



Novos Cadernos NAEA

v. 26, n. 1 • jan-abr. 2023 • ISSN 1516-6481/2179-7536



HIDROGÊNIO VERDE: A FONTE DE ENERGIA DO FUTURO

GREEN HYDROGEN: THE ENERGY SOURCE
OF THE FUTURE

Daniela Mueller de Lara  

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS)

Marc François Richter  

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS)

RESUMO

O hidrogênio está disponível em abundância, sendo obtido a partir de energias renováveis como meio de armazenamento de energia. Cada quilograma de hidrogênio contém aproximadamente 2,4 vezes mais energia do que o gás natural e produz zero emissões de gases de efeito estufa. A partir de uma perspectiva teórica utilizando pesquisa bibliográfica nas bases de dados Scopus, SciELO e via Google Acadêmico, este artigo buscou analisar o potencial de aplicação e uso do hidrogênio verde como fonte de energia ao futuro. Constatou-se que o hidrogênio produzido de forma ambientalmente correta, permite reduzir significativamente as emissões de CO₂, especialmente na indústria e nos transportes, onde a eficiência energética e uso direto da eletricidade por energias renováveis não são suficientes. Concluiu-se que os países com participação considerável de energias renováveis na “carteira” energética têm uma vantagem de custo na produção de hidrogênio verde e os países com grande capacidade de geração de energia solar e eólica e infraestrutura de gasodutos são capazes de desenvolver uma infraestrutura de hidrogênio verde com custos acessíveis.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Transição energética. Desenvolvimento sustentável. Descarbonização.

ABSTRACT

Hydrogen is abundantly available and is obtained from renewable energy as an energy storage medium. Each kilogram of hydrogen contains approximately 2.4 times more energy than natural gas and produces zero greenhouse gas emissions. From a theoretical perspective using literature research in the Scopus, SciELO and Google Academic databases, this article sought to analyze the potential for application and use of green hydrogen as an energy source for the future. It was found that hydrogen produced in an environmentally correct way permits a significant reduction of CO₂ emissions, especially in industry and transport, where energy efficiency and direct use of electricity by renewable energy are not sufficient. It is concluded that countries with considerable share of renewables in the energy “portfolio” have a cost advantage in green hydrogen production, and countries with large solar and wind power generation capacity and pipeline infrastructure are able to develop an affordable green hydrogen infrastructure.

Keywords: Green hydrogen. Energy transition. Sustainable development. Decarbonization. Versatile energy.

1 INTRODUÇÃO

Nosso modo de vida tem uma demanda crescente de energia. As últimas estimativas da Agência Internacional de Energia (AIE), publicadas no final de 2019, preveem que a demanda global de energia aumentará entre 25% e 30% até 2040, o que, em uma economia, ainda muito dependente do carvão e do petróleo, significaria mais dióxido de carbono (CO_2), exacerbando as mudanças climáticas (CH2V, 2019). Entretanto, a descarbonização do planeta sugere um mundo diferente em 2050: um mundo mais acessível, eficiente e sustentável, impulsionado por energias limpas e renováveis, como, por exemplo, o hidrogênio verde (SILVEIRA; OLIVEIRA, 2021). Desta forma, a descarbonização do planeta é uma das principais metas dos países.

Segundo especialistas, o hidrogênio verde poderia representar cerca de um quarto do mercado energético mundial até 2050, possuindo um enorme potencial para impulsionar a transição energética. Além disso, é visto como um portador de energia limpa e continua sendo uma solução muito ecológica para o planeta (KOVAČ; PARANOS; MARCIUŠ, 2021).

Algo em torno de 75% de nosso sistema solar é composto por hidrogênio. O hidrogênio está sendo cada vez mais discutido em relação à transição energética e a recuperação e proteção climática. No futuro, espera-se que o gás hidrogênio (H_2), um gás incolor e inodoro, desempenhe um papel cada vez mais importante em setores econômicos, tais como: transporte, indústria, construção e geração de energia (SILVA, 2016).

O hidrogênio, também chamado de gás hidrogênio ou gás ultraleve, é composto por dois átomos de hidrogênio ligados através de uma ligação covalente, sendo o átomo mais leve da tabela periódica. Com a fórmula química H_2 , é visto por especialistas, e em combinação com eletricidade de origem “verde”, como uma grande fonte de esperança para alcançar as metas climáticas em diversos países. Historicamente, em 1874, Jules Verne profetizou em seu romance *A Ilha Misteriosa* que a água seria o carvão do futuro (VERNE, 1982). Até agora, porém, a fonte de energia ambientalmente correta não foi capaz de se estabelecer como um produto amplamente usado. Se acredita que isso pode mudar nos próximos anos (RYABCHUK *et al.*, 2016).

O hidrogênio tem uma relação de longa data como combustível. Este gás tem sido utilizado para abastecer carros, dirigíveis e naves espaciais, desde o início do século XIX. Os primeiros dirigíveis funcionaram a base

de gás hidrogênio para por ser um gás leve. Normalmente, ele era gerado durante o processo de enchimento, reagindo ácido sulfúrico com limalhas de metal como, por exemplo, limalha de ferro usado no final do século XVIII no primeiro voo de um balão de hidrogênio em 1783. Depois de uma série de desastres com dirigíveis na década de 1930, especialmente o desastre do Hindenburg, em 6 de maio de 1937, em Lakehurst (Nova Jersey, EUA) (ALMEIDA, 2018), o hidrogênio deixou de ser usado, sendo substituído por hélio, um composto não inflamável e por ter aproximadamente 90% da capacidade de impulsão do hidrogênio.

O hidrogênio está disponível em abundância, mas principalmente na forma de moléculas covalentes, em combinação com diversos outros elementos. Isto torna a produção de gás hidrogênio cara, necessitando quantidades intensivas em energia. Todavia, um processo muito comum para sua produção é a eletrólise. Com a ajuda da corrente elétrica, a molécula água (H_2O) é transformada em gás hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). Caso esta eletricidade, necessário para o referido processo, provém exclusivamente de fontes renováveis, tais como da energia eólica ou solar, o produto é chamado de “hidrogênio verde” (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Cada quilograma de hidrogênio contém cerca de 2,4 vezes mais energia do que o gás natural. Além disso, a única entrada necessária para liberar essa energia é o oxigênio e a única saída é a água. Isto significa que, como fonte de energia, o hidrogênio produz zero emissões de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que a combustão do hidrogênio produz água e, desta forma, a sua queima não contribui para a liberação de GEE, conforme elucidada a reação de combustão do hidrogênio mostrada na Equação 1. Destaca-se que a energia liberada pela queima do hidrogênio é de (242kJ/mol 121kJ/g ou 242 kJ/mol).



