

Hidrogênio Verde: uma revisão de processos de produção do hidrogênio oriundos de fontes renováveis de energia

Com o predominante uso de combustíveis fósseis nos variados setores da economia global, o hidrogênio verde pode ser o passo crucial para a descarbonização dessas economias. Esse tipo de hidrogênio é obtido por processos químicos de eletrólise, ocorrendo a quebra da molécula de água utilizando energia elétrica advinda de fontes renováveis como a energia eólica e solar. Atualmente, os projetos voltados para o estudo de viabilidade da produção, armazenamento e transporte deste combustível renovável ainda estão em fases iniciais de desenvolvimento. Sendo assim, esta pesquisa visa trazer alguns conceitos relacionados ao hidrogênio verde, informando o atual estágio do seu desenvolvimento, no Brasil e no mundo.

Palavras-chave: Hidrogênio limpo; Combustível verde; Eletrólise.

Green Hydrogen: a review of hydrogen production processes from renewable energy sources

With the predominant use of fossil fuels in various sectors of the global economy, green hydrogen could be the crucial step towards the decarbonization of these economies. Chemical processes of electrolysis obtain this type of hydrogen, breaking the water molecule using electrical energy from renewable sources such as wind and solar energy. Currently, projects aimed at studying the feasibility of producing, storing and transporting this renewable fuel are still in the early stages of development. Therefore, this research aims to bring some concepts related to green hydrogen, informing the current stage of its development, in Brazil and in the world.

Keywords: Clean hydrogen; Green fuel; Electrolysis.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **28/06/2022**

Approved: **08/10/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Mariana Furtado Ribeiro de Nóbrega
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4682252518423871>
marianadenobrega@outlook.com

Marlon Heitor Kunst Valentini
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6499660114940771>
<http://orcid.org/0000-0003-3183-5142>
marlon.valentini@hotmail.com

Gabriel Borges dos Santos
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8502930511377553>
<http://orcid.org/0000-0002-0013-0134>
gabrielwxsantos@hotmail.com

George Coutinho Lima
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4436167203814236>
george_coutinho@hotmail.com

Jeferson Peres Gomes
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0867195561502135>
<http://orcid.org/0000-0002-6791-8233>
gomesjefersonpg@gmail.com

Emanuêlle Soares Cardozo
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4412031535613532>
<http://orcid.org/0000-0003-3142-7560>
emanuellesoarescardozo@gmail.com

Maele Costa dos Santos
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6328026326213080>
<https://orcid.org/0000-0003-2038-9861>
maeledossantoseq@gmail.com

Paula Lemões Haertel Wieth
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6212541497364534>
<http://orcid.org/0000-0001-9763-3848>
paula.haertel.ufpel@gmail.com

Willian César Nadaleti
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4670559561277136>
<http://orcid.org/0000-0002-4727-4127>
williancezarnadaletti@gmail.com

Bruno Müller Vieira
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1885554662703620>
<http://orcid.org/0000-0002-9615-3778>
bruno.prpg@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2237-9290.2022.002.0008

Referencing this:

NÓBREGA, M. F. R.; VALENTINI, M. H. K.; SANTOS, G. B.; LIMA, G. C.; GOMES, J. P.; CARDOZO, E. S.; SANTOS, M. C.; WIETH, P. L. H.; NADALETTI, W. C.; VIEIRA, B. M.. Hidrogênio Verde: uma revisão de processos de produção do hidrogênio oriundos de fontes renováveis de energia. *Natural Resources*, v.12, n.2, p.75-85, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2022.002.0008>

INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o primeiro elemento da tabela periódica, o mais simples e o mais abundante do universo, onde compõe 75% da sua massa, possuindo em sua formação apenas um próton e um elétron, atraídos por diversas ligações químicas, que ao serem rompidas são capazes de produzir uma imensa quantidade de energia (NOGUEIRA, 2021). Em condições ambientes relativas à temperatura e pressão, o hidrogênio é encontrado como um gás inodoro, incolor e mais rarefeito que o ar, sendo sempre identificado como parte de outra substância como álcool, água, biomassa natural e hidrocarbonetos, por exemplo, e prontamente combinado com outros elementos químicos (KALAMARAS et al., 2013).

Para a sua produção, na prática, é necessária a utilização de outro tipo de energia, assim, o hidrogênio é considerado um vetor energético e não uma fonte de energia (KALAMARAS et al., 2013). O hidrogênio pode ser extraído de diversas fontes como gás natural, óleo, carvão, etanol, metanol, biomassa, gasolina, entre outros e apresenta vários métodos de produção, como eletrólise, decomposição da biomassa, pirólise, reforma a vapor, fotólise, gaseificação etc. (BRAGA, 2015).

