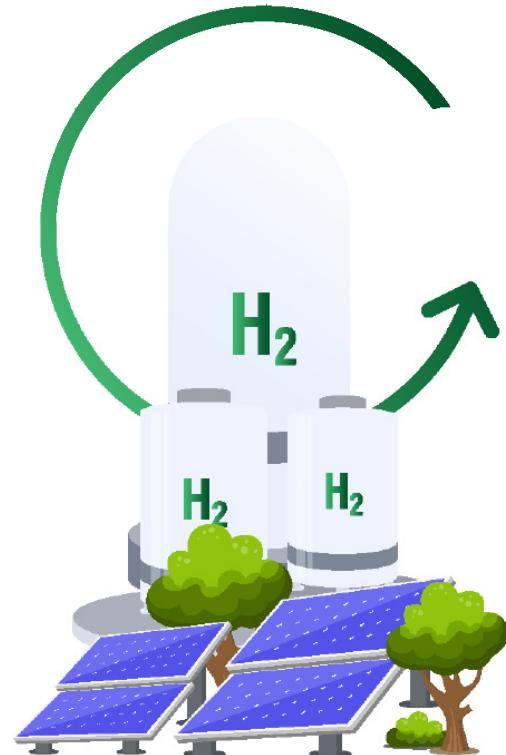




1 O que é hidrogênio verde?

O hidrogênio verde é o termo usado para descrever o hidrogênio produzido a partir de fontes de energia renovável, como a energia solar, eólica, hidrelétrica ou geotérmica, por meio de processos de eletrólise da água. O nome “verde” deriva de sua produção isenta de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes atmosféricos durante o processo de produção, tornando-o uma fonte de energia limpa e sustentável. Para que ele seja obtido, normalmente geram-se energias renováveis através de painéis solares ou turbinas eólicas, para que, com a eletricidade gerada, seja realizada a eletrólise da água.

Esse processo divide a água (H₂O) em seus componentes, hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), por meio de eletrólitos. O hidrogênio resultante é coletado e pode ser armazenado para uso posterior. O recurso é considerado uma alternativa ambientalmente amigável em comparação com o hidrogênio cinza ou azul. O hidrogênio cinza é aquele produzido a partir de fontes de energia fóssil, como o gás natural, enquanto o hidrogênio azul é produzido a partir de fontes de energia fóssil. Ambos os processos podem ser seguidos da captura e do armazenamento de carbono (CCUS) para mitigar as emissões de gases poluentes. Tecnicamente, o hidrogênio não é uma fonte de energia, mas sim um vetor energético, transportador da energia produzida a partir de outras fontes.



2

Quais são algumas das vantagens do hidrogênio verde sobre outras formas de descarbonização da matriz energética internacional?



i) A sua produção é carbono-zero: quando produzido a partir de fontes de energia renovável, como energia solar ou eólica, o hidrogênio verde é uma fonte de energia com emissões líquidas de dióxido de carbono (CO₂) zero. Isso o torna uma opção crucial para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para combater as mudanças climáticas;

ii) A emissão de poluentes locais também é baixa, sem produzir partículas e óxidos de nitrogênio (NO_x)[1]. Isso pode melhorar a qualidade do ar em áreas urbanas e reduzir problemas de saúde associados à poluição do ar.

iii) O hidrogênio pode ser usado como um meio de armazenar energia renovável excedente. Isso ajuda a resolver o problema da variabilidade das fontes de energia renovável[2], permitindo que a energia seja armazenada e usada quando necessário;

iv) A versatilidade do hidrogênio verde permite que ele seja usado em uma ampla variedade de aplicações, incluindo transporte, geração de eletricidade, aquecimento industrial e produção de produtos químicos. Isso o torna uma opção valiosa para setores que são difíceis de eletrificar diretamente; e

