

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).

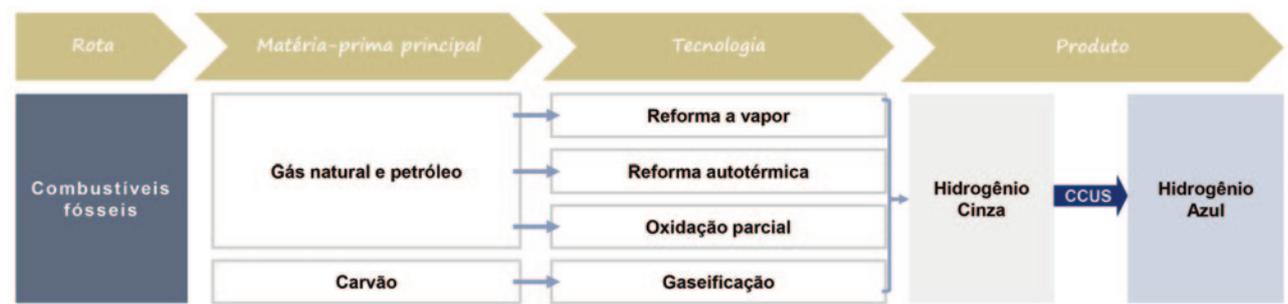
²⁶W. Edwards Deming é um estatístico americano que revolucionou o setor de manufatura, famoso por seus 14 pontos de gerenciamento e pelo ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Verificar, Agir), que se concentrou na melhoria contínua dos processos para aumentar a qualidade e reduzir os custos.

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	Métodos convencionais 	Eletrólise 	Caminhões/ Navios 	Hidrodutos 	Armazém 	Mobilidade 	Setor 	Injeção na rede 
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.

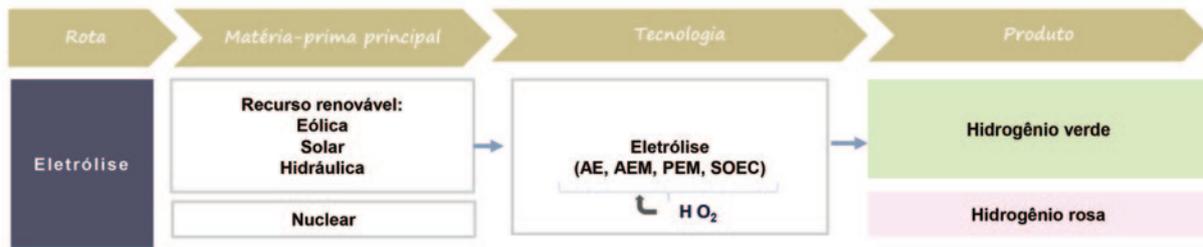
Hidrogênio eletrolítico.

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
	<p>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.</p>	<p>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.</p>	<p>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.</p>
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.

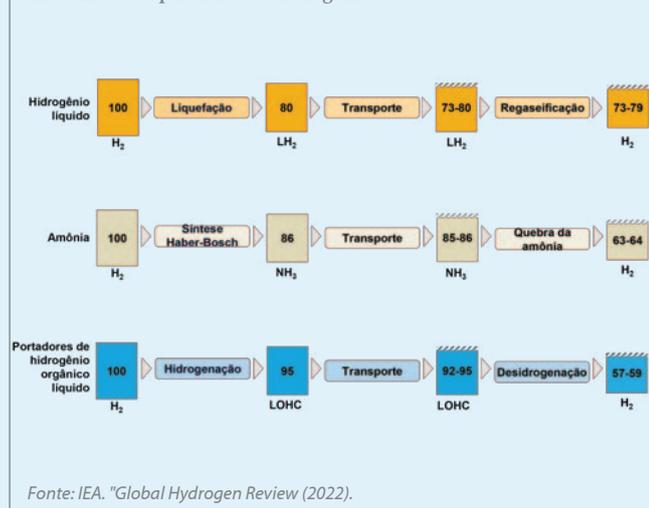
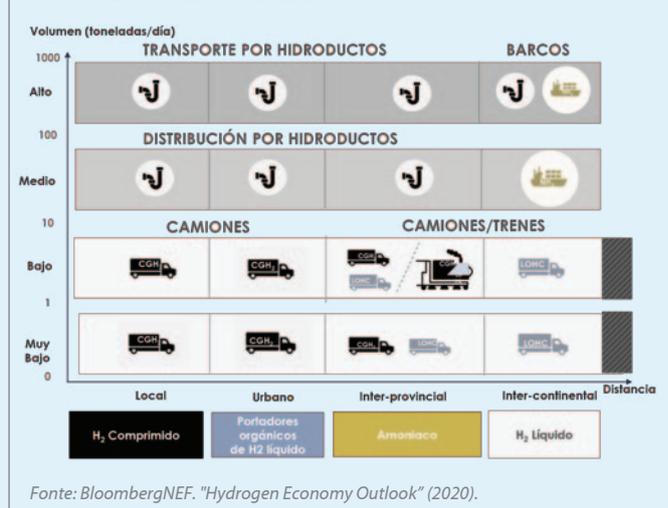


Figura 11. Comparação dos diferentes tipos de transporte de hidrogênio de acordo com o volume e a distância.



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:

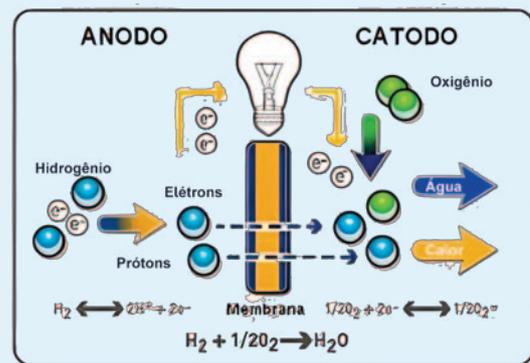
- ▶ Consumidores: principalmente a indústria, o setor de transportes (por exemplo, o setor automotivo), o setor de energia (por exemplo, empresas de petróleo e gás) e outras aplicações em que seu uso dependerá do desenvolvimento do setor.
- ▶ Comercializadoras de hidrogênio: ao longo dos anos, terão 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.