Posto isso, a partir de uma perspectiva teórica, este artigo buscou analisar o potencial de aplicação e uso do hidrogênio verde como fonte de energia para o futuro. Sendo assim, apresenta-se uma abordagem sobre a produção do hidrogênio, seguido de uma perspectiva do hidrogênio como elemento chave para a transição energética, bem como de uma discussão sobre o hidrogênio verde no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), no Brasil e no mundo.

Assim, a partir de uma perspectiva teórica utilizando a metodologia de pesquisa bibliográfica nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2022), SciELO (SCIELO, 2022), e uma busca via Google Acadêmico (GOOGLE ACADÊMICO, 2022), este artigo buscou analisar o potencial de aplicação e uso do hidrogênio verde como fonte de energia para o futuro.

2 COMO O HIDROGÊNIO É PRODUZIDO?

Segundo Athilan *et al.* (2021), a demanda global de hidrogênio deverá aumentar de aproximadamente 70 milhões de toneladas em 2019 para 120 milhões de toneladas em 2024. Todavia, uma ampla gama de recursos está disponível para a produção de hidrogênio, principalmente combustíveis fósseis e renováveis (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020). O primeiro é o mais maduro e mais comumente utilizado industrialmente, pois é um método rentável que emprega o craqueamento ou a reforma de combustíveis fósseis. Em 2016, a produção global de hidrogênio foi de cerca de 85 milhões de toneladas utilizadas em petróleo, indústria metalúrgica, fertilizantes, processamento de alimentos, produção de semicondutores, usinas e gerações (EL-EMAM; ÖZCAN, 2019).

Existem diversas formas de extrair o gás hidrogênio a partir de fontes naturais contendo hidrogênio, sejam eles hidrocarbonetos ou não hidrocarbonetos; trata-se de métodos fotônicos, elétricos, químicos, bioenergéticos, a base de calor ou uma combinação desses métodos (EL-EMAM; ÖZCAN, 2019). A Tabela 1 mostra diferentes rotas de produção de hidrogênio com diferentes fontes de energia e sua porcentagem de eficiência energética.

Tabela 1 – Diferentes formas de produção de gás hidrogênio

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência energética	Fonte
Água	Eletrolise alcalina	61-82%	Parra <i>et al.</i> (2019)
Biomassa	Termólise via pirólise	35-50%	Dawood, Anda e Shafiullah (2020)
Biomassa	Termólise via gaseificação	35-50%	El-Emam e Özcan (2020)
Carvão	Termólise via gaseificação	74-85%	Mah <i>et al.</i> (2019)
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60-75%	Pinsky <i>et al.</i> (2020)
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%	Pinsky <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autores (2022).

Nos dias de hoje, o hidrogênio ainda é produzido na sua maioria via combustíveis fósseis, ou seja, via gás natural, carvão e petróleo, muitas vezes sendo usado em refinarias para processar o petróleo bruto nos processos de oxidação parcial de combustíveis fósseis. Mas, também é usado em processos metalúrgicos, e na indústria química com o intuito de produzir diferentes compostos químicos, tais como metanol e amônia (NORONHA *et al.*, 2021).

Para o processo de eletrólise (Equação 2), a água é normalmente purificada e depois enviada a um eletrolisador, que produz o hidrogênio e oxigênio.



O hidrogênio é então seco, purificado e comprimido de uma pressão de 10,3 a 413,7 bar, e depois armazenado em tanques. Embora o caminho da eletrólise ofereça uma rota 100% renovável para a produção de hidrogênio, ele representa menos de 5% da produção mundial de hidrogênio (HAN *et al.*, 2021). Apesar desta baixa contribuição percentual, a eletrólise da água está ganhando impulso por várias razões, tais como emissão zero de carbono, ausência de subprodutos indesejáveis, tais como sulfatos, óxidos de carbono e óxidos de nitrogênio, como também alta pureza de hidrogênio.

Outrossim, a expressão “*power-to-gas*” refere-se à produção de um gás combustível por meio de eletrólise de água (H_2O) utilizando energia elétrica. Com a tecnologia “*power-to-gas*” é produzido o gás hidrogênio (H_2) também chamado de gás natural sintético através de eletrólise e armazenada na rede de gás natural. O custo de produção de hidrogênio através da eletrólise deve reduzir em aproximadamente 70% durante a próxima década, permitindo a adoção generalizada de uma abordagem de produção de hidrogênio verde. Até 2040, espera-se que o mercado mundial de eletrólise de hidrogênio tenha crescido 1000 vezes.

A gaseificação da biomassa é vista como uma das alternativas mais viáveis, sustentáveis e potencialmente neutras em carbono para gerar hidrogênio (SAIDI; GOHARI; RAMEZANI, 2020). Como a biomassa é uma matéria-prima renovável que absorve o dióxido de carbono atmosférico durante o crescimento, ela tem uma pegada líquida de CO_2 muito menor do que a dos combustíveis fósseis. Entretanto, a viabilidade econômica da produção de hidrogênio a partir da biomassa deve estar intimamente relacionada com a disponibilidade e a viabilidade econômica da matéria-

prima na área local. As propriedades físico-químicas, distribuição e taxa de hidrogênio da biomassa são os principais atributos dos materiais de fornecimento. Como as matérias-primas de biomassa variam muito na composição estrutural e na forma, todas essas características devem ser levadas em conta ao combinar a matéria-prima com a tecnologia de conversão apropriada (SRIVASTAVA *et al.*, 2020).

Nos chamados processos de reforma, o hidrogênio é liberado como um subproduto dos processos da indústria química. Trata-se da reforma catalítica (do latim *reformare*), um processo de refinaria no qual alcanos e cicloalcanos de nafta (gasolina bruta) de várias origens são convertidos em compostos aromáticos e alcanos ramificados com o objetivo de aumentar o número de octanas, sendo o gás H_2 , um subproduto importante. A principal matéria-prima para a reforma do metano a vapor é o gás natural, predominantemente metano misturado com outros hidrocarbonetos e CO_2 (OSMAN, 2020).