O hidrogênio é utilizado como fonte energética na sua forma molecular (H_2) e a sua combustão tem como subproduto a água, diferente da queima do petróleo, por exemplo, que resulta na emissão de monóxido e dióxido de carbono, gases responsáveis pelo efeito estufa (SILVA, 2016). Ainda, segundo Silva (2016), em meio ao atual cenário global, em que se utilizam diversos combustíveis fósseis, a busca por fontes energéticas renováveis e limpas vem crescendo para se alcançar o desenvolvimento sustentável. O hidrogênio é um combustível ideal para isto, pois proporciona a independência do uso do petróleo e a diminuição das emissões de carbono causadas pela queima de combustíveis, principalmente no setor de transportes.

O hidrogênio produzido através de fontes renováveis, isto é, o hidrogênio verde é obtido através de um processo químico conhecido como eletrólise, no qual utiliza uma corrente elétrica contínua, advinda de fontes renováveis, para separar o hidrogênio do oxigênio presente na água (ENGIE, 2022). A ENGIE (2022) também esclarece que este procedimento demanda bastante energia elétrica e por isso os custos para sua produção são considerados altos. O valor do hidrogênio verde está, em média, US\$ 6 por quilo atualmente e em alguns locais do mundo esse número chega a US\$ 9 por quilo (CHIAPPINI, 2021a) com previsão de até 2030 esse valor cair para US\$ 1,30 por quilo em regiões que possuem recursos renováveis abundantes (MACHADO, 2021a). O Brasil pode sair na frente nesse objetivo, tendo em vista que 85% da sua matriz energética é composta por energia renovável, fazendo com que os investimentos para produção de hidrogênio verde (pois 70% do custo para se produzir hidrogênio verde é relativo ao custo de energia) utilizem da própria rede elétrica vigente (MCKINSEY, 2021).

Sendo assim, esse artigo tem como objetivo contribuir com a pesquisa na área de energias, através da elaboração de uma revisão de literatura sobre o hidrogênio verde. Ainda, essa revisão tem a finalidade de descrever, analisar e relacionar estudos sobre hidrogênio verde, esclarecendo as principais definições e processos acerca da utilização deste combustível.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi elaborado por meio de uma revisão na literatura, no qual se extraiu dados nacionais e internacionais de materiais anteriormente estudados em artigos científicos, monografias, teses e dissertações. Para tanto, foram empregados os bancos de dados *Science Direct* e Google Acadêmico, bem como sites de órgãos referentes à produção de Hidrogênio Verde, tais como: Agência Internacional de Energia (IEA), Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), ENGIE Brasil Energia, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Conselho do Hidrogênio (*HydrogenCouncil*), Ministério de Minas e Energia (MME) entre outros. A pesquisa realizada priorizou estudos e dados de referências publicadas a partir de 2016.

DISCUSSÃO TEÓRICA

Hidrogênio

Compondo 90% das moléculas do universo e 70% da superfície da Terra, o hidrogênio está presente em quase tudo, como na água e nas proteínas dos seres vivos. É o elemento químico mais leve, onde em sua forma molecular (H_2) existem dois átomos que compartilham entre si dois elétrons, através de uma ligação covalente. Em pressão e temperatura consideradas normais (20°C e 1 atm), o hidrogênio é gás inodoro, incolor e insípido, mais rarefeito que o ar, com densidade de 0,0889 kg/m³ e consegue atingir o estado líquido apenas a uma temperatura de -253 °C (JUNGES, 2019).

Junges (2019) salienta, também, que o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) traz, quanto à origem do hidrogênio, uma estimativa de que 78% são oriundos a partir do petróleo (30%) e gás natural (48%), e que menos de 4% dele vem de fontes diversas com origem renovável, proveniente basicamente da eletrólise. Ainda, quando em combustão, o gás hidrogênio libera energia por unidade de massa de 2 a 3 vezes maior do que a provida por outros combustíveis como gasolina, metanol, etanol, biodiesel, gás natural e outros (PALHARES, 2016), tornando-o, o melhor combustível no ponto de vista energético e que possivelmente se tornará um dos transportadores de energia mais viáveis do futuro (SULEMAN et al., 2015).

Processos de produção do hidrogênio

Mesmo em numerosa quantidade na natureza, o hidrogênio é dificilmente identificado em sua forma pura, o que se deve pela suas características físico-químicas, que o tornam de fácil combinação a outros elementos, como em água, plantas e hidrocarbonetos (LAMEIRAS, 2019). Ainda, segundo Lameiras (2019), para ser utilizado energeticamente, o hidrogênio precisa ser separado dos elementos químicos aos quais está associado e obtido em sua forma pura (hidrogênio molecular), sendo que essa separação ocorre com a utilização de diversos processos específicos.

