

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA CADEIA DO HIDROGÊNIO VERDE

**LUCIANO TAVARES ⁽¹⁾; SAMUEL D. VASCONCELOS ⁽²⁾; CAYO CID
DE FRANCA MORAES ⁽³⁾; DIEGO DE MOURA REBOUÇAS ⁽³⁾.**

**⁽¹⁾ IATI – INSTITUTO AVANÇADO DE TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO; ⁽²⁾ UFPE - UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO; ⁽³⁾ EDP BRASIL.**

RESUMO

O hidrogênio molecular, equiparado à eletricidade como vetor energético, desempenha um papel crucial na transição para fontes sustentáveis. Atualmente, sua produção, predominantemente derivada de combustíveis fósseis, demanda uma transição para tecnologias mais sustentáveis, como a eletrólise para a obtenção de hidrogênio verde. Este estudo tem como objetivo realizar uma análise abrangente dos cenários e configurações da cadeia de produção do hidrogênio verde, com foco na identificação dos principais pontos que impactam sua eficiência energética. Considerando o contexto do uso do hidrogênio como vetor de energia, a cadeia do hidrogênio tem duas configurações principais: Power-to-Gas (P2G) e Power-to-Gas-to-Power (P2G2P).

No primeiro cenário, P2G, o hidrogênio é produzido a partir de fontes de energia renovável, pelo processo da eletrólise, podendo passar pelas etapas de armazenamento e compressão [1]. Após a produção, o hidrogênio verde pode ser diretamente utilizado como fonte de energia ou como insumo em diversas aplicações industriais, como combustível veicular, industrial (caldeiras, fornos, etc.), e na indústria química para sínteses orgânicas, como hidrogenação de hidrocarbonetos, transformação de gorduras em óleos vegetais, produção de amônia e metanol, entre outros usos. Alternativamente pode ser injetado na rede de gás natural.

No segundo cenário, P2G2P, o hidrogênio verde é considerado um meio de armazenamento de energia renovável, sendo produzido por eletrólise e, na etapa final, o hidrogênio armazenado é reconvertido em energia elétrica, utilizando uma célula de combustível [1]. Esse cenário viabiliza o uso de energias renováveis como solar e eólica sob demanda, pois, por sua própria natureza, são formas de geração de energia que não permitem esse tipo de controle.

Dada a abrangência da aplicação do hidrogênio, o estudo foi realizado considerando os cenários mencionados, contemplando os estágios necessários para o armazenamento e uso final do insumo. Observou-se que alguns processos impactam consideravelmente a eficiência da transformação da energia na cadeia do hidrogênio verde, como os estágios de elevação de pressão para armazenamento e transporte.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio verde, eficiência energética, conversão energia gás, conversão energia gás energia, cadeia do hidrogênio verde.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o problema de emissão de gases de efeito estufa transcende fronteiras, configurando-se como uma questão global. Diante desse cenário, em 2015 diversas nações colaboraram na elaboração do Acordo de Paris, objetivando a progressiva eliminação da utilização do carvão [2]. Mediante acordos e metas delineadas, países como Canadá, Chile, Finlândia, Hungria, Itália, Holanda e Portugal comprometeram-se a extinguir a utilização de carvão até o ano de 2030. Uma meta adicional estipulada pelo Acordo de Paris consiste na instituição de taxas sobre a emissão de carbono, com o intuito de desencorajar sua utilização. Paralelamente, mesmo sem estabelecerem acordos específicos quanto ao uso do carvão, nações como Colômbia, Japão, Noruega e Estados Unidos já implementam taxações sobre a emissão de CO_2 .

Nesse contexto, visando atender à prerrogativa de redução das emissões de gases de efeito estufa, o hidrogênio emergiu como uma tecnologia inovadora, buscando suprir a demanda por energia sem a concomitante emissão de CO_2 . O hidrogênio pode ser obtido de diversas formas, que se diferenciam principalmente pela utilização ou não de matéria-prima de origem fóssil, bem como pela emissão ou não de CO_2 durante o processo de produção do hidrogênio. Para distinguir as distintas cadeias de obtenção do hidrogênio, foi estabelecida uma terminologia de cores, na qual cada matiz denota o hidrogênio obtido por um processo distinto. A Tabela 1 apresenta as principais terminologias amplamente aceitas, além de detalhar as especificidades de cada uma das categorias.

Tabela 1 - O espectro de cor do hidrogênio e as indicações para as emissões de carbono. Fonte: adaptado de [3].

	Terminologia	Tecnologia de produção	Matéria prima/ fonte de energia para o processo	Pegada de carbono
Produção via eletricidade	Verde	Eletrólise	Solar, hídrica, vento, maré, geotérmica	Mínima
	Rosa		Nuclear	
	Amarelo		Energia mista da rede	Média
Produção via combustíveis fósseis	Azul	Reforma de gás natural com captura de carbono e gaseificação com captura de carbono	Gás natural, carvão	Baixa
	Turquesa	Pirólise	Gás natural	Carbono sólido
	Cinza	Reforma de gás natural		Média
	Marrom	Gaseificação	Carvão marrom	Alta
	Preto		Carvão	

Considerando a eletrólise para a produção do hidrogênio e no caso de utilizar energia proveniente de fontes renováveis, como solar, hídrica, eólica, geotérmica ou de marés, o hidrogênio resultante é denominado "verde". O hidrogênio verde, produzido com emissões nulas de CO₂, se posiciona como um vetor de energia renovável, desempenhando um papel crucial no aspecto ambiental, especialmente em setores nos quais a redução nas emissões de CO₂ não é uma tarefa simples.

Um exemplo é o setor de transporte a longa distância, no qual o uso de veículos movidos a hidrogênio verde pode reduzir a dependência do diesel. Outro exemplo é o setor siderúrgico, no qual o hidrogênio verde pode substituir total ou parcialmente o carvão utilizado no aquecimento das caldeiras. Além disso, o setor químico pode substituir o hidrogênio cinza, utilizado na produção de metano e amônia, pelo hidrogênio verde. Adicionalmente, o hidrogênio verde pode desempenhar o papel de elemento balanceador a longo prazo, aumentando a flexibilidade da matriz energética e servindo como solução para o armazenamento de energia em períodos prolongados.