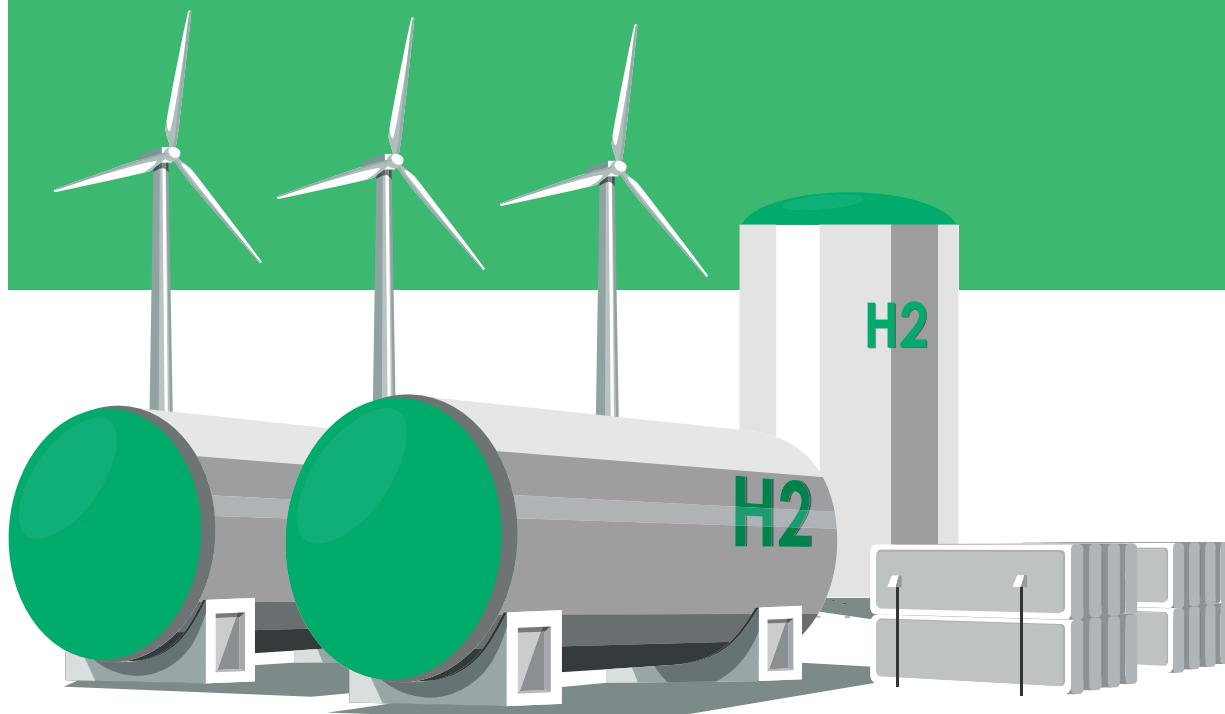
v) As células de combustível de hidrogênio[3] são altamente eficientes na conversão de hidrogênio em eletricidade, superando muitos motores de combustão interna em termos de eficiência energética.

3

Como funciona o armazenamento e o transporte do hidrogênio?

O hidrogênio pode ser armazenado diretamente como gás ou convertido em combustíveis. A seleção do meio de armazenamento é definida a partir da disponibilidade de recursos geológicos e pela duração e escala de armazenamento desejados. Para aplicações em menor escala, tanques de armazenamento podem ser utilizados. Porém, para grandes quantidades de hidrogênio, podem ser empregadas cavernas de sal. Devido ao gás possuir baixa densidade de energia por volume, maior espaço de armazenamento é necessário para o mesmo conteúdo energético, em comparação com outros combustíveis. Para contornar essa limitação, o recurso é convertível em combustíveis e matérias-primas como amônia, transportadores de hidrogênio orgânico líquido, hidrocarbonetos sintéticos ou combustíveis líquidos sintéticos, armazenáveis em tanques e transportáveis por longas distâncias.

O projeto European Hydrogen Backbone é um exemplo de iniciativa voltada para a criação de uma infraestrutura integrada para o fornecimento de hidrogênio por gasodutos. A iniciativa conta com 31 operadores de infraestruturas dedicadas à produção do recurso e pretende interligar 25 países do continente, almejando ter 53.000km de tubulação em 2050[4]. Empresas como a dinamarquesa Haldor Topsøe, estabelecida no mercado de hidrogênio verde, focam na busca por soluções em transporte de hidrogênio comprimido por via rodoviária, utilizando caminhões apropriados após o processo de reforma do gás próprio da empresa, denominado HTCR (Haldor Topsøe Convection Reformer)[5]. A francesa Air Liquide, por sua vez, é hoje a administradora do maior dos três gasodutos dedicados ao hidrogênio na Alemanha. A estrutura de 240km é responsável por abastecer a atividade industrial na região do Ruhr, contribuindo para a descarbonização do setor[6].