Para escolher o tipo de processo para produzir hidrogênio é levado em consideração à quantidade requerida e a pureza do produto e as diversas tecnologias de produção precisam de algum tipo de energia para que o processo seja iniciado, energias estas que podem ser na forma de calor, eletricidade ou luz, e suas fontes podem ser renováveis ou não renováveis (SANTOS et al., 2016). O hidrogênio, de maneira geral, pode

ser produzido usando diferentes tipos de processos, estes são: térmicos, eletrolíticos, fotolíticos e bioquímicos.

Em processos térmicos, é usado fundamentalmente matéria-prima (renovável ou não renovável), calor e catalisadores para realizar as reações químicas que transformam os insumos (gasolina, etanol, gás natural etc.) em hidrogênio. Alguns exemplos dos processos térmicos são: Gaseificação de massa, pirólise, reforma a vapor, oxidação parcial e reformas oxidativas e autotérmicas. Os processos eletrolíticos, por sua vez, utilizam a energia elétrica ou térmica para separar, por meio de reações químicas, a molécula de água em oxigênio e hidrogênio. Seus exemplos mais relevantes são a eletrólise da água (processo tradicional) e a termólise (eletrólise a vapor). Os processos fotolíticos para produção do hidrogênio utilizam em suas tecnologias a energia solar e os seus exemplos mais importantes são sistemas fotobiológicos e fotoeletroquímicos. Por fim, os processos bioquímicos para geração metabólica do hidrogênio, ainda pouco viáveis, são realizados por microrganismos monocelulares como algas verdes, cianobactérias, bactérias fotossintéticas, entre outros (BARBOSA, 2020).

Atualmente, o hidrogênio é produzido majoritariamente a partir de combustíveis fósseis, nos quais as tecnologias desenvolvidas são utilizadas para produzir o hidrogênio industrial, incluindo o processamento do vapor do gás natural, gaseificação de carvão e oxidação parcial de hidrocarbonetos, tornando-as dependentes desses combustíveis não-renováveis, além de emitirem dióxido de carbono para atmosfera (NORONHA et al., 2021). A Figura 1 demonstra os processos de produção do hidrogênio advindos de combustíveis fósseis e fontes renováveis de energia.

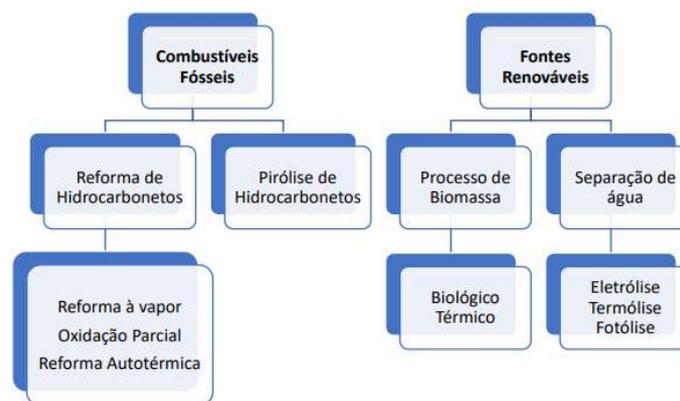


Figura 1: Métodos de produção do Hidrogênio. **Fonte:** Adaptado de Nikolaidis et al. (2016).

Hidrogênio Verde

Histórico e projeção do Hidrogênio Verde

Abad et al. (2020) trouxeram em seu trabalho a primeira vez que o termo “Hidrogênio Verde” foi utilizado. Em 1995, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) dos Estados Unidos da América empregou “Hidrogênio Renovável” como sinônimo de hidrogênio verde. Os autores complementaram ainda que em 2006, o Estado da Califórnia definiu o que era Hidrogênio Verde como sendo o hidrogênio produzido de forma limpa e sustentável onde para esta produção se utiliza uma fonte de energia renovável como a

energia solar ou eólica.

Em 2008 surgiu o projeto-piloto chamado *Hychico* situado na Patagônia, cidade argentina, que vem produzindo desde então aproximadamente 52 toneladas de hidrogênio verde (H₂V) anualmente, a partir de energia eólica, onde utiliza 1,4 MW de energia para misturar o hidrogênio ao gás natural e conta com 2,3 km de dutos dedicados de hidrogênio. Na Costa Rica, na cidade da Libéria, desde 2011 é produzido cerca de 800 kg de hidrogênio verde por ano com o uso de energias eólica e solar, abastecendo veículos com célula a combustível na região (MACHADO, 2021b).