Contudo, o hidrogênio verde como estratégia de descarbonização da economia é amplamente criticado por fatores como o custo elevado de produção devido à necessidade de infraestrutura e tecnologias em desenvolvimento, a eficiência energética considerando o consumo de energia pela eletrólise, a escalabilidade devida a desafios técnicos e econômicos para grandes sistemas de produção e a competição com outras tecnologias e fontes renováveis tecnologicamente mais maduras como solar, eólica e o armazenamento de energia em baterias.

Dado o contexto, esse tudo propõe contribuir com uma análise de cenários de configuração da cadeia de produção de hidrogênio verde, focando na identificação dos principais fatores que impactam sua eficiência energética, um dos pilares essenciais para a concretização desta transição energética.

2. CENARIOS DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGENIO VERDE

Diferentemente da energia elétrica, que tem apenas uma forma de apresentação por meio de cargas elétricas (elétrons e prótons), a utilização do hidrogênio verde como vetor energético pode ser observada em diferentes formas, uma vez que a energia nele contida pode ser convertida em diferentes formas como calor, eletricidade etc. Para cada tipo de conversão, existe uma configuração da cadeia do hidrogênio verde. Entre esses tipos destacam-se dois cenários principais: *Power-to-Gas* (P2G) e *Power-to-Gas-to-Power* (P2G2P).

No primeiro cenário, P2G, o hidrogênio verde é obtido a partir da energia elétrica de fontes renováveis através da quebra da molécula da água, processo também conhecido como eletrólise [1]. Após a produção, o hidrogênio verde pode ser diretamente utilizado como fonte de energia ou como insumo em diferentes aplicações industriais, como por exemplo a utilização como combustível veicular em aplicações de transporte, no meio industrial como fonte de energia para processos térmicos envolvendo a operação de caldeiras, fornos, etc., e na indústria química como insumo para sínteses orgânicas, como hidrogenação de hidrocarbonetos, transformação de gorduras em óleos vegetais, produção de amônia e metanol, entre outros usos.

No segundo cenário, P2G2P, o hidrogênio verde é visto como um meio de armazenamento de energia renovável, sendo produzido, armazenado e, quando necessário, convertido novamente em energia elétrica, através de uma célula de combustível [1]. Esse cenário possibilita o uso de energias renováveis como solar e eólica sob demanda, pois, por sua própria natureza, são formas de geração de energia que não permitem esse tipo de controle.

Dada a abrangência da aplicação do hidrogênio, o estudo foi realizado considerando os dois cenários mencionados, contemplando os estágios necessários para o armazenamento e uso final do insumo. Observou-se que alguns processos impactam consideravelmente a eficiência da transformação da energia na cadeia do hidrogênio verde, como os estágios de elevação de pressão para armazenamento e transporte[4].

2.1. CADEIA DO HIDROGÊNIO VERDE

Os principais elementos que compõem a cadeia de hidrogênio verde são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A seguir será descrita cada etapa da cadeia do hidrogênio verde.

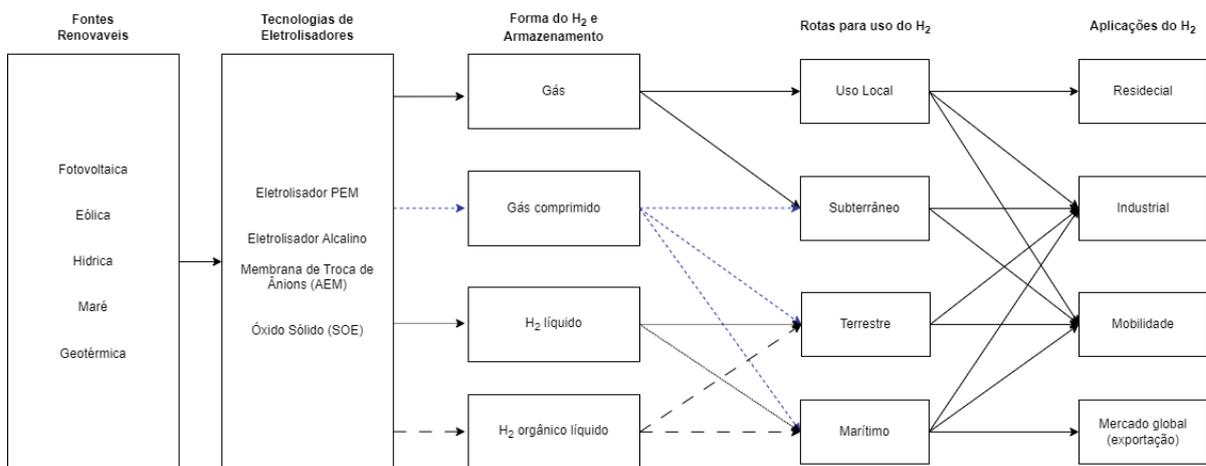


Figura 1- Principais elementos da cadeia de hidrogênio verde. Fonte: Próprio autor.

- **Fontes Renováveis**

As fontes de energia renovável desempenham um papel crucial na busca por alternativas sustentáveis e ecologicamente responsáveis para atender às crescentes demandas energéticas da sociedade contemporânea. A definição em constante evolução de energia renovável destaca a importância do período necessário para substituir essas fontes, ressaltando que a taxa de consumo deve ser cuidadosamente equilibrada em relação à capacidade da natureza de renová-las. Esse princípio sublinha a necessidade de uma abordagem equilibrada que evite a exploração excessiva e promova a gestão sustentável desses recursos.

No contexto específico do hidrogênio, a atenção concentra-se principalmente nas tecnologias fotovoltaicas e eólicas, devido aos significativos avanços observados nos últimos anos e à facilidade de implementação. Por outro lado, tecnologias como hídras, de marés e geotérmica são consideradas opções secundárias devido aos desafios mais complexos relacionados à sua implantação [5].

