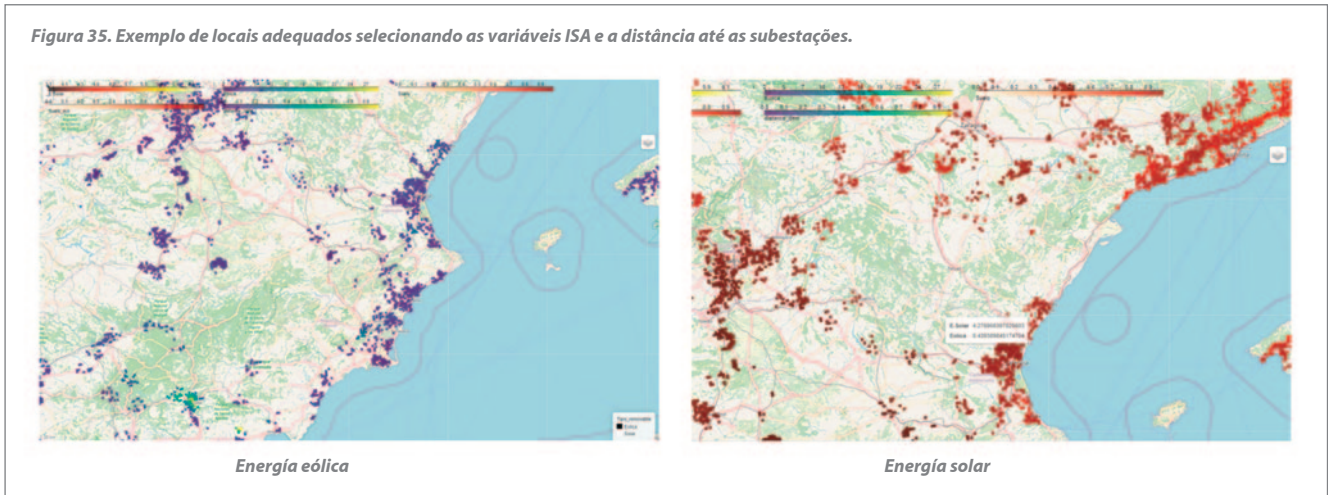
- Fator de capacidade solar/eólica
- Índice de sensibilidade ambiental
- Tipo de terreno (pluvial, irrigado, etc.)
- Distância até as subestações de eletricidade.
- Distância até os pontos de injeção da rede de gás.
- etc.

Figura 34. Consumidores potenciais na Espanha.



Fonte: Registro Europeu de Emissões e Transferências de Contaminantes (E-PRTR).

Figura 35. Exemplo de locais adequados selecionando as variáveis ISA e a distância até as subestações.



Distribuição de projetos existentes

A dinâmica do setor de hidrogênio está experimentando um crescimento sem precedentes na Espanha e na Europa. Como parte de sua missão de disseminar informações, a Cátedra de Estudos Sobre o Hidrogênio criou a plataforma de visualização de projetos de hidrogênio, uma ferramenta que oferece uma visão geral dos projetos de produção de hidrogênio existentes ou planejados na Espanha e em Portugal, incluindo informações relevantes como:

- Status dos projetos.
- Investimento.
- Capacidade de eletrólise.
- Ano de conclusão.
- Esquema de conexão e capacidade instalada de geração renovável (se aplicável).
- Promotor.
- Tipo de off-taker: indústria (por exemplo, amônia, metanol, refino, aço), mobilidade terrestre, mobilidade marítima, entre outros.