O gás natural e a reação de vapor ocorrem em duas etapas, a altas temperaturas, seguidas por uma interação entre o monóxido de carbono e o hidrogênio produzido junto com o gás natural não reagido. Em seguida mais vapor é fornecido para reagir com monóxido de carbono (CO) em uma reação de deslocamento água-gás, para recuperar mais hidrogênio e converter o CO em CO_2 . A eficiência de todo o processo é de cerca de 75% (PINSKY *et al.*, 2020; CLEMENTE; MOREIRA, 2021). O processo inteiro libera uma quantidade significativa de emissões de dióxido de carbono, que pode ser reduzida com a instalação de tecnologia de captura e armazenamento de carbono, removendo e separando os gases de combustão do fluxo do produto.

3 AS DIFERENTES CORES DO GÁS HIDROGÊNIO

O hidrogênio é sempre um gás incolor, mas, dependendo de sua origem, carrega em seu nome cores diferentes. Ou seja, quando o hidrogênio é usado como um transportador de energia, é feita uma distinção entre hidrogênio cinza, azul, marrom/preto, turquesa e verde, dependendo da origem da energia usada para produção do gás hidrogênio. Porém, apenas o hidrogênio livre de CO_2 produzido com a ajuda de energias renováveis é verdadeiramente sustentável (OSMAN *et al.*, 2021).

3.1 HIDROGÊNIO “VERDE” – O MENOS POLUENTE

O hidrogênio verde é aquele produzido a partir de energias renováveis como, por exemplo, através da energia solar ou eólica, sem produção de CO_2 . A ciência e demais especialistas estão convencidos de que o hidrogênio verde, produzido de forma neutra para o clima, pode levar a contribuições decisivas para a redução de CO_2 em muitos setores industriais.

A molécula água é dividida em gás oxigênio e gás hidrogênio, utilizando eletricidade, num processo chamado de “eletrólise da água”. O processo de produção usa a transformação de água em gás oxigênio e gás hidrogênio, e é totalmente livre de emissões sendo, portanto, uma opção ambientalmente correta.

Por conseguinte, o hidrogênio verde está surgindo como uma das principais opções para armazenar energia de fontes renováveis, com combustíveis à base de hidrogênio, potencialmente transportando energia de fontes renováveis por longas distâncias, de regiões com abundantes recursos energéticos para áreas ávidas de energia a milhares de quilômetros de distância.

3.2 O HIDROGÊNIO “AZUL” COMO UMA PONTE PARA A ERA DO HIDROGÊNIO

Embora não verdadeiramente sustentável, o chamado hidrogênio azul também pode contribuir para a redução de CO_2 emitido para atmosfera, pelo menos durante um período de transição. Este tipo de gás hidrogênio é produzido a partir de hidrocarbonetos (principalmente gás natural), processo, que também produz CO_2 . O CO_2 é capturado e armazenado no subsolo (também chamada de captura e armazenamento de carbono).

O hidrogênio azul é, portanto, neutro em relação ao CO_2 , pois embora o CO_2 seja produzido durante sua fabricação, ele não escapa para a atmosfera. Além disso, é uma tecnologia válida para atualidade, pois a produção de hidrogênio verde (livre de CO_2) ainda é cara e são necessários altos investimentos para a conversão de muitos processos de produção industrial em plantas baseadas em hidrogênio. Em 2021, havia apenas duas instalações de hidrogênio azul em todo o mundo que utilizavam gás natural para produzir hidrogênio em escala comercial. Uma delas é operada pela empresa Shell no município de Alberta no Canadá, e a outra é operada pela empresa *Air Products*, no Texas, EUA (HOWARTH; JACOBSON, 2021).

3.3 HIDROGÊNIO MARROM E HIDROGÊNIO PRETO

O hidrogênio marrom (feito de carvão marrom) e o hidrogênio preto (feito de carvão preto) são produzidos via processo de gaseificação. É um processo estabelecido, usado em muitas indústrias, que converte materiais ricos em carbono em hidrogênio e CO_2 . Como resultado, a gaseificação libera esses subprodutos para a atmosfera. Entretanto, se a tecnologia acaba armazenando essas emissões, esse hidrogênio às vezes pode ser chamado de hidrogênio “azul”.

3.4 SUBSTITUINDO O HIDROGÊNIO “CINZA” PELO HIDROGÊNIO “VERDE” NA INDÚSTRIA

O hidrogênio “cinza” já é usado em grande escala, especialmente na indústria química, mas ao contrário do hidrogênio azul, não é neutro em CO_2 . Os combustíveis fósseis são utilizados para a sua produção e o gás natural é dividido pelo calor em gás H_2 e CO_2 . Durante sua produção o CO_2 não é capturado e armazenado como no hidrogênio azul, mas sim liberado na atmosfera onde aumenta o efeito estufa.

O hidrogênio cinza também é produzido a partir de fontes de energia fóssil como o gás natural, que é convertido em hidrogênio e CO_2 sob calor (reforma a vapor). A produção de uma tonelada de hidrogênio gera assim cerca de dez toneladas de CO_2 . No futuro, muitos processos industriais utilizarão produtos isentos ou neutros em CO_2 produzidos a hidrogênio ou produtos derivados, como amônia e metanol. Assim, o “hidrogênio cinza” pode ser substituído pelo menos parcialmente pelo “hidrogênio verde” sem ajustes dispendiosos (FIGUEIREDO; CESAR, 2021).

3.5 O HIDROGÊNIO “TURQUESA” PASSA SEM ARMAZENAMENTO SOB A TERRA

O hidrogênio turquesa tem uma gênese diferente. O gás natural, também um combustível fóssil, é decomposto em gás hidrogênio e carbono sólido em um processo térmico. O processo chama-se de fissão térmica do metano (também chamada de “pirólise do metano”). Portanto, nenhum CO_2 gasoso precisa ser armazenado no subsolo para a produção de hidrogênio turquesa.

Os pré-requisitos para a neutralidade de CO₂ do processo são o fornecimento de calor do reator de alta temperatura a partir de fontes renováveis de energia e uma ligação permanente do carbono. Mas a quantidade de energia é muito alta, pois são necessárias altas temperaturas para o processo. De qualquer modo, o carbono poderia ser utilizado na indústria, por exemplo, para a produção de materiais de construção leves ou para a produção de baterias (NEWBOROUGH; COOLEY, 2020a).