Em 2020, entrou em funcionamento o *Fukushima Hydrogen Energy Research Field* (FH2R), projeto que havia sido construído na cidade de Namie, em Fukushima, no Japão, desde 2018, com 10 MW de potência. Este projeto pode produzir até 1.200 Nm³ de hidrogênio verde por hora usando energia renovável, onde é utilizado para alimentar sistemas estacionários de células a combustível para carros e ônibus¹. No ano de 2021, a *Air Liquide* concluiu a construção do maior eletrolisador do mundo de membrana de troca de prótons (PEM) de 20 MW, o qual está produzindo até 8,2 toneladas por dia de hidrogênio verde, em Bécancour, cidade localizada na província de Quebec, no Canadá, para uso industrial e mobilidade.

Na cidade de Adelaide, localizada na Austrália, a *Siemens Energy* e a *Australian Gas Infrastructure Group* (AGIG) inauguraram em meados de 2021 o primeiro projeto com aplicação comercial do hidrogênio verde do país. O projeto, intitulado HyP SA, possui uma capacidade anual de 175 toneladas de hidrogênio verde que pode ser expandido para outros setores que utilizam bastante carbono no país, como o de transporte pesado, além de poder produzir aço, alumínio e amônia verdes (BARKER et al., 2022).

Em 2021, o Chile produziu a primeira molécula de H₂V para zerar a emissão de carbono de veículos, com possibilidade de reduzir por ano 57 toneladas deste gás. O projeto desenvolvido pela *Anglo American* utiliza energia fotovoltaica para armazenar, comprimir, produzir e fornecer o hidrogênio verde utilizando água residual de atividades mineradoras, onde o subproduto dessa operação é o oxigênio, posteriormente liberado para atmosfera.

Atualmente, a produção de hidrogênio verde ainda se encontra em início de desenvolvimento (ZABALOY et al., 2021). A contribuição do hidrogênio verde na produção atual de hidrogênio puro no mundo é de menos de 1%. Porém, apesar dessa pequena porcentagem, a tecnologia já é comercial e pronta para ser ampliada, com diversos projetos anunciados até 2025 (IRENA, 2020). Não obstante, Bezerra (2021) aponta em sua análise setorial, a previsão de que o mercado do hidrogênio verde em 2050 seja de aproximadamente US\$ 3 trilhões e que corresponda a 20% da produção de energia no mundo, além da produção anual atingir 90 GW à nível global.

Produção de Hidrogênio Verde no Brasil

No Brasil, no fim de 2021, foi iniciada, nas acomodações da Usina Hidrelétrica de Itumbiara, localizada entre os estados de Minas Gerais e Goiás, uma planta de estudos de geração de hidrogênio verde, com

¹ <https://www.global.toshiba/ww/news/energy/2020/03/news-20200307-01.html>

eficiência de produção de 1000 kWp (quilowatts pico), onde o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) utiliza um sistema fotovoltaico que fornece energia para a produção do hidrogênio verde, armazenando-o na forma gasosa, em um tanque instalado na própria planta. A energia produzida será integrada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) pela subestação já instalada na própria usina, com finalidade de uso voltado para serviços como iluminação, tomadas e ventilação na hidrelétrica.

Outro projeto de P&D que entrará em atividade até o final deste ano (2022), no Brasil, é a unidade-piloto de produção de hidrogênio verde no estado do Ceará, na qual a usina vai fazer uso da energia fotovoltaica para abastecer a produção de 22,5 kg de hidrogênio verde por hora. A finalidade deste hidrogênio é compensar uma parte do carvão mineral que abastece a Usina Termelétrica do Pecém (UTE Pecém) com a expectativa de implementação de uma aplicação em escala industrial no estado (ZAPAROLLI, 2022). Outros projetos com aplicação em escala industrial no Brasil, ainda em fase de estudos, são os do Porto de Suape, no estado de Pernambuco, e os no Porto do Açú, no estado do Rio de Janeiro (CHIAPPINI, 2021b).

Os projetos que estão sendo desenvolvidos acerca da produção de hidrogênio verde são os chamados *hubs*, nos quais concentram em uma localização geográfica favorável a produção de energias renováveis, a produção do hidrogênio verde, sua armazenagem e transporte e consumidores industriais. Se localizados adjacentes de zonas portuárias e gasodutos, os *hubs* possuem a importante vantagem de acesso a transportes marítimos ou terrestres para consumir a produção internamente ou para realizar exportações (CASTRO et al., 2021a).