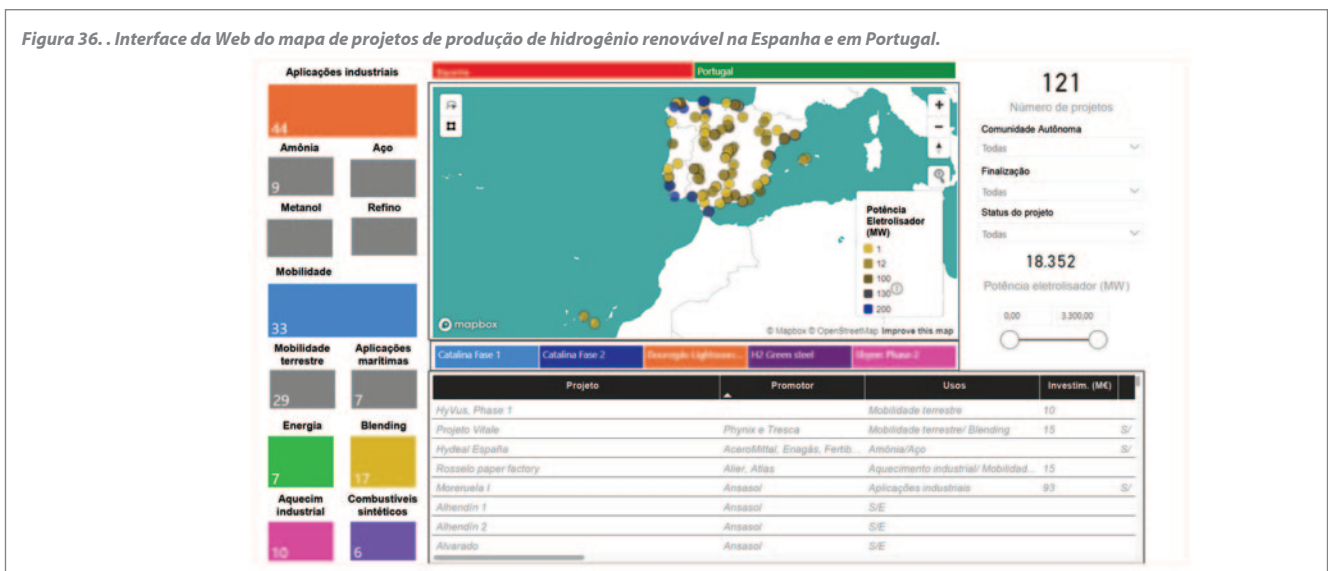
Dessa forma, ele contribui para o cumprimento do Roadmap do Hidrogênio, permitindo o monitoramento do cumprimento de seus objetivos em relação à capacidade de eletrólise, ao número de usinas de hidrogênio, ao número de veículos ou ao investimento.

As informações fornecidas nesses mapas são preparadas usando as melhores informações disponíveis publicamente a partir de fontes de informações externas referenciadas. O mapa é atualizado periodicamente, embora, devido às limitadas informações públicas disponíveis, possa ser impreciso em relação a alguns projetos individuais, mas útil como uma visão geral da implantação da economia do hidrogênio na Espanha.

A ferramenta interativa está disponível na Web . A Figura 38 mostra uma imagem da interface criada.

⁶⁸Cátedra de Estudos Sobre o Hidrogênio: <https://www.comillas.edu/catedra-de-estudios-sobre-el-hidrogeno/mapa-proyectos>

Figura 36. . Interface da Web do mapa de projetos de produção de hidrogênio renovável na Espanha e em Portugal.



Conclusão

“O hidrogênio verde é um elemento fundamental em qualquer estratégia de descarbonização.”

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)⁶⁹



O crescimento contínuo da população mundial e a industrialização progressiva com o objetivo de elevar o padrão de vida dos cidadãos na economia global continuarão a pressionar para cima a demanda de energia nos próximos anos. Para mitigar este efeito e avançar tanto na eficiência como na descarbonização, será necessário impulsionar a inovação e a implementação de novas formas de energia.

O uso de energia renovável pode contribuir para a descarbonização da economia, mas também traz consigo impactos ambientais e desafios em termos de acumulação e armazenamento da eletricidade produzida.