4 APLICAÇÕES POTENCIAIS DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é particularmente relevante em áreas onde a eletrificação não é possível num futuro próximo, ou seja, no transporte aéreo, de longa distância, de mercadorias pesadas e no transporte marítimo. Nesse sentido, a tecnologia “*power-to-gas*” é considerada a escolha certa em termos de economia de energia e de ecologia, se o excedente de eletricidade proveniente de energias renováveis, como por exemplo, a energia eólica ou solar, for utilizado para sua produção.

O hidrogênio pode ser usado diretamente como transportador de energia final ou pode ser posteriormente convertido em metano, gás de síntese, combustíveis líquidos, eletricidade ou produtos químicos como, por exemplo, amônio ou metanol (THEMA; BAUER; STERNER, 2019). Sendo assim, a seguir são elucidadas algumas aplicações do gás hidrogênio.

- Aplicações estacionárias: Células a combustível como pequenas usinas combinadas de calor e energia, estações móveis de energia para fornecer sistemas telefônicos ou como geradores de energia de emergência, minicélulas a combustível como poderosos substitutos de bateria em dispositivos elétricos, tais como laptops (RODRIGUES; SOUZA; TAMBOR, 2019). O hidrogênio verde pode aquecer fornos industriais, tais como nas indústrias de vidro, cimento ou de aço.

- O hidrogênio como combustível – aplicações móveis: O hidrogênio não gera gases de escape quando é queimado, pois o único produto desta reação é água. Isto torna o gás hidrogênio um substituto ideal para o transporte e a indústria, em comparação com o carvão, petróleo ou gás natural. Em forma comprimida, H₂ tem uma alta densidade de energia e, portanto, é adequada para o transporte de longa distância em terra ou através dos oceanos. Para este fim, ele pode ser queimado ou convertido em eletricidade em uma célula de combustível. Alguns exemplos de aplicações

móveis são carros de passageiros com células de combustível movidas à hidrogênio verde, ônibus urbanos e outras formas de transporte público, com motores a combustão de hidrogênio, mas também caminhões, bondes, locomotivas e navios, aviões a hidrogênio, indicando assim um amplo aproveitamento desta fonte de energia renovável e limpa. O hidrogênio como matéria-prima para combustíveis sintéticos pode transformar diversos setores de transporte muito menos impactante ao meio ambiente e ao clima (CARVALHO *et al.*, 2021).

- O hidrogênio como um depósito de energia: Quanto mais energia renovável é usada por países, mais importante se torna lidar com as flutuações em sua disponibilidade. O hidrogênio é uma molécula que pode ser transportada e armazenada ao redor do mundo, sendo completamente independente de quando e onde a fonte de energia renovável está disponível. O hidrogênio tem baixo ponto de fusão (-259 °C) e de ebulição (-253 °C) e só se torna líquido sob alta pressão, motivo pelo qual só pode ser transportado bem desta forma. Possui também a maior quantidade de energia por unidade de massa em relação aos demais combustíveis existentes. Quando é resfriado abaixo do ponto de ebulição, virando um líquido, o gás hidrogênio ocupa um espaço equivalente a 1/700 daquele no estado gasoso. Como essa transformação no estado líquido é complicada e custosa, são realizadas, atualmente, pesquisas em alguns países para ligar temporariamente o hidrogênio a líquidos (por exemplo, portadores de hidrogênio orgânico líquido) para que ele possa ser transportado mais facilmente. Esses líquidos orgânicos portadores de hidrogênio resultam da combinação entre um silano e um álcool.

- Amoníaco e metanol, produzido com hidrogênio verde: A amônia não é apenas uma das substâncias químicas mais comumente produzidas, mas também é adequada para o armazenamento de energia. Se hidrogênio necessário para sua produção é obtido exclusivamente com a ajuda de eletricidade verde e somente as energias renováveis são utilizadas no processo posterior, tem-se o amoníaco verde. A amônia tem uma densidade energética significativamente maior do que o hidrogênio e, portanto, é ainda mais fácil de transportar e armazenar. O Brasil pode futuramente exportar quantidades grandes de amônia verde, sintetizada a base de hidrogênio verde, produzindo assim um novo tipo de biocombustível renovável. Um dos setores econômicos em nível mundial, que precisa diminuir suas emissões de gases é o setor naval, que é responsável por aproximadamente 3 a 4%

das emissões globais de CO₂. Um candidato a combustível carbono neutro pode ser o amônio verde. O CO₂ também pode ser convertido em metanol, reagindo com hidrogênio (OLIVEIRA, 2021). Como vantagem, o metanol é o elemento básico de muitos produtos químicos do dia-a-dia e, como o amoníaco, pode ser excelentemente armazenado e transportado.

5 O HIDROGÊNIO: ELEMENTO CHAVE PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O resultado da eletrólise da água é o hidrogênio verde, gasoso, que armazena energia. O hidrogênio verde torna-se assim um portador de energia e pode, mais tarde, ser novamente combinado com oxigênio em uma célula de combustível para gerar energia. Isto torna todo o processo de produção de hidrogênio verde neutro em CO₂ e livre de emissões.

Ademais, hidrogênio verde oferece enormes vantagens como armazenamento de energia e fonte de energia: 1) não requer nenhum combustível fóssil como matéria-prima e é, portanto, uma fonte de energia amigável ao clima; 2) não são produzidos gases de efeito estufa (GEE) prejudiciais durante sua fabricação; 3) a eletricidade que não pode ser alimentada na rede é convertida em hidrogênio e pode, portanto, ser armazenada a longo prazo; 4) no processo “*power-to-x*”, o gás combustível ecológico (“*power-to-gas*”) ou combustível sintético (“*power-to-liquid*”) pode ser produzido a partir do hidrogênio verde (OSMAN *et al.*, 2021).

Devido aos urgentes desafios da mudança climática, o hidrogênio tem se tornado cada vez mais interessante para a indústria, à política e aos negócios como uma parte importante da transição energética. Alguns países pioneiros, como a Alemanha, estão em vias de ou já definiram sua estratégia nacional para esta fonte de energia renovável do futuro. O foco é o desenvolvimento e uma maior promoção do hidrogênio verde e o intuito da estratégia é dar uma contribuição significativa para alcançar os objetivos de proteção climática de Paris (VASCONCELOS; MELLO, 2021).