- **Tecnologias de Eletrolisadores**

O eletrolisador desempenha um papel central na produção do hidrogênio verde, realizando a divisão das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio por meio da aplicação de

energia gerada a partir de fontes renováveis. No atual panorama, duas tecnologias de eletrolisadores predominam comercialmente: o eletrolisador alcalino e o eletrolisador PEM.

O método alcalino de produção de hidrogênio é uma tecnologia consolidada e com produção comercial na faixa de megawatts. O processo de produção de hidrogênio pelo método alcalino consiste na eletrólise da água usando uma solução alcalina (como NaOH ou KOH) como eletrólito e eletrodos de metal (como níquel ou ferro) com ânodo e cátodo. Nessa reação ($2H_2O + 2OH^- \rightarrow O_2 + H_2 + 2OH^-$), o oxigênio é liberado no ânodo e o hidrogênio é liberado no cátodo. A solução alcalina facilita a condução da corrente elétrica e aumenta a eficiência do processo.

O processo de eletrólise alcalina de água inicia-se no lado catódico, onde duas moléculas da solução alcalina são reduzidas a uma molécula de hidrogênio H_2 , gerando dois íons hidróxidos OH^- como subproduto. O H_2 produzido se desprende do catodo e recombina-se em estado gasoso, enquanto os íons OH^- são transferidos sob a influência do circuito elétrico entre o ânodo e o cátodo. Os íons OH^- transferidos para o anodo descarregam formando meia molécula de oxigênio (O_2), e uma de molécula de água (H_2O), o O_2 se recombinará na superfície do eletrodo e escapará como hidrogênio conforme ilustrado na Figura 2 [6] [7].

A eletrólise alcalina opera em temperaturas mais baixas em comparação a outros métodos de eletrolise, geralmente entre 40 °C a 90 °C. No entanto, o método alcalino apresenta desafios como densidades de corrente limitadas (abaixo de 400 mA/cm²) e a baixa pressão operacional de 3 a 30 bar.

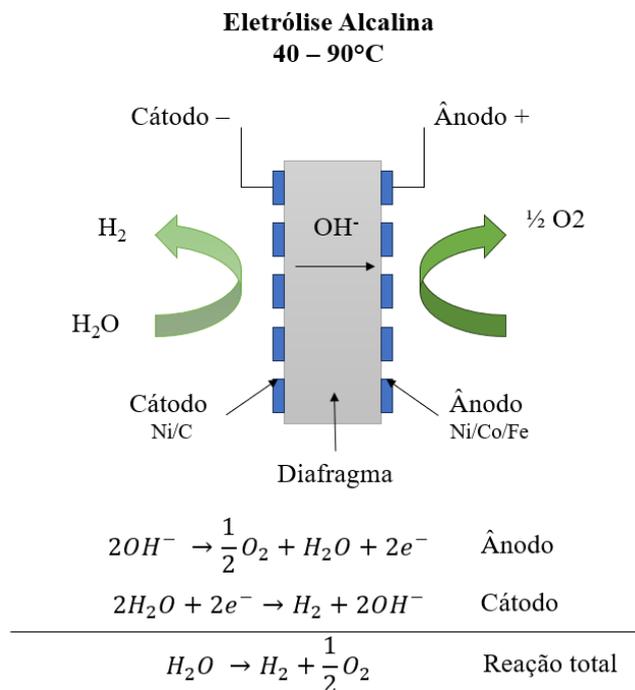


Figura 2 - Princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise de água alcalina. Fonte:[8].

No método de eletrólise de água PEM, a água é dividida em hidrogênio e oxigênio nos respectivos eletrodos, com o hidrogênio no cátodo e o oxigênio no ânodo. Nesse processo, a água é acumulada por um bombeador de água e direcionada ao ânodo, onde ocorre a liberação de oxigênio (O_2), 1 mol de hidrogênio (H^+) e elétrons (e^-). O mol de hidrogênio presente no

ânodo reage quando submetido à água, sendo conduzido através de uma membrana condutora de prótons até o lado do cátodo. Os elétrons deixam o ânodo através do circuito externo de energia, fornecendo a força motriz (tensão da célula) para a reação. No cátodo, os mols de hidrogênio e elétrons se recombina, resultando na produção de hidrogênio no formato gasoso. O esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise do tipo PEM é ilustrado na Figura 3.

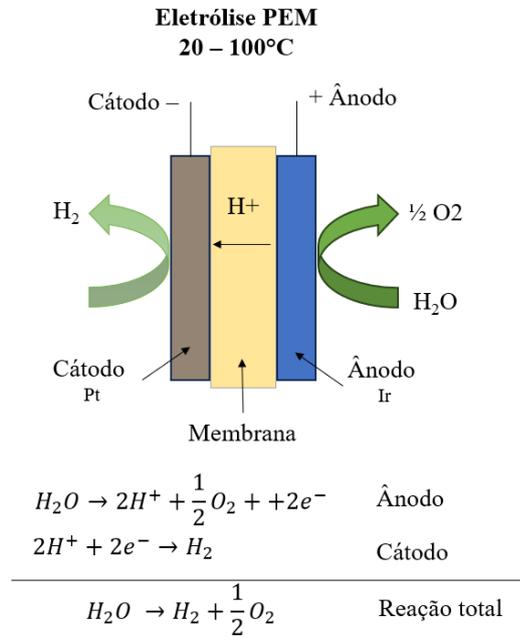


Figura 3 - Esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise do tipo PEM.
Fonte: [8].

Opções como a membrana de troca de ânions alcalinos (AEM) e o Eletrolisador de Óxido Sólido (SOE) estão atualmente em fase de desenvolvimento. O AEM utiliza técnicas combinadas das tecnologias PEM e alcalina, incorporando a membrana da tecnologia PEM e os ânions alcalinos do eletrolisador alcalino. Já a opção de Óxido Sólido utiliza vapor e opera a uma temperatura mais elevada em comparação com outras técnicas de eletrólise [7]. Cerca de um terço da energia necessária para o SOE é proveniente do calor, sendo preferencialmente conectado a uma fonte térmica de alta temperatura [7]. A eficiência do SOE é elevada devido à sua operação em alta temperatura [7]. Embora o SOE esteja menos desenvolvido em comparação com o AWE e o PEM, seu potencial é frequentemente destacado na literatura, ganhando crescente interesse[7].