4 Como o hidrogênio verde se insere em um contexto de transição energética?

O hidrogênio verde desempenha um papel importante em um contexto de transição energética devido à sua capacidade de ser uma fonte de energia limpa e versátil, tais como:



i) Armazenamento de energia renovável: o hidrogênio verde pode ser usado para armazenar o excesso de energia gerada a partir de fontes renováveis variáveis, como energia solar e eólica. Isso ajudaria a solucionar a questão da disponibilidade irregular dessas fontes de energia;

ii) Descarbonização de setores hard-to-abate: setores como transporte de longa distância, aviação e indústrias pesadas, considerados difíceis de eletrificar diretamente, podem se beneficiar do recurso como uma fonte de energia limpa. As células de combustível de hidrogênio podem fornecer uma fonte de energia limpa e eficiente para esses veículos, reduzindo as emissões de poluentes locais e gases de efeito estufa, especialmente em trens, navios e aeronaves. A indústria, em particular a indústria pesada, como a metalurgia, a de fabricação de vidro, cimento e produtos químicos, pode se beneficiar do hidrogênio verde como alternativa mais limpa ao uso de combustíveis fósseis em processos industriais;

iii) Integração com redes de gás natural: pode ser misturado com o gás natural em redes de distribuição, ajudando a reduzir as emissões de CO₂ associadas ao uso desse combustível. Isso pode ser uma etapa intermediária na transição para uma rede de gás mais limpa e, eventualmente, a substituição completa por hidrogênio verde;

iv) Fabricação de produtos químicos sustentáveis: o hidrogênio verde também pode ser usado como matéria-prima de produtos químicos, reduzindo as emissões de carbono. A substituição do hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis pelo hidrogênio verde pode ajudar a reduzir as emissões no setor químico.

5

Quais são os maiores desafios em termos de custos para o hidrogênio verde?

Os desafios em termos de custos para o desenvolvimento e a adoção em larga escala do hidrogênio verde como fonte de energia sustentável se dividem em algumas categorias:



i) Custo de produção: o processo de eletrólise da água é temporariamente mais custoso pois trata-se de uma nova tecnologia. Isso se deve aos custos dos eletrodos, membranas e eletrólitos utilizados no processo. Esses custos se dividem em fornecimento de energia, água e purificação, além de controle de pH e processamento do hidrogênio. A IRENA aponta que este processo é responsável por boa parte do custo de produção, mas com maior tendência de queda devido à escalabilidade e à tendência de queda nos custos de energias renováveis[7];



ii) Eficiência: entre 30 e 35% da energia elétrica usada na eletrólise é perdida na forma de calor, o que reduz a eficiência geral do processo. Melhorar a eficiência da eletrólise é essencial para reduzir os custos operacionais. Por outro lado, o Alternative Fuels Data Center, do Departamento de Energia americano, afirma que a eficiência de uma célula a combustível acoplada a um motor elétrico pode ser três vezes superior a um motor a combustão movido a gasolina[8];



iii) **Custos de infraestrutura:** a construção de infraestrutura para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde pode ser dispendiosa. Isso inclui a instalação de sistemas de eletrólise, tanques de armazenamento, tubulações de transporte e postos de abastecimento. A expansão dessa infraestrutura requer grandes investimentos, o que é importante para o desenvolvimento de uma indústria nacional em um momento inicial;



iv) **Escalabilidade:** escalar a produção de hidrogênio verde pode ser um desafio, pois requer investimentos substanciais em capacidade de produção, o que, por sua vez, necessita de um ambiente de mercado favorável e comprometimento de recursos;



v) **Custos de energias renováveis:** o custo da energia renovável usada para alimentar a eletrólise da água é um fator crítico, pois representa cerca de metade dos gastos de todo o processo. Embora os custos gerais no setor eólico e solar tenham diminuído muito nos últimos anos, eles ainda podem variar e afetar a viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde;