Nesse contexto, o hidrogênio verde emerge como um participante importante na transição para uma economia sustentável e livre de emissões, posicionando-se como uma solução estrutural para lidar com a variabilidade na produção de energia renovável, promovendo a descarbonização de alguns setores que são difíceis de eletrificar ou sendo um componente fundamental em outras aplicações para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Para atender ao cenário NZE, deve haver 850 GW de capacidade instalada de eletrolisadores até 2030, o que é o dobro da capacidade projetada com base nos projetos anunciados atualmente (420 GW). Isso indica que ainda há um longo caminho a percorrer para tornar esse vetor energético um participante importante na transição energética.

Além disso, vale a pena observar que as recentes descobertas de depósitos naturais de hidrogênio branco em várias partes do mundo abriram a possibilidade de o hidrogênio branco também ser uma importante fonte de energia. A coexistência do hidrogênio verde e do hidrogênio branco representa uma abordagem promissora para enfrentar os desafios da transição energética, já que esses dois tipos de hidrogênio podem possibilitar uma abordagem mais diversificada e eficiente para um futuro energético sustentável.

Atualmente, a visão de uma economia baseada em hidrogênio renovável enfrenta desafios importantes que exigem respostas estratégicas e colaborativas que abordem as dificuldades técnicas e econômicas existentes na produção, no transporte, no consumo e na própria estrutura regulatória.

Dada a necessidade de reduzir os custos de produção, o investimento em pesquisa e desenvolvimento é fundamental para superar as barreiras econômicas e tecnológicas que atualmente impedem a geração em larga escala.

Paralelamente, é necessário criar uma demanda sustentável e diversificada para o hidrogênio renovável, promovendo sua adoção em setores como a indústria, o transporte e a geração de energia, entre outros.

A infraestrutura é um elemento essencial no caminho para a economia do hidrogênio. A adaptação e a modernização das instalações existentes, bem como o planejamento de novas infraestruturas, desempenham um papel fundamental. Além disso, a localização estratégica e a eficiência da interconexão são decisivas.

Por outro lado, o estabelecimento de uma estrutura legal e regulatória é essencial para facilitar a produção e a distribuição do hidrogênio. A certificação e os padrões de qualidade, a publicação de estratégias nacionais de hidrogênio com metas específicas de capacidade instalada, o apoio ao investimento e à inovação em tecnologias sustentáveis, a regulação do uso do hidrogênio na rede de gás e a adaptação do hidrogênio como combustível de transporte são ações fundamentais para garantir a sustentabilidade e a transparência em toda a cadeia de suprimentos.

Por fim, ferramentas e aplicativos práticos que podem apoiar a tomada de decisões, como a seleção de locais ideais, facilitam a adoção de novos processos de negócios, como parte da adaptação das empresas a essa nova economia.

Em resumo, o hidrogênio verde ou renovável surge como um pilar essencial na transição para uma economia sustentável, mas somente por meio de esforços colaborativos, investimento em tecnologia e apoio regulatório será possível superar os desafios atuais e liberar todo o seu potencial como um vetor energético transformador.

⁶⁹2022. A UNIDO é uma agência especializada das Nações Unidas, com o mandato de promover, estimular e acelerar o desenvolvimento industrial.

⁷⁰“World’s largest white hydrogen deposit found in France” – World Economic Forum (sep. 2023).

Glossário



Blending: o processo de mistura de diferentes gases em proporções específicas para criar uma mistura de gases com as propriedades e a composição desejadas.

CCfD: Contratos de Carbono por Diferença.

CCUS: Captura, uso e armazenamento de carbono.

WWTP: estações de tratamento de águas residuais.

E-Fuels: combustíveis sintéticos produzidos pela captura de dióxido de carbono da atmosfera e pela conversão desse CO₂ em combustíveis líquidos ou gasosos usando eletricidade renovável.

Eletrólise da água: processo pelo qual uma corrente elétrica separa a molécula de água em duas moléculas de oxigênio e uma molécula de hidrogênio.

FCEV: Veículo elétrico com célula de combustível.

Fotocatálise: processo fotoquímico que envolve a absorção da luz solar por um catalisador ou substrato para realizar reações de oxidação-redução.

Fotoeletrólise: processo fotoquímico que utiliza um eletrodo fotocatalítico, que é um material que absorve a luz solar e também atua como um eletrodo para facilitar a reação de eletrólise para produzir hidrogênio.