- **Formas do Hidrogênio e Armazenamento**

Após a saída do eletrolisador, o hidrogênio se encontra em um estado gasoso de baixa pressão, assim pode ser usado localmente ou armazenado em contêineres subterrâneos conhecidos como cavernas de hidrogênio ou tanques de baixa pressão. No entanto, para o transporte, o hidrogênio pode assumir diferentes estados, como gasoso e líquido. A Figura 4 ilustra as opções de estado do hidrogênio para transporte e suas respectivas formas de armazenamento.

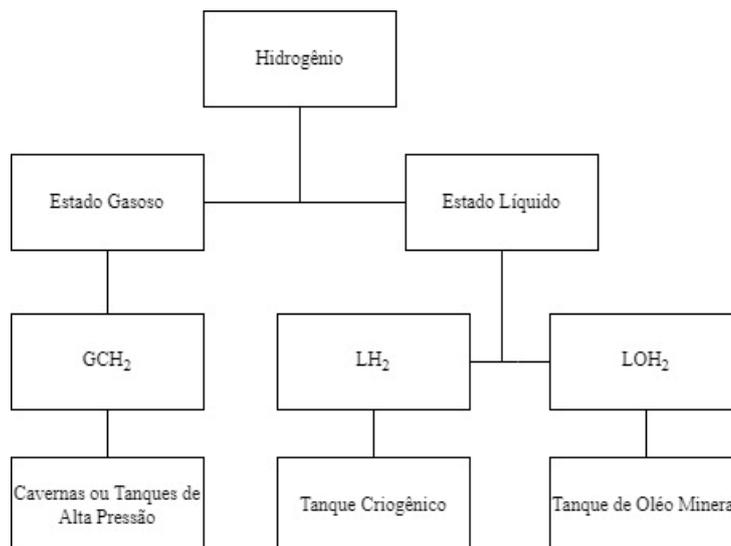


Figura 4 - Estado do hidrogênio para transporte e tipos de armazenamento

Na forma gasosa, o método GCH₂ (Gás Comprimido de Hidrogênio) é empregado, envolvendo a compressão do gás para facilitar o transporte. Esta compressão pode atingir valores de até 900 bar [9]. Para o hidrogênio na forma GCH₂, o armazenamento pode ser realizado em tanques de alta pressão ou em cavernas [10].

Já na forma líquida, existem duas configurações: Hidrogênio liquefeito (LH₂) e o método LOH₂ (Hidrogênio Orgânico Líquido). No método de hidrogênio liquefeito LH₂, o hidrogênio é transformado em estado líquido para transporte, proporcionando alta densidade energética, no entanto para o hidrogênio atingir o estado líquido deve-se estar a uma temperatura de -253° C. o que leva a necessidade de uma etapa de liquefação energeticamente onerosa [10]. Nessa opção o armazenamento é feito através de tanques criogênicos pela baixa temperatura [9].

No método LOH₂, o hidrogênio é transportado na forma de outra substância com baixo valor energético. processo denominado de hidrogenação. Exemplos de substâncias são o tolueno, metanol e amônia. Nesse método, no local de entrega ou local de aplicação do hidrogênio, um novo processo denominado desidrogenação é utilizado para retirar o hidrogênio da substância de transporte, um dos benefícios é o fato de que as substâncias de transportes são líquidos em condições ambientais. Outros benefícios consistem na semelhança aos derivados do petróleo bruto, podendo ser utilizada a infraestrutura pré-existente com poucas modificações. Como forma de armazenamento pode ser utilizado um tanque de óleo mineral [10].

- **Rotas para o Uso do Hidrogênio**

Em linhas gerais, as principais formas de transporte do hidrogênio são a rota terrestre, marítima e subterrânea. Na rota terrestre, o transporte é realizado por caminhões ou trailers adaptados para o transporte do hidrogênio. A rota marítima envolve a utilização de navios ou barcos adaptados para o transporte do hidrogênio. Para barcos pequenos, a função primária é o transporte do hidrogênio, semelhante às opções terrestres [11], No entanto, para embarcações marítimas de grande porte, não há a necessidade de adaptação na embarcação, apenas a disposição do armazenamento dentro do transporte [12]. A opção de rota marítima está associada principalmente ao transporte para longas distâncias ou na impossibilidade de rotas

terrestres e subterrâneas [10]. A rota subterrânea envolve o uso de gasodutos para o transporte do hidrogênio, sendo associada ao hidrogênio na forma gasosa, comprimido ou não. Essa opção possui o menor custo de implementação, uma vez que o hidrogênio pode utilizar gasodutos preexistentes [10][13].

- **Aplicações do Hidrogênio**

De forma geral, os principais usos do hidrogênio são os setores industriais, residencial, mobilidade e exportação. A seguir serão descritos cada um dos setores de uso.

- SETOR INDUSTRIAL

Quanto ao aspecto industrial, seis setores apresentam grande potencial na utilização do hidrogênio verde: a produção de cimento, a siderurgia, a mineração, a produção de vidro, combustíveis líquidos sintéticos e a agricultura.

A produção de cimento é um emissor de gases poluentes principalmente devido ao uso de combustíveis fósseis na queima do calcário [14]. No entanto, a indústria de cimento tem se comprometido junto ao Regime de comércio de Emissões, principal instrumento da União Europeia para reduzir as emissões das indústrias pesada, a reduzir suas emissões de CO₂ por meio da utilização de combustíveis alternativos e do desenvolvimento de novas tecnologias [15]. Os principais obstáculos a serem superados ao empregar hidrogênio na fabricação de cimento incluem potenciais efeitos nos elementos físicos do sistema de forno, nas correntes de combustível, no perfil térmico, na transferência de calor, e também abrangem considerações de segurança para a instalação fabril [14].