vi) **Armazenamento:** o armazenamento de hidrogênio é complexo e pode ser caro. Encontrar métodos eficientes e econômicos de armazenamento de hidrogênio é importante para lidar com flutuações na oferta e na demanda;



vii) **Transporte e distribuição:** o transporte e a distribuição de hidrogênio também podem ser custosos, especialmente se não houver infraestrutura de transporte de hidrogênio disponível. O transporte de hidrogênio em forma líquida ou gasosa requer tubulações, caminhões-tanque ou navios especiais. O avanço tecnológico em curso é imprescindível para se viabilizar especialmente o abastecimento dos setores de maior aproveitamento potencial do consumo do hidrogênio, como os de transporte de carga e a indústria pesada. Somente com investimentos em gasodutos e em transporte de hidrogênio comprimido será possível conectar a produção aos consumidores;



viii) **Certificação e regulamentação:** estabelecer padrões de qualidade e segurança para o hidrogênio verde e garantir a conformidade regulatória pode aumentar os custos.

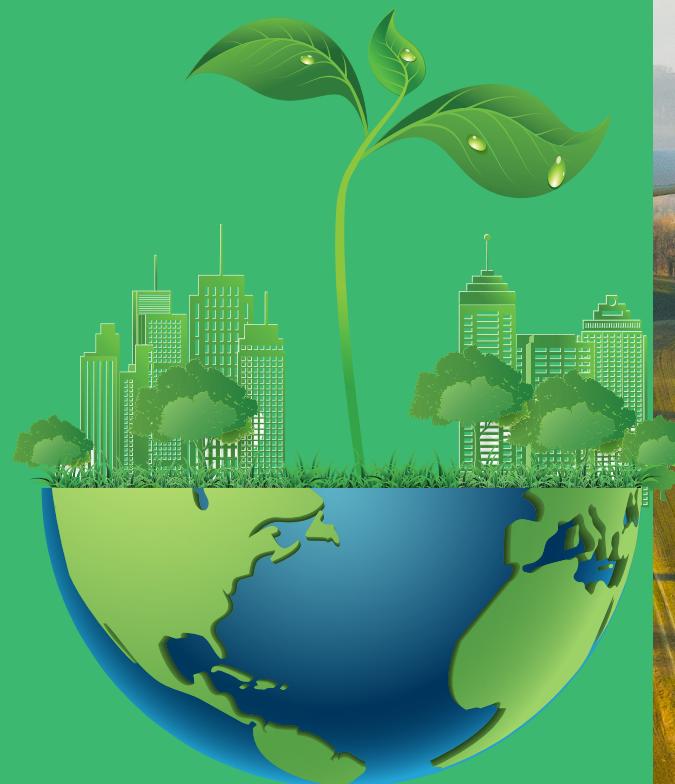


6

Como alguns atores internacionais estão estabelecendo suas indústrias de hidrogênio verde?

Atualmente, muitos atores internacionais possuem estratégias voltadas para o desenvolvimento do hidrogênio verde, como a África do Sul, a Austrália, o Canadá, o Chile, a Colômbia, os Estados Unidos, a Índia e o Japão. A União Europeia (UE) pretende produzir 10 milhões de toneladas e importar mais 10 milhões de toneladas de hidrogênio verde até 2030. Isso representará quase 14% da eletricidade total da UE em 2030. Em 2023, a Presidente da Comissão, Ursula von der Leyen, anunciou a criação do Banco Europeu de Hidrogênio. O objetivo do Banco é investir na área e ligar o fornecimento futuro de hidrogênio renovável ao objetivo de demanda de 20 milhões de toneladas de hidrogênio renovável. O Banco de Hidrogênio decorre dos objetivos do Green New Deal e da Lei da Indústria Net-Zero. Ainda no contexto europeu, é importante destacar o projeto H2Haul[9], parte do Programa Europeu de Incentivo ao Hidrogênio Limpo, voltado para o desenvolvimento de caminhões a hidrogênio para o transporte de carga de longa distância.