No Brasil, o maior projeto de *hub* de hidrogênio verde se encontra no estado do Ceará, no complexo portuário do Pecém. O governo do estado do Ceará em parceria com a *Energix Energy*, uma empresa australiana de energia, anunciaram em 2021 o projeto chamado *Base One*, com investimentos de cerca de US\$5,4 bilhões, no qual produzirão 600 mil toneladas do combustível verde por ano a partir de energia solar e eólica de 3,4GW de potência, combinadas. A área reservada para a construção deste projeto possui 500 hectares para se tornar possível o processo de eletrólise da água, aproveitando o enorme potencial energético renovável que o estado possui disponível, tanto em energia solar como eólica instaladas em terra (*onshore*) e até no mar (*offshore*). A localização do *hub* é privilegiada, com acesso a todos os mercados internacionais via oceano e a expectativa é o projeto levar três anos para ser totalmente construído (RAMOS, 2021).

No Rio de Janeiro, a Shell Brasil assinou um memorando com o porto do Açú para avançar em um projeto de planta-piloto de produção do hidrogênio verde em São João da Barra, região norte do estado. O projeto contará com uma capacidade inicial de 10 MW, podendo chegar a 100 MW de potência no futuro. A previsão do início das atividades é em 2025 com parte da produção voltada para armazenamento e encaminhada, posteriormente, para eventuais consumidores. O remanescente desta produção será destinado à produção de amônia verde (EPBR, 2022).

A Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CESP) vem elaborando na usina

hidrelétrica Engenheiro Sérgio Mota/Porto Primavera (UHE) um conjunto de energias renováveis, composto por usinas eólicas, solar e armazenamento de energia, fazendo parte de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Informação da companhia. A UHE foi instalada no rio Paraná, fazendo divisa entre os estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo, com capacidade de 1540 MW. O projeto conta com um eletrolisador de água do tipo PEM com 107 kW de potência capaz de produzir 20 Nm³/h de hidrogênio. Resumidamente, neste projeto o excedente de energia produzido pela hidrelétrica e planta fotovoltaica é transformado em hidrogênio verde pelo processo da eletrólise, sendo este armazenado nos tanques pressurizados para utilizar em horários de pico ou épocas de seca (SILVA et al., 2019).

Delgado et al. (2021) observam que o Brasil tende a despontar como principal futuro candidato a exportação do hidrogênio verde pela sua larga disponibilidade de recursos energéticos dispersos em todo seu território geográfico. Porém, mesmo com esse potencial, o país não possui, até o presente momento, estratégias para regulamentar, produzir, consumir, transportar, armazenar e exportar o hidrogênio, a ponto de incluí-lo no seu planejamento e matriz energética, o que pode impactar no ritmo da produção deste combustível. Grande parte do uso deste elemento no Brasil é regulado por leis específicas de indústrias que utilizam o hidrogênio na sua própria cadeia. As entidades que regulam as águas utilizadas para obtenção do hidrogênio verde, a geração de energias renováveis e o transporte de todos os tipos de hidrogênio entre os estados são a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), respectivamente (BRASIL et al., 2022). A sua competitividade internacional, como exportador do hidrogênio verde, depende principalmente de custos de acondicionamento, distribuição e transporte para os principais países consumidores (SANTOS et al., 2021).

Aplicabilidade do Hidrogênio Verde e Perspectivas Futuras

O hidrogênio é um vetor energético extremamente flexível que pode ser aplicado em vários setores (ACAR et al., 2019; FRENCH, 2020). A substituição do hidrogênio cinza (produzido através de fontes não renováveis) pelo hidrogênio verde é uma forma de descarbonizar a economia, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa (GEE). Outra maneira de solucionar este problema é adquirindo energia através de fontes renováveis em todos os setores da economia. Essas fontes renováveis, que podem ser eólicas, solares ou de biomassa, geram eletricidade e o hidrogênio pode servir como um integrador entre o processo de geração de eletricidade e outros usos e aplicações, como o uso químico e energético. Essa tecnologia é conhecida como “Power-to-x” (PtX) (MME et al., 2021).

O estudo “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio verde” (MME et al., 2021), desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia (MME) com cooperação do Ministério Alemão de Economia e Energia (BMW) e da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH no âmbito da Parceria Energética Brasil-Alemanha traz um resumo apresentando as tecnologias principais de PtX, suas relevâncias e alguns empreendimentos em desenvolvimento. Este estudo ainda elucida alguns setores, além do elétrico, que apresentam grande

potencial para substituição das atuais matérias-primas por hidrogênio verde, que são: a indústria cimenteira, de mineração, siderúrgica, setor residencial e de transportes.