Como exemplo de projetos que visam realizar a redução de CO₂ neste setor, pode-se destacar as iniciativas da Associação Europeia de Cimento Cembureau, com projetos de redução da emissão de carbono utilizando tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ e principalmente na substituição do combustível fósseis utilizado na queima do calcário por hidrogênio verde [14].

Na mineração, um setor historicamente intensivo em emissão de carbono, o hidrogênio verde é considerado como uma solução promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Um exemplo de solução é a utilização de pilhas a combustível de hidrogênio nas instalações para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e eliminar a necessidade de transporte de diesel para regiões isoladas, nas operações de mineração. O consórcio “Green Hydrogen” formado pelas multinacionais Anglo American, BHP e Fortescue busca identificar formas de utilizar o hidrogênio verde para acelerar a descarbonização das minas a nível global e eliminar os obstáculos para a implementação das tecnologias de hidrogênio verde [16][17].

A substituição de caminhões de transporte nas minas por veículos movidos a hidrogênio pode trazer enormes benefícios ambientais, já que esses caminhões têm elevado consumo de diesel. De fato, a eliminação das emissões de um único caminhão é equivalente à retirada de 50 carros de passeio à gasolina das ruas em termos de emissões de CO₂. Além disso, a geração de energia elétrica nas próprias minas, através de fontes de energia renovável e produção de hidrogênio verde, pode tornar as minas energeticamente autossuficientes.

O setor siderúrgico é um dos maiores emissores de CO₂ no mundo e consome cerca de 75% da demanda energética global de carvão [18]. Nesse campo, uma das soluções mais promissoras é o uso de hidrogênio verde na produção de aço. Como um exemplo de iniciativa, a ArcelorMittal, uma das maiores produtoras de aço do mundo, anunciou um projeto que visa produzir aço em larga escala utilizando 100% de hidrogênio verde como elemento redutor de

emissão de carbono da empresa. O projeto utiliza a tecnologia de ferro reduzido direto (DRI) em parceria com a empresa Midrex. Inicialmente, o hidrogênio será produzido a partir de gás natural (hidrogênio cinza ou azul), mas a longo prazo a empresa planeja utilizar energia eólica renovável para produzir hidrogênio verde que será utilizado na produção do aço [19].

A aliança europeia das indústrias de vidros (Glass Alliance Europe), Apresentou em seu Position Paper a relevância do setor de Vidro no impacto de emissões de carbono como no processo para a descarbonização das indústrias, O hidrogênio verde neste setor se apresenta como uma oportunidade pois ser utilizado em diferentes estágios do processo de fabricação [14]. Mas para isso enfrenta desafios, dentre eles estão a melhoria dos sistemas tradicionais de derretimento de vidros e o cumprimento das legislações cada vez mais rígidas relacionadas às emissões de CO₂, NO_x e SO_x. Algumas empresas, como a Nippon Sheet Glass, já reportaram o uso de hidrogênio como combustível alternativo. A expectativa é de que a utilização de hidrogênio possa reduzir as emissões de carbono em até 80% no setor [20].

O hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (E-Combustíveis) vem atraindo atenção mundial pelo potencial de descarbonização. Nesse tipo de aplicação, o hidrogênio e o CO₂ passam por uma série de processos envolvidos na produção do chamado óleo sintético (syncrude) e posterior refino em combustíveis como diesel sintético, gasolina sintética ou ainda querosene de aviação sintético. Novos biocombustíveis como hidrogênio verde como o óleo vegetal hidrogenado (HVO – Hydrogenated vegetable oil) apresentam um mercado promissor em função das tecnologias de hidrogenação de bio-óleos disponíveis. No Brasil, tais tecnologias encontram-se em fase de testes e demonstração em campo[14]. Também existem diversos projetos em andamento no mundo, como por exemplo o Projeto alemão ProQR: prevê a partir de 2022 o fornecimento de e-fuel para aeroportos e pistas de pouso em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, como a região amazônica brasileira [14].

Os fertilizantes desempenham um papel crucial na cadeia de produção agrícola, promovendo o aumento da produtividade por hectare e mitigando a degradação do solo agricultável. Entre os elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, destacam-se os denominados macronutrientes, notadamente o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), empregados em larga escala. No contexto da cadeia produtiva de fertilizantes, o processo se inicia com a extração da matéria-prima, sendo o nitrogênio o componente básico para a produção de fertilizantes nitrogenados, como amônia e ureia. Para a obtenção da amônia, essencial na produção de fertilizantes, é necessário tanto o nitrogênio quanto o hidrogênio, cuja combinação resulta na amônia (NH₃), um processo conhecido como síntese de Haber-Bosch [14].

- MOBILIDADE

A mobilidade urbana é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂ [14], e a utilização de hidrogênio apresenta-se como uma opção eficiente para reduzir essas emissões. No entanto, é necessário o investimento na infraestrutura de abastecimento para viabilizar essa alternativa. O uso de hidrogênio na mobilidade consiste na utilização do hidrogênio como fonte de combustível para veículos movidos a células combustível. O veículo necessita de hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água. Pelo escapamento é eliminado apenas vapor de água, não havendo emissões de CO₂.

Um exemplo de modelos que já utilizam esta tecnologia são os veículos da Toyota da linha Mirai, ainda existem outros projetos associados a mobilidade utilizando o hidrogênio como o projeto Hydrogen Mobility Europe (H2ME) (<https://h2me.eu/>). Este é um exemplo de iniciativa que tem como objetivo busca expandir a rede de abastecimento de hidrogênio e das frotas de veículos movidos a pilha a combustível que operam, em diversas regiões da Europa.

Até o momento do estudo, o projeto já expandi-o a frota de veículos a hidrogênio em um total de 630 veículos e desenvolveu um total de 37 novos postos de reabastecimento espalhados em 8 países [14].

- RESIDENCIAL

Na Europa, já existem diversas iniciativas para implementação do uso de hidrogênio verde na geração de energia para residências e edifícios comerciais. O projeto "HyDeal Ambition" (<https://www.hydeal.com/hydeal-ambition>), liderado pela França e Espanha, tem como objetivo produzir hidrogênio verde a partir de energia solar na Península Ibérica¹ e transportá-lo para a França e outros países europeus através de gasodutos existentes. O hidrogênio será utilizado para substituir o gás natural na geração de calor e eletricidade nas residências e indústrias, com a expectativa de reduzir as emissões de CO₂ em até 95% [18].