Através do Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R)[10], o Japão está desenvolvendo um projeto de produção de hidrogênio verde usando energia solar, como parte de seus esforços para recuperar a área afetada pelo desastre nuclear de Fukushima. No Reino Unido, o projeto Green Hydrogen for Glasgow[11] procura consolidar a produção de hidrogênio verde na Escócia usando energia eólica offshore e a construção de uma infraestrutura de transporte e armazenamento de hidrogênio. A Dinamarca também possui empreendimentos como o H2RES[12], que desenvolve um grande projeto de eletrólise de alta temperatura para produção de hidrogênio verde a partir de energia eólica offshore. Nos Estados Unidos, há diferentes iniciativas, como o H2@Scale[13], capitaneado pelo Departamento de Energia, para explorar o uso de hidrogênio verde em setores industriais e energéticos, incluindo a produção de aço e a geração de energia.





7

Como o Brasil se insere no mercado de hidrogênio verde?

O começo dos projetos brasileiros na área do hidrogênio data da época dos choques do petróleo, na década de 1970. Em 1975, criou-se o Laboratório do Hidrogênio (LH2)[14] na UNICAMP, buscando o amadurecimento de projetos voltados para a obtenção de hidrogênio de diferentes fontes.

Com o avanço da pesquisa no país, lançou-se em 2002 o “Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Células a Combustível” (ProCaC)[15], posteriormente transformado no “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2)[16]. Recentemente, o governo federal publicou o “Plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018-2022”, com metas para o quadriênio. Em 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou o documento “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio”[17], antecedendo a recente consulta pública do Plano Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio[18] promovida pelo Ministério de Minas e Energia.

Os ganhos de escala obtidos no campo das energias renováveis no Brasil têm sido favoráveis para a produção do hidrogênio verde. Por possuir recursos renováveis abundantes, o país é dotado de um diferencial para que se produza hidrogênio verde de maneira limpa e sustentável através da eletrólise da água. Da mesma forma, a expertise brasileira no campo da biomassa também é aplicável na produção de hidrogênio por meio de gaseificação e reforma a vapor.

8

É possível aproveitar gasodutos existentes para o transporte de hidrogênio?

O hidrogênio verde pode ser transportado em alguns tipos de gasodutos convencionais. A maioria dos gasodutos existentes podem suportar um percentual de hidrogênio no produto que transportam. A quantidade de hidrogênio que pode entrar em um duto de gás natural depende de uma série de fatores, como a pressão no tubo, o desgaste e a composição do tubo, e quais revestimentos anticorrosivos o tubo usa no interior, mas existem milites técnicos. Para superar o limite de 30%, por exemplo, a tubulação deve ser adaptada ou reconstruída. Em planos como o RePowerEU[19], da Comissão Europeia, planeja-se a construção de novos gasodutos conversíveis para transportar gás natural em um primeiro momento e hidrogênio, após a adoção do recurso como vetor energético em grande escala.



**9**

Quais avanços recentes em pesquisa e desenvolvimento estão contribuindo para melhorar a eficiência e a sustentabilidade da produção de hidrogênio verde?

A pesquisa e o desenvolvimento estão desempenhando papel fundamental na melhoria da eficiência e da sustentabilidade da produção de hidrogênio verde. Nos últimos anos, vários avanços foram alcançados. A tecnologia de eletrólise passou por melhorias na eficiência e na durabilidade das células eletrolíticas usadas na produção de hidrogênio por eletrólise da água. A pesquisa focada na eletrólise de alta temperatura, acima da eletrólise convencional, também garantiria a elevação da eficiência do processo e a redução dos custos de produção.

Avanços também são observados nas tecnologias de armazenamento de hidrogênio, incluindo materiais de armazenamento sólidos e líquidos, assim como abordagens avançadas de adsorção e compressão. A queda contínua dos custos de energia solar e eólica também tem sido fundamental para tornar a produção de hidrogênio verde mais acessível e sustentável. Novas técnicas de armazenamento e transporte estão sendo desenvolvidas para minimizar as perdas de hidrogênio, que podem ocorrer devido à sua natureza molecular pequena. Outro avanço diz respeito à integração do hidrogênio às redes de gás natural, buscando o aproveitamento de infraestrutura pré-existente para o transporte do recurso.