O projeto Hanson (2020) financiado pelo Departamento de Negócios, Energia e Estratégia Industrial (BEIS) no Reino Unido, concluiu que existe a possibilidade de combinar hidrogênio verde com biomassa para superar o problema do alto poder calorífico que o hidrogênio possui, quando adicionado na produção de cimento, impedindo a formação correta do clínquer.

Ainda, nas atividades de mineração, o H₂V oferece uma grande oportunidade para diminuir o uso do diesel (consumido por veículos pesados nesse setor) e descarbonizar as operações nesta indústria, com potencial para células a combustível alimentarem as plantas da instalação, os veículos de mineração e a matéria-prima (ZAKHARIA, 2020).

No setor residencial e de escritórios, o hidrogênio verde pode ser adicionado ao gás natural, em regiões onde já existe infraestrutura tubular desse gás (até 20% de mistura) para descarbonizar o setor de geração de calor e eletricidade para esses ambientes. Ainda, Osaka Gas, no Japão, oferece o serviço de pilha a combustível combinada a energia solar para telhados de residências, reduzindo em 57% as emissões do CO₂ doméstico (MME et al., 2021).

No setor de transporte, as melhorias na eficiência, eletrificação e maior uso de biocombustíveis acarretaram a redução de emissões globais nesse setor. Em 2019, o índice de emissão proveniente de veículos atingiu menos de 0,5% onde desde 2000 esse índice era 1,9% por ano. Porém, as emissões diretas de dióxido de carbono causadas por esse setor ainda são significativas, atingindo 24% (IEA). O hidrogênio verde pode ser utilizado neste setor para sua descarbonização, como prevê o projeto *Hydrogen Mobility Europe* (2020) que implantou centenas de carros, caminhões e vans movidos a hidrogênio com célula a combustível, criando uma base para uma rede paneuropeia de postos de abastecimento de hidrogênio. O projeto entrou em vigor em 2016 com implantação atualmente de mais de 1400 veículos e 45 postos de abastecimento de hidrogênio, alcançando 147 toneladas de H₂ distribuídos e 14,5 milhões de quilômetros rodados.

No Brasil, o setor do agronegócio pode ser um grande líder mundial no mercado de hidrogênio verde, visto que tem potencial para produzir a substância em larga escala, utilizando energias renováveis associadas a sistemas de produção de biomassa e biogás. A molécula tem potencial para substituir os combustíveis de origem fósseis utilizados nos veículos que transportam os produtos agrícolas (CONAB, 2021).

Os últimos anos são considerados chave para a evolução do hidrogênio no mundo, com o aumento do seu uso em várias economias globais. O Conselho Mundial de Energia (WEC, 2020) estima que até 2025 os países que detém até 80% do PIB mundial irão desenvolver estratégias de hidrogênio para suas economias.

Um dos maiores entraves para o desenvolvimento do hidrogênio verde a curto prazo é o seu preço. Porém, o jornalista Marian Willuhn em 2020² informa que a economia de escala e uma maior implantação

²<https://www.pv-magazine.com/2020/07/16/green-hydrogen-to-reach-price-parity-with-grey-hydrogen-in-2030/#:~:text=IHS%20Markit's%20latest%20report%20looks,with%20grey%20and%20blue%20hydrogen>

de energias renováveis farão com que a diferença entre os valores do hidrogênio verde e o cinza deixe de existir até o ano de 2030.

Os custos de produção do hidrogênio verde também precisam ser reduzidos para uma evolução efetiva. O preço das energias renováveis em 2030 pode chegar a 15% menos que o previsto em 2020, sendo que essas reduções são esperadas em países com disponibilidade o suficiente desses recursos (HYDROGEN COUNCIL, 2021a). No Brasil, os custos destas energias, especialmente a solar e eólica, reduziram significativamente nos últimos anos, onde é esperado que se mantenha em queda (EPE, 2018) isso porque o país já possui uma disponibilidade acima das médias globais em participação de fontes renováveis na sua matriz energética e elétrica (BEN EPE, 2020).

Ainda, eletrólise tem perspectiva de redução do seu custo, que hoje se encontra em média a US\$5 por quilo de hidrogênio. Essa redução está diretamente atrelada à implantação desta tecnologia comercialmente (SANTOS et al., 2021), onde a ampliação dos eletrolisadores pode reduzir em 50%os seus custos até 2030 (HYDROGEN COUNCIL, 2021b).

A meta de produção do hidrogênio verde e de baixo carbono para 2030 é de 75 megatoneladas (MT) ao ano, valor que substituiria o hidrogênio obtido por fontes não-renováveis dos mercados existentes (refino, amônia, metanol). Ainda com esta meta, o hidrogênio verde poderia ser inserido nos transportes terrestres pesados e na indústria siderúrgica, considerados setores de difícil descarbonização. Caso atingida, a estimativa é de redução de até 730 MT de dióxido de carbono anuais na atmosfera (HYDROGEN COUNCIL, 2021b).