Outros projetos incluem a construção de edifícios com sistemas de energia renovável, com células a combustível de hidrogênio, que permitem a geração de eletricidade e calor de forma autônoma, sem a necessidade de conexão com a rede elétrica [18]. O hidrogênio verde é uma alternativa viável e eficiente para a geração de energia limpa em residências e edifícios comerciais, e sua implementação em larga escala pode contribuir significativamente para a redução das emissões de CO₂ e a mitigação das mudanças climáticas.

- MERCADO GLOBAL (EXPORTAÇÃO)

Na Europa e na Ásia, observa-se a transição em direção às "Sociedades de Hidrogênio", onde as economias, especialmente nos setores industrial e de transporte, planejam uma ampla adoção de hidrogênio verde nos próximos trinta anos. Além disso, países da União Europeia, comprometidos com metas ambiciosas de descarbonização até 2050, por meio do Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal), assim como outras nações globais signatárias do Acordo de Paris, inevitavelmente buscarão colaborações internacionais para atender às crescentes necessidades domésticas de hidrogênio verde. Nesse contexto, a produção e exportação de hidrogênio verde se delineiam como uma nova arena de oportunidades de negócios para países que possuem maior capacidade de produção desse recurso, destacando-se o Brasil [14].

3. ANÁLISE DA EFICIENCIA DA CADEIA DO HIDROGENIO VERDE

Conforme apresentado, o hidrogênio verde atualmente destaca-se como uma das principais apostas de caminho para a economia de baixo carbono. Contudo, considerando as possibilidades de uso do hidrogênio, a comparação desse potencial vetor energético com a eletricidade, do ponto de vista da cadeia de geração, transporte e utilização, não é uma tarefa simples. Isso torna a análise para comparação da eficiência energética desses vetores de energia um desafio.

Nesse trabalho, com o objetivo de analisar a eficiência da cadeia do hidrogênio verde, foi escolhido o cenário mais completo P2G2P por duas razões principais. A primeira é que esse cenário é um caso mais amplo, que contém o cenário P2G, portanto é um cenário mais completo que considera as etapas de compressão e armazenamento, cujas análises em muitos dos casos, não são consideradas em outros trabalhos similares. A segunda razão é que esse cenário é o que mais se assemelha à conhecida cadeia de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, o que torna a análise um pouco mais didática do ponto de vista de facilitar a comparação entre o hidrogênio e a eletricidade, enquanto vetores energéticos.

A análise de eficiência da cadeia foi feita através de uma busca na literatura tanto técnica-comercial quanto acadêmica a respeito de informações sobre as eficiências dos

processos e equipamentos envolvidos nas principais etapas da cadeia: A geração de energia para a produção de hidrogênio verde, a eletrólise, a compressão, o armazenamento e a célula a combustível.

2.2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

A energia renovável desempenha um papel fundamental na produção sustentável de hidrogênio, minimizando as emissões de dióxido de carbono. Fontes de energia renovável, tais como hidroeletricidade, biomassa e energia geotérmica, são alternativas viáveis. No entanto, a energia solar e eólica tem atraído maior atenção devido à sua ampla disponibilidade, facilidade de implementação e custos de implantação decrescentes ao longo dos últimos anos [4].

O artigo [21] demonstra que a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade é fortemente influenciada pelo tipo de célula solar e pelas condições operacionais. Células fotovoltaicas convertem uma faixa específica de comprimento de onda da radiação solar em eletricidade, dissipando o restante como calor. No mercado, as células de silício são predominantes, com subdivisões em monocristalino, policristalino e amorfo. As células de silício monocristalino exibem a maior eficiência de conversão, atingindo aproximadamente 12-15%, podendo chegar a 22,7% em casos excepcionais. Já as células de silício policristalino têm uma eficiência entre 11% e 14%, enquanto as de silício amorfo ficam na faixa de 6% a 7% [22].

A elevação da temperatura das células solares resulta em reduções na eficiência elétrica dos painéis fotovoltaicos, com uma queda de 0,4% a 0,65% por grau adicional de temperatura. Aumentar a temperatura do painel acima de 25 °C resulta em redução de 0,08% na eficiência elétrica e 0,65% na produção de energia. Portanto, a eficiência e a seleção de locais com alta irradiação solar tornam-se elementos cruciais.

No que diz respeito à produção eólica, de acordo com [23], a eficiência energética média gira em torno de 80%, variando de 60% a 90%. Essa variação se deve, principalmente, à influência significativa da velocidade média do vento na produção de energia eólica. A densidade do ar também exerce um papel importante, embora com impacto menor em comparação com a velocidade do vento. Outros fatores, como temperatura, altitude, umidade, inclinação do terreno, turbulência, sujeira nas pás do rotor e a idade do equipamento, também contribuem para as perdas de eficiência, somando aproximadamente 3% [23].

Esses resultados destacam a importância da localização estratégica de parques eólicos e sistemas fotovoltaicos, bem como a influência significativa de fatores ambientais na eficiência da produção de energia solar e eólica.

2.3. ELETRÓLISE

Não há dúvidas que, no contexto da cadeia do hidrogênio verde, o eletrolisador é a figura de destaque. Dessa forma, a análise da eficiência da cadeia passa obrigatoriamente pela análise criteriosa da eficiência desse dispositivo. Adicionalmente, a eficiência dos eletrolisadores é crucial para a análise da cadeia de hidrogênio verde, pois determina o consumo de energia elétrica, tendo forte influência no custo de produção do hidrogênio.