10

Como as tecnologias de células de combustível de hidrogênio estão sendo adotadas em veículos de transporte?



As tecnologias de células de combustível de hidrogênio estão sendo adotadas como alternativa aos motores de combustão interna e aos veículos elétricos a bateria. Essas oferecem vantagens como emissões zero de poluentes locais, maior eficiência energética e tempos de recarga mais curtos em comparação com baterias elétricas. As células de combustível de hidrogênio podem ser usadas tanto em veículos leves, como carros de passageiros, quanto em veículos pesados, como caminhões, ônibus e trens.

Diferentes fabricantes de automóveis, como Toyota[20] e Hyundai[21], possuem carros movidos a hidrogênio sendo comercializados, enquanto a Honda está começando as vendas para seu primeiro carro do tipo[22]. Em algumas regiões, trens e ônibus movidos a hidrogênio já estão em operação. Eles são usados em transporte público e oferecem vantagens de baixas emissões e baixa emissão de ruído no meio urbano. Para que se amplie a implementação de veículos movidos a hidrogênio, é necessária a construção de uma infraestrutura de abastecimento, envolvendo a criação de postos de hidrogênio semelhantes a postos de gasolina. Em comparação com veículos a bateria elétrica, veículos movidos a hidrogênio oferecem vantagens em termos de desempenho, como tempo de recarga mais curto e maior autonomia devido à natureza das células a combustível.

[1] Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, os principais poluentes do ar são o monóxido de carbono, ferro, óxidos de nitrogênio, materiais particulados, dióxido de enxofre e componentes orgânicos voláteis. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10006ZO.PDF?Dockey=P10006ZO.PDF>

[2] A intermitência na produção de energias limpas se refere à flutuação natural e não controlável na geração de energia a partir de fontes renováveis, como a energia solar e eólica. Essa intermitência ocorre devido às características variáveis dessas fontes de energia, que dependem de fatores climáticos e meteorológicos, afetando a produção ao longo do mesmo dia e das estações. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11257>

[3] Uma célula a combustível é um dispositivo eletroquímico que converte a energia química de uma reação entre um combustível e um oxidante diretamente em eletricidade e calor. Ela funciona de maneira semelhante a uma bateria, mas difere no fato de que requer uma alimentação contínua de combustível e oxidante para operar, tornando-a uma fonte de energia contínua. <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell>

[4] <https://academic.oup.com/ce/article/7/1/190/7126621>

[5] <https://www.topsoe.com/processes/hydrogen>

[6] <https://academic.oup.com/ce/article/7/1/190/7126621>

[7] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6

[8] https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.html

[9] <https://www.h2haul.eu/>

[10] https://www.japan.go.jp/kizuna/2021/03/hydrogen-production_facility.html

[11] <https://itm-power.com/projects/green-hydrogen-glasgow#:~:text=The%20facility%20aims%20to%20supply, and%20back%20again%20each%20day.>

[12] <https://stateofgreen.com/en/solutions/h2res-green-hydrogen-production/>

[13] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>

[14] <https://portal.ifi.unicamp.br/component/content/article/71-portal/portugues/ifgw/historia-do-ifgw/208-as-pesquisas-sobre-fontes-alternativas-de-energia>

[15] <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/977/1/9804%20-%20Sistemas%20c%c3%a9lulas%20a%20combust%c3%advel%20programa%20brasileiro%20PROCaC.pdf>

[16] <https://www.h2verdebrasil.com.br/no-brasil/>

[17] [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf)

[18] https://antigo.mme.gov.br/pt/web/guest/servicos/consultas-publicas?p_p_id=consultapublicammeportlet_WAR_consultapublicammeportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_consultapublicammeportlet_WAR_consultapublicammeportlet_view=detalharConsulta&resourcePrimKey=3679250&detalharConsulta=true&entryId=3679252

[19] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230>

[20] <https://www.toyota.co.uk/hydrogen>

[21] <https://www.hyundai.com/uk/en/models/nexo.html>

[22] <https://global.honda/en/stories/057/>





ABIHV
Associação Brasileira da Indústria
do Hidrogênio Verde

contato@abihv.org.br 
abihv.org.br 

 @abihv_br
 company/abihv
 abihv_