No setor de transportes, a tecnologia de células a combustível, que converte o hidrogênio em calor e energia de forma eficiente, tem a possibilidade de se destacar, onde pode ampliar o leque de veículos elétricos (CASTRO et al., 2021c). Os custos dos veículos que funcionam à célula a combustível são, atualmente, muito mais elevados que os custos dos veículos elétricos a bateria e os movidos a combustíveis fósseis, mas com a produção em massa os valores podem alcançar igualdade entre os anos de 2025 e 2030 (RODRIGUES et al., 2019).

A produção de hidrogênio verde no Brasil tende a atender futuramente a demanda interna de vários países, principalmente da União Europeia, que não possui as mesmas condições climáticas e energéticas renováveis que o Brasil. Mas, apesar das perspectivas serem promissoras, o Brasil precisa promover o desenvolvimento do hidrogênio verde em toda sua cadeia produtiva, viabilizando projetos em maior escala, buscando a exportação (CASTRO et al., 2021b). As principais possibilidades para o mercado interno são aplicações deste vetor energético renovável nas indústrias, nos transportes, no armazenamento de energia e nas aplicações *Power-to-X*. Contudo, a custos competitivos, a produção de hidrogênio verde no país tem maior potencial para exportação em um mercado futuro (CASTRO et al., 2021b).

CONCLUSÕES

Constatou-se, com base nas pesquisas realizadas nesta revisão, que o cenário atual de

desenvolvimento do hidrogênio verde está voltado para projetos de viabilidade da sua produção, armazenamento e transporte, em fase inicial. No Brasil, a maioria dos projetos existentes são de pesquisa, desenvolvimento e inovação, financiados por multinacionais, que estudam a produção do H₂V para posterior exportação com pouca possibilidade de produção para uso interno deste combustível verde a curto prazo.

Por fim, o hidrogênio verde tem grandes possibilidades de fazer parte das economias globais no futuro, tanto em países que não possuem elevada disponibilidade de energias renováveis quanto naqueles que a possuem, como o Brasil. Contudo, os custos da sua produção e os preços das energias renováveis destacam-se como os principais empecilhos para um maior uso deste vetor energético atualmente, sendo necessária, então, uma redução considerável para aplicação desse vetor energético em escala global.

REFERÊNCIAS

ABAD, A. V.; DODDS, P. E.. Green hydrogen characterization initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. **Energy Policy**, v.138, p.11130, 2020.

ACAR, C.; DINCER, I.. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. **Journal of Cleaner Production**, v.218, p.835-849, 2019.

BARBOSA, H. A.. **Processos de produção e estocagem de hidrogênio: uma revisão de literatura**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

BARKER, G.; SIMPSON, B.. **Hidrogênio verde na Austrália: um caminho para o gás de carbono zero**. Siemens Energy, 2022.

BEN EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

BEZERRA, F. D.. Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**, v.6, n.212, p.1-13, 2021.

BRAGA, G. G. A.. **Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Área de Energia) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

BRASIL, G.; PERA, M.. **Hidrogênio Verde: uma nova e rentável fronteira energética**. Ensaio. Nexo Jornal, 2022.

CASTRO, N.; BRAGA, S.; ELIZÁRIO, S.; MOSZKOWICZ, M.; SERRA, E.; CHAVES, A. C.; BRANQUINHO, A.; PRADELLE, F.; CHANTRE, C.; CAMPELLO, R.; BOTELHO, V.. **Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro**. Texto de Discussão do Setor Elétrico. n.100. Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL), 2021a.

CASTRO, N.; ELIZÁRIO, S.; MASSENO, L.; CASTRO, B.. **Observatório de Hidrogênio Nº3**. Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL), 2021b.

CASTRO, N.; ELIZÁRIO, S.; MASSENO, L.; CASTRO, B..

Observatório de Hidrogênio Nº2. Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL), 2021c.

CHIAPPINI, G.. **Custo do hidrogênio verde precisa cair a US\$ 3/kg para ser competitivo**. Agência EPBR, 2021a.

CHIAPPINI, G.. **Portos com eólicas offshore são modelos preferidos para hidrogênio verde no Brasil**. Agência EPBR, 2021b.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Hidrogênio verde pode garantir sustentabilidade no agronegócio**. Summit Agro. Canal agro. CONAB, 2021.

DELGADO, F.; COSTA, A. M.. Os caminhos do país na construção da economia global do hidrogênio. **Conjuntura Econômica**, v.75, n.03, p.38-42, 2021.