A Agência Internacional de Energia estima que o custo do hidrogênio verde poderá cair em 30 a 50% até 2030. O pré-requisito é que a eletricidade das energias renováveis se torne mais barata para produzir e o hidrogênio verde tenha maior importância na política energética. As perspectivas para os combustíveis sintéticos – ou seja, combustíveis de energia produzidos a partir do hidrogênio verde – são igualmente positivas (IEA, 2019).

6 HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DOS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A descarbonização do sistema energético é um dos principais objetivos políticos para meados do século XXI. No final de 2015, foi assinado o Acordo de Paris, que projetou o quadro de referência no qual a política energética deve ser desenvolvida. Com o tratado, foi apresentada a Agenda 2030, das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável e o Quadro de Referência para a Redução de Riscos de Desastres (PAZ, 2017). Estes dois protocolos estabeleceram as bases para o desenvolvimento sustentável global com baixas emissões de gases de efeito estufa. Um dos projetos mais proeminentes para alcançar isto é o *Green Deal* (Acordo Verde) Europeu, que focaliza sua ação política na energia e na transição verde (CHOMSKY; POLLIN; POLYCHRONIOU, 2020).

As metas, ancoradas no Acordo de Paris, mas ainda mais no *Green Deal* da UE e na Estratégia Europeia de Hidrogênio, darão impulsos positivos para a implantação de fontes de energias renováveis nos países em desenvolvimento e, especialmente, nos países da União Africana devido à priorização do continente africano dentro das estruturas de cooperação energética do Acordo Verde da UE e da Estratégia Europeia de Hidrogênio (SADIK-ZADA, 2021).

As metas de Desenvolvimento Sustentável foram criadas para fomentar políticas públicas contra a pobreza, proteger o planeta e garantir que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade até 2030, através da Agenda 2030. A indústria de energia tem grandes impactos em vários dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), mas especialmente em dois deles: 1) Energia barata e limpa e 2) Produção e consumo responsáveis. Já energia vindo do hidrogênio verde é um capacitador no caminho para a descarbonização. Espera-se que seja o combustível da transição energética e um grande aliado para o cumprimento direto dos ODS 7, 11, 12 e 13. Também conhecido como hidrogênio renovável, o hidrogênio verde é o caminho certo para o futuro, segundo especialistas em transição energética, porque é inesgotável (elemento mais abundante no universo) e fornece energia renovável sem emissões de CO₂ (FALCONE; HIETE; SAPIO, 2021).

O hidrogênio verde foi apresentado em uma série de compromissos de redução de emissões na Conferência das Nações Unidas sobre o Clima, COP26, como um meio de descarbonizar a indústria pesada, o frete de

longo curso, o transporte marítimo e a aviação. Tanto os governos quanto a indústria reconheçam o hidrogênio como um importante pilar de uma economia líquida zero (RYAN; ROTHMAN, 2022).

7 HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL E NO MUNDO

O hidrogênio verde pode ser produzido de forma mais sensata onde há energia renovável suficiente para alimentar a eletrólise da água. Diversos países na África (o lado oeste e sul do continente), mas também o Brasil e a Austrália têm excelentes condições climáticas para produzir eletricidade a partir do vento e do sol em áreas não utilizadas (SANTOS; CHAVES, 2021).

Carvalho *et al.* (2021) destacam a viabilidade da produção de hidrogênio verde no Brasil, a base da eletrólise da água, através do consumo de eletricidade produzida por fontes renováveis (especialmente via energia eólica e solar). O país possui grandes áreas com alta irradiação solar e velocidades de vento favoráveis que ajudam a tornar a energia eólica e a energia solar fotovoltaica, boas alternativas econômicas para o cenário mundial. Outros fatores incluem menores investimentos e menor custo de integração na rede em relação à média global devido à grande participação da energia hidrelétrica. Como se sabe, as usinas hidrelétricas respondem bem à variabilidade de curto prazo da produção renovável. As regulamentações locais também incentivam as energias renováveis. Os resultados de Kelman *et al.* (2020) indicam que o Brasil poderia se tornar uma potência de hidrogênio verde para o mercado interno e potenciais exportações para a outros países, tais como a Europa.

Além de oferecer uma energia renovável barata, o Brasil tem outros atributos que apoiaria o desenvolvimento de um mercado interno de hidrogênio e as perspectivas de se tornar um fornecedor importante para a Europa. São elas: 1) uma fonte barata de hidrogênio verde poderia ser competitiva para vários setores na economia brasileira, criando um mercado interno; 2) a estabilidade geopolítica e uma democracia estabelecida podem ser uma vantagem em comparação com outros locais onde o hidrogênio verde poderia ser produzido como, por exemplo, o Oriente Médio e a África do Norte ou Ocidental; 3) o potencial para expandir a produção de energia renovável variável no país é enorme, considerando a disponibilidade de terras baratas com vento abundante e recursos solares. Além disso, a existência de uma rede nacional flexível e integrada permite

que a energia possa ser gerada longe da usina de hidrogênio; e 4) como o Brasil produz a maior parte da eletricidade a partir de diferentes tipos de energias renováveis, existe um ambiente propício para a construção de novas capacidades de energia renovável.

As indústrias eólica e solar, ambas bastante consolidadas no Brasil, têm os recursos para desenvolver grandes projetos, dado o *know-how* adquirido pela força de trabalho (IREA, 2019) e a cadeia de fornecimento estabelecida. Além disso, existe uma sólida estrutura regulatória para grandes projetos renováveis no Brasil, permitindo que os mesmos sejam colocados em funcionamento em tempos razoáveis.

O fato de o Brasil ser uma potência agrícola que atualmente importa fertilizantes à base de nitrogênio e as exportações massivas de mineração e agricultura produtos, ambos os usuários pesados de navegação marítima à base de petróleo, abre possibilidades para um mercado interno de hidrogênio verde e produtos derivados (SANTOS; CHAVES, 2021). Além disso, as importações europeias de H₂ verde brasileiro poderiam desencadear um grande desenvolvimento do mercado interno no Brasil com potencial para desenvolver de forma sustentável a economia local com externalidades positivas para o meio ambiente (KELMAN *et al.*, 2020).