Gaseificação de combustível: processo pelo qual o carvão mineral ou a biomassa são queimados em alta temperatura, produzindo H₂, CO, CO₂ e outros gases.

GIS: Sistemas de Informação Geográfica.

GNL: Gás Natural Liquefeito.

IAE: International Energy Agency.

IRENA: International Renewable Energy Agency.

LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carriers.

LCOH: Levelized Cost Of Hydrogen. Oxidação parcial: processo que envolve a combustão incompleta de um combustível fóssil (gás natural, petróleo), produzindo H₂ e CO.

Reforma auto térmica: um processo semelhante à reforma a vapor, mas, nesse caso, o calor necessário para atingir altas temperaturas é obtido sem entrada de energia externa.

Reforma a vapor: um processo no qual o vapor de água é misturado a um combustível fóssil (geralmente gás natural ou petróleo) em alta temperatura. O combustível se decompõe para produzir H₂ e CO₂.

RFNBO: Combustível renovável de origem não biológica.

Termólise: processo térmico para a produção de hidrogênio em que a energia térmica de, por exemplo, fornos solares é usada para dissociar a água termoquimicamente.

Bibliografia



Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources. "Australia to review National Hydrogen Strategy" (2023)

B.E. Lebrouhi, "Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview" (2022)

Balkan Green Energy News, "European parliament votes to raise renewables 2030 target to 45%" (2022)

Carbon capture, utilization and storage (CCUS)

Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Carbon Capture, Usage and Storage" (2022)

Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Hydrogen Investment Roadmap" (2023)

Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Powering Up Britain: Net Zero Growth Plan" (2023)

Department for Transport, "Renewable Transport Fuel Obligation: Compliance Guidance" (2022)

Department for Transport, "Targeting Net Zero" (2022)

DNV, "Maritime Forecast to 2050" (2022)

El escenario 1.5°C es una hoja de ruta propuesta por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)...

Energy Institute, "Statistical Review of World Energy"

Energy Institute, "World Energy Outlook 2022"

Energy Sci Eng: Howarth RW, Jacobson MZ. "How green is blue hydrogen?" (2021)

EU Commission, "A European Green Deal" (2019)

EU Commission, "Acto Delegado de Taxonomía de la UE" (2021)

EU Commission, "Delegated regulation for a minimum threshold for GHG savings of recycled carbon fuels" (2023)

EU Commission, "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023)

EU Commission, "Fit for 55" (2021)

EU Commission, "Hydrogen" (2020)

EU Commission, "IPCEIs on Hydrogen" (2020)

EU Commission, "Preguntas y respuestas sobre el paquete relativo al hidrógeno y al gas descarbonizado" (2021)

EU Commission, "REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition" (2022)

EU Commission, "REPowerEU: Commission steps up green transition away from Russian gas by accelerating renewables permitting" (2022)

EU Commission, "Remarks by Executive Vice-President Vestager on IPCEI in the hydrogen technology value chain" (2022)

European Commission – "Sustainable and Smart Mobility Strategy" (2021)

European Commission, "Delegated regulation on Union methodology for RFNBOs" (2023)

Getting to Zero Coalition, "Mapping of Zero Emission Pilots and Demonstration Projects" (2022)

HM Government, "Developing the UK Emissions Trading Scheme (UK ETS)" (2022)

HM Government, "The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution" (2020)

HM Government, "UK Hydrogen Strategy" (2023)

HyLaw, "EU policy paper" (2019)

IRENA, "Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor" (2022)

IRENA, "Green Hydrogen Cost Reduction" (2020)

IRENA, "Green Hydrogen Overview" (2021)

IRENA, "Transitions Outlook 2023" (2023)

IEA, "Future of Rail" (2019)

IEA, "Global Hydrogen Review 2022" (2022)

IEA, "Global Hydrogen Review 2023" (2023)

IPNA – CSIC, "El origen de los primeros elementos químicos"