No entanto, obter um número ou parâmetro único que represente a eficiência do eletrolisador é um desafio. Primeiro, como vimos, os eletrolisadores tem diferentes tecnologias

que atualmente competem entre si. Adicionalmente, as tecnologias de eletrolisadores podem variar conforme o tipo, a potência, a temperatura de operação, o custo e as condições de fornecimento de energia primária. Em linhas gerais, as principais tecnologias são o eletrolisador PEM e o eletrolisador alcalino. O eletrolisador alcalino é considerada uma tecnologia simples, relativamente barata e de alta confiabilidade, mas que possui menor eficiência quando comparado à tecnologia PEM. O eletrolisador PEM, por sua vez, é mais recente, possui maiores capacidades de produção por metro quadrado de implantação, é mais rápida e mais flexível.

Uma outra questão importante é sobre como será medida a eficiência do dispositivo. Parâmetros comumente vistos na especificação dos equipamentos, e que podem trazer informação sobre sua eficiência operacional, são a relação entre a energia elétrica consumida e a energia química do hidrogênio consumido, ou a relação entre a energia elétrica consumida e o volume de hidrogênio produzido, geralmente expresso através do montante de energia em kWh, necessário para a produção de um kg de hidrogênio (kg H_2).

Embora em alguns casos os dados de desempenho dos produtos não sejam amplamente divulgados, com a comparação dos dados obtidos, observa-se que os desempenhos são próximos, mas variam de acordo com a tecnologia adotada.

O eletrolisador PEM responde rapidamente às demandas de carga e inicializa rapidamente quando necessário. Além disso, o hidrogênio produzido pelo eletrolisador PEM pode atingir uma pureza elevada, de até 99,999%. No entanto, o uso de materiais nobres e o alto custo da membrana são desafios associados a essa tecnologia. Além disso, é importante notar que há uma considerável energia perdida no processo de eletrólise. A faixa de consumo de energia por hidrogênio produzido para essa tecnologia varia de 50,07 kWh/kg H_2 até 83,45 kWh/kg H_2 [24].

O eletrolisador alcalino (AWE) é uma tecnologia bem estabelecida e estável. No entanto, o eletrólito de água alcalina é corrosivo, requer cuidados de manutenção e pode produzir hidrogênio com uma pureza inferior em comparação com outras tecnologias. Além disso, é importante observar que a energia consumida no processo de eletrólise varia de 50,07 até 77,13 kWh/kg H_2 , valores de consumo maiores do que os de tecnologia PEM principalmente em pequenas potências [24].

O eletrolisador de Membrana de Troca de Ânions Alcalinos combina as soluções de membranas alcalinas de eletrólito sólido de modo a superar as desvantagens de outras tecnologias. Essa tecnologia possui boas capacidades de gerenciamento da flutuação de carga e apresenta vantagens como o baixo consumo de energia. A tecnologia tem o potencial de tornar-se uma solução com custo-benefício superior a outras tecnologias, contudo é uma tecnologia com baixo grau de maturidade, principalmente comparada a alcalina e PEM. A energia consumida no processo de eletrólise é de aproximados 53,39 kWh/kg H_2 , um valor menor do que muitas opções de eletrolisadores PEM e alcalino [24].

O eletrolisador de eletrólito de óxido sólido possui a vantagem de poder ser utilizado não apenas para a produção de hidrogênio, mas também como uma célula à combustível, tornando-o versátil para diferentes aplicações. Além disso, essa tecnologia apresenta uma alta eficiência e não requer materiais nobres, o que ajuda a reduzir os custos de capital. No entanto, os eletrodos utilizados no SOE podem ser instáveis, e questões relacionadas à segurança ainda precisam ser resolvidas. A energia perdida no processo de eletrólise varia de 27,84 até 38,98 kWh/kg H_2 , sendo a faixa toda de consumo menor que quaisquer outras tecnologia [24].

2.4. COMPRESSÃO

A compressão e armazenamento, frequentemente negligenciados em estudos da cadeia do hidrogênio, são elementos importantes na análise de eficiência. A compressão do hidrogênio é um processo que visa aumentar a densidade volumétrica do gás, facilitando o seu armazenamento e transporte. Nas etapas de transporte, armazenamento e utilização em estações de abastecimento, a compressão do hidrogênio é fundamental para otimizar o espaço e a eficiência do sistema. O hidrogênio pode ser comprimido em cilindros de alta pressão (até 700 bar) ou em tanques criogênicos (a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). A compressão do hidrogênio nas estações de abastecimento, considerando a aplicação do hidrogênio em meios de transporte, é essencial para garantir a pressão adequada para o enchimento dos tanques dos veículos.

As perdas associadas a esta etapa ocorrem principalmente devido ao processo de compressão tanto para o armazenamento, para o transporte como para o seu uso local na célula combustível, que demanda pressões mais elevadas. O consumo de energia varia de acordo com o nível de pressão e temperatura. Na compressão a baixa pressão (30-35 bar e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) o consumo de energia por kg de hidrogênio estimado é de 2,77 kWh/kg H_2 . Na compressão à média pressão (50-150 bar e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), o consumo é estimado na faixa de 3,95 a 10,9 kWh/kg H_2 . Em aplicações de alta pressão (350 bar e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), 23 kWh/kg H_2 . No caso de compressão para liquefação do hidrogênio a temperaturas extremamente baixas ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 bar), observa-se um alto consumo de energia de 70,8 kWh/kg H_2 , e na compressão do hidrogênio na forma de amônia líquida a $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 1 bar, estima-se um consumo de 121 kWh/kg H_2 [4]. Além disso, são necessários cerca de 8 kWh/kg H_2 adicionais para recuperar o hidrogênio da amônia [25].

2.5. CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Uma característica notável das células a combustível é sua eficiência superior quando comparadas aos motores à combustão, devido à menor perda de calor, atrito e gases resultantes. No caso da célula de combustível, estima-se uma eficiência de 40% a 60%, enquanto em motores a combustão a eficiência estimada está entre 20% e 25% [26][27]. Contudo, as eficiências das células de combustível são influenciadas por diversos fatores como a aplicação a qual se destina e as perdas térmicas relacionadas à tecnologia.

As células de combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) são notáveis por atingir eficiências na faixa de 40 – 60%. Elas são conhecidas por sua resposta dinâmica rápida, adaptando-se em segundos às variações na entrega de hidrogênio. As PEMFC são versáteis e facilmente escaláveis, adequadas para uma ampla variedade de campos, desde veículos até aplicações estacionárias. No entanto, essas células requerem alta pureza de hidrogênio e cerca de 38% do consumo é perdida devido às perdas térmicas [26].