Há vários incentivos nacionais para garantir a origem com baixo teor de carbono: 1) promover a produção de hidrogênio (por exemplo, Holanda, Noruega, etc.); 2) fomentar o uso do hidrogênio no setor de transportes (por exemplo, Bélgica, Alemanha, Itália, etc.); e (3) incentivar a compra de veículos (por exemplo, França, Espanha, Noruega, Bélgica, etc.). Entretanto, há, ainda, escassas políticas nacionais de apoio ao uso de hidrogênio baseado em energia renovável na indústria (DOLCI *et al.*, 2019), e estas se baseiam principalmente em isenções fiscais adaptadas à substituição de combustíveis fósseis (ou seja, isenção de imposto sobre o carbono na França, custos de investimento dedutíveis na Holanda).

A Comissão Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2020) manifestou formalmente sua visão de transformar o hidrogênio em uma solução viável para alcançar uma maior ambição climática em um ritmo acelerado. Numerosos países implementaram recentemente ou estão iniciando e desenvolvendo estratégias de hidrogênio com o objetivo de satisfazer sua considerável demanda de energia. Estratégias nacionais seminais de hidrogênio foram lançadas pela primeira vez em países do oeste e norte da Europa (por exemplo, Dinamarca, França, Alemanha e Holanda), enquanto alguns países do sul da Europa (por exemplo, Itália e Espanha) têm suas estratégias de hidrogênio sob consulta.

Em outras partes do mundo, a China representa o maior produtor mundial de hidrogênio e está desenvolvendo fortemente ações e estratégias para aplicações de hidrogênio e células a combustível, com o objetivo de atingir uma participação de 10% do consumo doméstico de energia até 2040 (NEWBOROUGH; COOLEY, 2020b). A Austrália está se concentrando nos grandes centros de hidrogênio e na perspectiva duradoura de exportar grandes quantidades de hidrogênio renovável para outros países (COAG ENERGY COUNCIL, 2019). Países do norte da África (por exemplo, Argélia, Líbia, Tunísia, Marrocos, Egito) já reconheceram a perspectiva de produzir e exportar hidrogênio renovável em larga escala (FARES; DJEDDI; NOUIOUA, 2019).

Recentemente, uma associação industrial, a *Hydrogen Europe*, está promovendo um aumento maciço da produção de eletrolíticos dentro da UE e do Norte da África. Os objetivos do projeto são com base em algumas tarefas compartilhadas entre países para o desenvolvimento do hidrogênio solar, tais como o desenvolvimento de tecnologias de alta eficiência, o desenvolvimento de tecnologias de transporte de hidrogênio a longa distância, a medição e monitoramento da segurança das tecnologias empregadas, e o treinamento efetivo de especialistas (VAN WIJK; WOUTERS, 2021).

O hidrogênio verde feito de eletricidade e água renováveis desempenhará um papel crucial em nossa economia futura descarbonizada, como mostrado em muitos cenários recentes. Em um sistema logo dominado por energias renováveis variáveis, tais como solar e eólica, o hidrogênio liga eletricidade com calor industrial, materiais como aço e fertilizantes, aquecimento de espaços e combustíveis para transporte. Além disso, o hidrogênio pode ser armazenado sazonalmente e transportado de forma econômica por longas distâncias em grande parte utilizando a infraestrutura de gás natural existente. O hidrogênio verde em combinação com a eletricidade verde tem o potencial de substituir totalmente os hidrocarbonetos (VAN WIJK; WOUTERS, 2021).

Devido a seu tamanho e densidade populacional limitados, a Europa não será capaz de produzir toda sua energia renovável na própria Europa. Portanto, presume-se que uma grande parte do hidrogênio será importada. Embora a importação de hidrogênio possa vir de muitas áreas do mundo com bons recursos solares e eólicos, como por exemplo o Brasil, outra possibilidade interessante é a importação do Norte da África. Atualmente, 13% do gás natural e 10% do petróleo consumido na Europa vêm do Norte da

África (EUROSTAT STATISTICS EXPLAINED, 2019) e 60% das exportações de petróleo do Norte da África e 80% de suas exportações de gás são enviadas para a Europa.

O Norte da África tem bons recursos para produção e energia solar e eólica; muitos países estão desenvolvendo estratégias ambiciosas de energia renovável para atender à crescente demanda de energia dos centros urbanos e industriais, mas também para eletrificar as partes não atendidas da população em áreas mais remotas. A eletricidade renovável de baixo custo e o preço estável tem o potencial para estimular o crescimento econômico, necessário para estabilizar as sociedades desses países, e reduzir assim a migração econômica. Entretanto, além de atender à demanda doméstica, a maioria dos países do Norte da África tem um enorme potencial em termos de terras e recursos para produzir hidrogênio verde a partir da energia solar e eólica para exportação. São recursos vastos, pois apenas 8% do Deserto do Saara coberto com painéis solares são suficientes para produzir toda a energia para o mundo: aproximadamente 155.000 TWh por ano (VAN WIJK; VAN DER ROEST; BOERE, 2017).

Em um futuro voltado ao sistema de energia renovável, largamente baseado na produção de energia renovável variável e, considerando as flutuações em larga escala na demanda diária, semanal e sazonal de energia, torna-se necessário o armazenamento de energia em larga escala.

A capacidade de armazenamento de gás natural compreende 18% do consumo total de gás na UE. Em 2050, quando o sistema energético se baseia em fontes de energia renováveis, é necessária uma capacidade de armazenamento de cerca de 20-30% do consumo final de energia. As cavernas de sal podem fornecer capacidade de armazenamento de hidrogênio suficiente para isso, atendendo à armazenagem sazonal, mas também para manter uma reserva estratégica de energia (VAN WIJK; WOUTERS, 2021).

De acordo com os estudiosos do Programa de Assistência à Gestão do Setor Energético (ESMAP) do Grupo Banco Mundial, o desenvolvimento de áreas com infraestrutura dimensionável para a produção de gás natural e redes de gasodutos de gás natural tem uma vantagem comparativa para o desdobramento do hidrogênio verde. Eles mencionam explicitamente a Argentina, China, a Europa, os países do Conselho de Cooperação do Golfo, Japão, Indonésia, Malásia, América do Norte e Tailândia como países com condições iniciais favoráveis para o desdobramento de uma economia de hidrogênio (SADIK-ZADA, 2021).