Ministerio de Energía, Gobierno de Colombia, "Hoja de Ruta del hidrógeno en Colombia" (2021)

National Renewable Energy Laboratory, "National Renewable Energy Laboratory" (2020)

NATURGY, "Hidrógeno: Vector energético de una economía descarbonizada" (2020)

Presión a la cual las tasas de reacción de formación y descomposición del compuesto son iguales

RED: "Renewable Energy Directive". Aprobada en 2016, es un documento legislativo que define los objetivos de la política energética de la Comunidad Europea en el campo de las energías renovables y el marco legal para su desarrollo

Shell, "Shell Scenarios – Sky: Meeting the goals of the Paris Agreement" (2018)

United Nations, "The Paris Agreement" (2015)

United Nations "2022 Revision of World Population Prospects"

US Department of Energy, "Hydrogen Basics" (2022)

Nosso objetivo é superar as expectativas dos nossos clientes sendo parceiros de confiança

A Management Solutions é uma empresa internacional de serviços de consultoria com foco em assessoria de negócios, riscos, organização e processos, tanto sobre seus componentes funcionais como na implementação de tecnologias relacionadas.

Com uma equipe multidisciplinar (funcionais, matemáticos, técnicos, etc.) de mais de 3.300 profissionais, a Management Solutions desenvolve suas atividades em 44 escritórios (19 na Europa, 21 nas Américas, 2 na Ásia, 1 na África e 1 na Oceania).

Para atender às necessidades de seus clientes, a Management Solutions estruturou suas práticas por setores (Instituições Financeiras, Energia e Telecomunicações) e por linha de negócio, reunindo uma ampla gama de competências de Estratégia, Gestão Comercial e de Marketing, Gestão e Controle de Riscos, Informação Gerencial e Financeira, Transformação: Organização e Processos, e Novas Tecnologias.

No setor de energia, a Management Solutions presta serviços a todos os tipos de empresas - eletricidade, petróleo, gás, petroquímica, etc. - tanto em corporações globais como em empresas locais e órgãos públicos.

David Coca Pérez

Sócio
david.coca@msspain.com

Javier Álvarez García

Sócio
javier.alvarez.garcia@msspain.com

Fernando Ruiz Rodríguez

Sócio
fernando.ruiz@managementsolutions.com

Alba García Sáez

Consultor Sênior
alba.garcia.saez@msspain.com

Rafael Cossent Arín

Co-diretor da Cátedra de Estudos sobre o Hidrogênio
IIT - Universidad Pontificia Comillas
rafael.cossent@iit.comillas.edu

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Cátedra de Estudos de Hidrogênio da Universidade Pontifícia Comillas, a seus codiretores Isabel Figuerola-Ferretti e Rafael Cossent, e a seus curadores, cujos membros são Acerinox, Andersen, BBVA, Carburos Metálicos, Enagás, Fundação CEPESA, Management Solutions e Red Eléctrica de España, por sua contribuição para o desenvolvimento do conhecimento e sua contribuição para a criação e melhoria de mecanismos para converter o hidrogênio em um vetor energético que pode se tornar uma solução eficaz e eficiente para enfrentar os desafios da descarbonização e da segurança energética no contexto atual.

Management Solutions, serviços profissionais de consultoria

Management Solutions s é uma firma internacional de serviços de consultoria focada na assessoria de negócio, riscos, finanças, organização e processos

Para mais informações acesse www.managementsolutions.com

Siga-nos em:     

© Management Solutions. 2023
Todos os direitos reservados.

www.managementsolutions.com

Madrid Barcelona Bilbao Coruña Málaga London Frankfurt Düsseldorf Paris Amsterdam Copenhagen Oslo Stockholm Warszawa Wrocław Zürich
Milano Roma Bologna Lisboa Beijing Istanbul Johannesburg Sydney Toronto New York New Jersey Boston Pittsburgh Atlanta Birmingham Houston
SJ de Puerto Rico San José Ciudad de México Monterrey Querétaro Medellín Bogotá Quito São Paulo Rio de Janeiro Lima Santiago de Chile Buenos Aires