ENGIE. Brasil Energia. **Saiba o que é Hidrogênio Verde e a sua importância para a transição energética**. Além da Energia. ENGIE, 2022.

EPBR. Shell anuncia projeto-piloto de hidrogênio verde no Porto do Açú. Setor elétrico. Transição energética. Agência EPBR, 2022.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica PR 07/18**. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte de 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

FRENCH, S.. The role of zero and low carbon hydrogen in enabling the energy transition and the path to net zero greenhouse gas emissions: with global policies and demonstration projects hydrogen can play a role in a net zero future. **Johnson Matthey Technology Review**, v.64, n.3, p.357-370, 2020.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen for Net-Zero: A critical cost-competitive energy vector..** McKinsey & Company, 2021b.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. Hydrogen Insights Report 2021. Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2021a.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Green**

Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi. IRENA, 2020.

JUNGES, R. S.. **Automação de reator de hidrogênio para a alimentação de motogerador em geração distribuída.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

KALAMARAS, C. M.; EFSTATHIOU, A. M.. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. **Conference Papers in Science**, v.2013, p.1-9, 2013.

LAMEIRAS, F. L.. **O hidrogênio como vetor de energia.** Monografia (Altos Estudos de Política e Estratégia – CAEPE) - Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2019.

MACHADO, N.. **Cinco estados no Nordeste têm projetos para hidrogênio verde.** Diálogos da transição. 2021a.

MACHADO, N.. **Onze países têm roteiros para hidrogênio na América Latina.** Diálogos da transição. 2021b.

MCKINSEY. **Hidrogênio Verde:** Uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. McKinsey & Company, 2021.

MME; BMWi; GIZ. Ministério de Minas e Energia; Ministério Alemão de Economia e Energia; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro:** Panorama atual e potenciais para o Hidrogênio Verde. MME, 2021.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A.. A comparative overview of hydrogen production processes. **Elsevier Renewable Sustainable Energy Review**, v.67, p.597-611, 2016.

NOGUEIRA, S.. **Hidrogênio:** as perspectivas reais para o mais limpo dos combustíveis. Ciência, 2021.

NORONHA, M. E. S.; MELO, A. T. S.; RODRIGUES, C. D.; MORAES, L. M.. Hidrogênio e energia eólica: uma revisão sistemática. In: CONGRESSO DE ADMINISTRAÇÃO, SOCIEDADE E INOVAÇÃO. **Anais**. 2021. p.1-19.

RAMOS, A.. **Maior usina de hidrogênio verde do mundo será construída no Ceará; investimento de US\$5,4 bilhões.**

União Nacional de Bioenergia (UDOP), 2021.

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. **Anais do VII Seminário Internacional Ético Racial**, Guarulhos, v.7, n.1, 2019.

SANTOS, F. M. S. M.; SANTOS, F. A. C. M.. Combustível “Hidrogênio”. **Millenium – Journal of Education, Technologies and Health**, v.31, p.252-270. 2016.

SANTOS, V.; OHARA, A.. **Desafios e oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio Verde.** Instituto E+ Transição Energética. Heinrich BöllStiftung. 2021.

SILVA, E. P.; FURTADO JÚNIOR, J. C.; RIEDEL, V. F.; SILVA, D. B.; SILVA, D. O. B.; FERREIRA, T. D. A.. Descrição e previsão de resultados do sistema de armazenamento de energia elétrica sob a forma de hidrogênio da CESP instalado junto à UHE Eng. Sérgio Mota (Porto Primavera). Grupo de Estudos de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES. In: SNPTÉE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15. **Anais**. Belo Horizonte, 2019.

SILVA, I. A.. Hidrogênio: Combustível do Futuro. **Ensaio e Ciências, Cienc. Biol. Agrar. Saúde**, v.20, n.2, p.122-126, 2016.

SULEMAN, F.; DINCER, I.; CHAAB, M. A.. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.40, n.21, p.6976-6987, 2015.

WEC. World Energy Council. **Hydrogen Study:** International H2 Strategies. World Energy Council, 2020.

ZABALOY, M.; GUZOWSKI, C.; DIDRIKSEN, L.. Hidrógeno verde en Argentina: desarrollo actual y perspectivas a futuro. **Energía y desarrollo sustentable**, n.6, p.35-51, 2021.

ZAKHARIA, N.. **Mining heavyweights form Green Hydrogen Consortium.** Australian Mining, 2020.

ZAPAROLLI, D.. Brasil prepara-se para iniciar a produção de hidrogênio verde. **Energia. Revista Pesquisa Fapesp**, v.314, 2022.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.