Após todas as considerações expostas, em janeiro de 2023, o Rio Grande do Sul foi o primeiro Estado brasileiro em divulgar as estratégias que serão adotadas a fim de desenvolver a cadeia de hidrogênio verde no Estado. Rio Grande do Sul é signatário do Acordo de Paris e, em 2022, aderiu também às campanhas *Race to Zero* (Corrida para o Zero) e *Race to Resilience* (Corrida para a Resiliência), das Nações Unidas, assumindo o compromisso de reduzir as emissões em 50% até 2030 e de neutralizá-las até 2050 (SEMA, 2023). Tal fato, afirma a potencialidade promissora para produção do hidrogênio verde.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrogênio é referido carinhosamente como o “combustível do futuro” porque é praticamente ilimitado e está disponível em qualquer lugar da Terra. Está disponível em grandes quantidades como um componente (átomo) da molécula água. Pode ser obtido a partir de energias renováveis como meio de armazenamento de energia e posteriormente ser utilizado em quase todas as áreas consumidoras de energia.

Como observado pela IEA, a demanda global por hidrogênio para uso como combustível triplicou desde 1975 e atingiu 85 milhões de toneladas por ano em 2016. Além disso, o hidrogênio verde é uma fonte de energia limpa que emite apenas vapor de água e não deixa resíduos no ar, ao contrário do carvão e do petróleo (IEA, 2019).

A necessária descarbonização da economia mundial dará maior destaque ao hidrogênio. Para o sucesso em longo prazo da transição energética e para a proteção climática, o mundo precisa de alternativas aos combustíveis fósseis. O hidrogênio desempenhará um papel fundamental como um portador de energia versátil. O hidrogênio verde é produzido através da eletrólise da água usando somente eletricidade a partir de energias renováveis (por exemplo, a energia solar e eólica). Esta energia elétrica é necessária para dividir as moléculas de água em H_2 e O_2 . O hidrogênio produzido de forma ambientalmente correta, permite reduzir significativamente as emissões de CO_2 , especialmente na indústria e nos transportes, onde a eficiência energética e o uso direto da eletricidade a partir de energias renováveis não são suficientes. Desta forma, o mundo tem, sem dúvida, um dos combustíveis mais importantes do futuro.

Ressaltando o estado do Rio Grande do Sul que apresenta diversas vantagens competitivas para a produção do hidrogênio verde uma vez que possui os recursos naturais em abundância, uma extensa costa marítima e a ocorrência de lagoas também podem favorecer esse novo mercado. Um dos obstáculos para fomento à cadeia produtiva pode estar atrelado à captação de recurso financeiro, no entanto, com planejamento e estímulo para viabilizar as cadeias produtivas as limitações podem ser ultrapassadas.

Com base na análise da literatura, pode-se concluir que os países com uma participação considerável de energias renováveis em sua “carteira” energética, baseada em que as energias renováveis e sustentáveis, têm uma vantagem de custo na produção de hidrogênio verde. Além disso, os países com uma infraestrutura avançada de gasodutos poderão fazer uso dos gasodutos de gás natural existentes para a infraestrutura de hidrogênio em desenvolvimento. Assim, países com grandes capacidades de geração de energia solar e eólica e infraestrutura de gasodutos são atualmente mais capazes de desenvolver uma infraestrutura de hidrogênio verde com custos acessíveis, como, por exemplo, o Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. S. *et al.* Hidrogênio, o combustível do futuro. **Diversitas Journal**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 356-366, 2019. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/593. Acesso em: 17 jan. 2022.
- ALMEIDA, J. C. M. M. A volta dos dirigíveis: Estudo do caso da airship do Brasil. **Revista Conecta**, Santos, SP, v. 1, p. 60-81, 2018. Disponível em: <https://fatecrl.edu.br/revistaconecta/index.php/rc/article/view/10>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- ATILHAN, S. *et al.* Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. **Current Opinion in Chemical Engineering**, [s. l.], v. 31, p. 100668, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221133982030071X>. Acesso em: 21 jan. 2022.
- CARVALHO, F. *et al.* Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 326, p. 129385, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621035691>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- CH2V. O hidrogênio verde (H2V). **CH2V**, Itajubá, MG, 2019. Disponível em: <https://ch2v.unifei.edu.br/o-hidrogenio-verde-h2v/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

CHOMSKY, N.; POLLIN, R.; POLYCHRONIOU, C. J. **Climate crisis and the global Green New Deal: the political economy of saving the planet**. New York: Verso, 2020.

CLEMENTE, C. M. S.; MOREIRA, A. A. M. . Estoques de carbono e biomassa no semiárido baiano (1973 a 2019). **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 41, p. 72-94, 2021.

COAG ENERGY COUNCIL. Australia's National Hydrogen Strategy. **Coag Energy Council – Hydrogen Working Group**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/government622>. Acesso em: 14 jan. 2022.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 45, n. 7, p. 3847-3869, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919345926>. Acesso em: 26 jan. 2022.

DOLCI, F. *et al.* Incentives and legal barriers for power-to-hydrogen pathways: An international snapshot. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 44, n. 23, p. 11394-11401, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919309693>. Acesso em: 26 jan. 2022.

EL-EMAM, R. S., ÖZCAN, H. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 593-609, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619303361>. Acesso em: 26 jan. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. A Hydrogen Strategy for a Climate Neutral Europe. **European Commission**, [s. l.], 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865942/EU_Hydrogen_Strategy.pdf. Acesso em: 14 jan. 2022.

EUROSTAT STATISTICS EXPLAINED. EU import of energy products—recent developments. **Eurostat Statistics Explained**, [s. l.], maio, 2019. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_recent_developments. Acesso em 12 jan. 2022.

FALCONE, P. M.; HIETE, M.; SAPIO, A. Hydrogen economy and Sustainable Development Goals (SDGs): review and policy insights. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, [s. l.], v. 31, p. 100506, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223621000626>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FARES, T.; DJEDDI, A.; NOUIOUA, N. Solar energy in Algeria between exploitation policies and export potential. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE RENEWABLE ENERGY SYSTEMS AND APPLICATIONS*, 1th., 2019, Algeria. **Proceedings** [...]. IEEE: Algeria, 2019. p. 1-5.

FIGUEIREDO, B. B.; CESAR, F. I. G. Hidrogênio como fonte alternativa de combustível automotivo: uma pesquisa bibliográfica. **Revista Científica Acertte**, Jundiaí, v. 1, n. 6, p. e1649-e1649, 2021. Disponível em: <https://acertte.org/index.php/acertte/article/view/49>. Acesso em: 27 jan. 2022.

GOOGLE ACADÊMICO. **Google acadêmico**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/>. Acesso em: 27 jan. 2022.

HAN, W. B. *et al.* Directly sputtered nickel electrodes for alkaline water electrolysis. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 386, p. 138458, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468621007489>. Acesso em: 16 jan. 2022.

HOWARTH, R. W.; JACOBSON, M. Z. How green is blue hydrogen? **Energy Science & Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 1676-1687, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.956>. Acesso em: 22 jan. 2022.

IEA. The Future of Hydrogen. **International Energy Agency**, [s. l.], June 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em 11 jan. 2022.

IREA. Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019. **International Renewable Energy Agency**, Masdar City, 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019>. Acesso em: 24 jan. 2022.

KELMAN, R. *et al.* Can Brazil Become a Green Hydrogen Powerhouse? **Journal of Power and Energy Engineering**, [s. l.], v. 8, p. 21-32, 2020. Disponível em: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/56071>. Acesso em: 22 jan. 2022.

KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 46, n. 16, p. 10016-10035, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920345079>. Acesso em: 22 jan. 2022.

MAH, A. X. Y. *et al.* Review of hydrogen economy in Malaysia and its way forward. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 44, n. 12, p. 5661-5675, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991930179X>. Acesso em: 22 jan. 2022.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Developments in the global hydrogen market: electrolyser deployment rationale and renewable hydrogen strategies and policies. **Fuel Cells Bulletin**, [s. l.], vol. 2020, n. 10, p. 16-22, 2020a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464285920304867>. Acesso em: 22 jan. 2022.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. **Fuel Cells Bulletin**, [s. l.], vol. 2020, n. 11, p. 16-22, 2020b. Disponível em: <https://www.magonlinelibrary.com/doi/abs/10.1016/S1464-2859%2820%2930546-0>. Acesso em: 22 jan. 2022.

NORONHA, M. E. S. *et al.* Hidrogênio e energia eólica: uma revisão sistemática. In: CONGRESSO DE ADMINISTRAÇÃO SOCIEDADE E INOVAÇÃO, 14., 2021, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CASI, 2021. p. 1-18.

OLIVEIRA, P. M. T. **Produção de metanol através da reciclagem química de CO₂ e H₂: combustível renovável a partir de gases de efeito estufa**. 2021. 15 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar de Ciência e Tecnologia do Mar) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/60389>. Acesso em: 29 dez. 2021.

OSMAN, A. I. Catalytic hydrogen production from methane partial oxidation: Mechanism and kinetic study. **Chemical Engineering & Technology**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 641-648, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01322-8>. Acesso em: 22 jan. 2022.

OSMAN, A. I. *et al.* Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], vol. 20, p. 1-36, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01322-8>. Acesso em: 18 jan. 2022.

PARRA, D. *et al.* A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 101, p. 279-294, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118307421>. Acesso em: 7 jan. 2022.

PAZ, J. A era das consequências-o par clima-consumo nos ODS e no Acordo de Paris. In: REUNIÃO DE ANTROPOLOGIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 6., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ReACT/IEB, 2017. p. 2-21.

PINSKY, R. *et al.* Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. **Progress in Nuclear Energy**, [s. l.], v. 123, p. 103317, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014919702030069X>. Acesso em: 7 jan. 2022.

RODRIGUES, R. P.; SOUZA, J. E. S.; TAMBOR, J. H. M. As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. **Brasil Para Todos - Revista Internacional**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 21-34, 2019. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/607. Acesso em: 19 jan. 2022.

RYABCHUK, V. K. *et al.* Water Will Be the Coal of the Future – The Untamed Dream of Jules Verne for a Solar Fuel. **Molecules**, [s. l.], v. 21, n. 12, p. 1638, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/21/12/1638>. Acesso em: 14 jan. 2022.

RYAN, A. J.; ROTHMAN, R. H. Engineering chemistry to meet COP26 targets. **Nature Reviews Chemistry**, [s. l.], v. 6, p. 1-3, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41570-021-00346-6>. Acesso em: 24 jan. 2022.

SADIK-ZADA, E. R. Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 23, p. 13464, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01030-9>. Acesso em: 4 jan. 2022.

SAIDI, M.; GOHARI, M. H.; RAMEZANI, A. T. Hydrogen production from waste gasification followed by membrane filtration: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 18, p. 1529–1556, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01030-9>. Acesso em: 14 jan. 2022.

SANTOS, V. M.; CHAVES, A. C. O papel do hidrogênio na transição energética mundial e seus desdobramentos no sistema energético brasileiro. In: GOES, S. (org.). **A geopolítica da energia do século XXI**. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2021. p. 384-392.

SCIELO. Home. **SciELO**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 30 jan. 2022.

SCOPUS. Welcome to Scopus preview. **Scopus**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/home.uri>. Acesso em: 30 jan. 2022.

- SEMA. RS aposta no hidrogênio verde como combustível do futuro. **Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura**, Porto Alegre, 17 fev. 2023. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/rs-aposta-no-hidrogenio-verde-como-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- SILVA, I. A. Hidrogênio: Combustível do Futuro. **Ensaio e Ciência: ciências biológicas, agrárias e da saúde**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/260/26046651010.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2022.
- SILVEIRA, C. S.; OLIVEIRA, L. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 24, n. 3, p. 11-31, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/9354>. Acesso em: 22 jan. 2022.
- SRIVASTAVA, R. K. *et al.* Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. A review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 1049-1072, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-00999-7>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- THEMA, M.; BAUER, F.; STERNER, M. Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 112, p. 775-787, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211930423X>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- VAN WIJK, A.; VAN DER ROEST, E.; BOERE, J. **Solar power to the people**. Amsterdam: los Press, 2017. 97 p.
- VAN WIJK, A.; WOUTERS, F. Hydrogen – The Bridge Between Africa and Europe. In: WEIJNEN M.P.C.; LUKSZO, Z.; FARAHANI S. (ed.). **Shaping an Inclusive Energy Transition**. Cham: Springer, 2021. p. 91-120. Disponível em: <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/50042/1/978-3-030-74586-8.pdf#page=104>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- VASCONCELOS, P. E. A.; MELLO, C. M. Direitos humanos a luz da agenda 2030 e plano clima energia 2050: o uso das energias renováveis em prol do meio ambiente. **Revista Interdisciplinar do Direito**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p. 154-164, 2021. Disponível em: <https://revistas.faa.edu.br/FDV/article/view/1088>. Acesso em: 15 jan. 2022.
- VERNE, J. **A ilha misteriosa**. Rio de Janeiro: Zahar, 1982.