As células de combustível de óxido sólido (SOFC) possuem uma eficiência que varia de 30 a 60% e são conhecidas por sua alta capacidade de potência, podendo ser aplicadas em sistemas de grande porte. Por outro lado, as células SOFC têm uma resposta dinâmica mais lenta, levando horas para se adaptar em caso de variação na oferta de hidrogênio. Elas necessitam de uma pureza média do hidrogênio e por operar em altas temperaturas ($600\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$), apresentam uma redução das perdas causadas pelo efeito térmico [26].

As células de combustível de carbonato fundido de alta temperatura (MCFC) têm uma eficiência média de aproximadamente 43%. As células MCFC são adequadas para aplicações de médio e grande porte, operam com uma pureza média de hidrogênio e apresentam perdas de eficiência tanto pelas características intrínsecas da tecnologia quanto por elevadas perdas térmica [26].

As células de combustível de ácido fosfórico (PAFC) mantêm eficiências entre 40 e 50%. Elas são utilizadas principalmente em sistemas de cogeração pois são resistentes a utilização de hidrogênio com impuro. No entanto, assim como outras tecnologias de células de combustível, as PAFC também têm suas principais perdas associadas a perdas térmicas [26].

3. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada revela pontos importantes para reflexão sobre a análise da cadeia de hidrogênio verde. No contexto no trabalho, as principais etapas da cadeia P2G2P foram definidas e analisadas com respeito ao consumo de energia e eficiência. Embora em alguns casos os dados de desempenho das soluções tecnológicas não sejam amplamente divulgados, os dados utilizados na análise foram levantados a partir de dados de publicações técnico-comerciais e outras referências da literatura.

Os eletrolisadores, peças-chave na produção de hidrogênio verde, tiveram suas principais tecnologias comparadas a partir do montante de energia elétrica necessário para a produção de um kg de hidrogênio (kWh/kg H_2). Nesse sentido, as tecnologias comparadas apresentaram desempenhos próximos, sendo o maior consumo observado na tecnologia PEM ($83,45 \text{ kWh/kg H}_2$) e o menor consumo na tecnologia eletrolisador de eletrólito de óxido sólido SOE ($38,98 \text{ kWh/kg H}_2$). Contudo, essas as tecnologias citadas possuem diferentes níveis de maturidade e, a depender da escala de implementação da produção e da janela temporal na qual se deseja utilizar o eletrolisador, esse e outros fatores precisam ser amplamente considerados.

Na etapa de compressão, observa-se uma ampla faixa de variação para o consumo que vai de 2 a 121 kWh/kg H_2 , proporcional ao nível de pressão desejado para uso local, armazenamento, transporte ou para aplicação em estações de abastecimento.

Com relação às células de combustível, de forma similar a análise dos eletrolisadores, diferentes tecnologias de células de combustível situam-se em uma faixa de 20% a 60%, competindo em diversos cenários.

De forma geral, a análise da eficiência da cadeia de hidrogênio verde não é uma tarefa simples pois a multiplicidade de caminhos e cenários para o uso do hidrogênio torna a comparação em alguns casos pouco prática. Além disso, algumas definições como o fato da cadeia possuir uma etapa de transporte, armazenamento na aplicação do hidrogênio podem mudar completamente o resultado.

Como resultado desse trabalho, destaca-se a complexidade inerente à produção e uso do hidrogênio verde, evidenciando desafios e variações com relação a eficiência energética em cada etapa da cadeia. Também ressaltam a importância de um olhar abrangente sobre esses processos, identificando pontos-chave para aprimoramentos e desenvolvimento tecnológico.

A busca incessante por fontes sustentáveis de hidrogênio está intrinsecamente ligada à necessidade de inovação constante, impulsionando a transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente. Este estudo acrescenta uma contribuição, dentre outros trabalhos existentes, para um olhar cauteloso sobre a cadeia de produção de hidrogênio verde, dando os primeiros passos para a otimização da eficiência energética de diversas etapas e, conseqüentemente, contribuindo a consolidação de um futuro energético mais sustentável.

ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE GREEN HYDROGEN CHAIN

ABSTRACT

This article explores the pivotal role of molecular hydrogen as an energy carrier in the transition to sustainable sources, emphasizing the need to shift from fossil fuel-derived production to more eco-friendly technologies like electrolysis for green hydrogen. The study undertakes a thorough analysis of scenarios and configurations in the green hydrogen production chain, with a focus on identifying key factors affecting energy efficiency. Two primary configurations, Power-to-Gas (P2G) and Power-to-Gas-to-Power (P2G2P), are discussed. In the first scenario, P2G, hydrogen is produced from renewable sources through electrolysis, with applications ranging from direct energy use to industrial processes and integration into the natural gas grid. The second scenario, P2G2P, positions green hydrogen as a renewable energy storage medium, converted back into electrical energy using a fuel cell. This approach facilitates the utilization of on-demand renewable energies like solar and wind. The study encompasses stages from production to storage and final use of green hydrogen, identifying processes crucial for energy transformation efficiency, particularly highlighting the impact of pressure elevation during storage and transportation. Overall, the text underscores the importance of transitioning to sustainable hydrogen production methods and provides valuable insights into optimizing energy efficiency throughout the green hydrogen chain.

KEYWORDS: Green hydrogen, energy efficiency, P2G2P, gas-to-power conversion, gas-to-energy conversion, green hydrogen supply chain.

4. NOTAS EXPLICATIVAS

¹ A Península Ibérica é uma península localizada no sudoeste da Europa, separada do restante do continente europeu pelos Pirenéus, uma cadeia montanhosa que forma a fronteira natural entre a Espanha e a França.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. El-Shimy and A. N. Afandi, "Overview of Power-to-Hydrogen-to-Power (P2H2P) Systems Based on Variable Renewable Sources," *5th Int. Conf. Electr. Electron. Inf. Eng.*, vol. 1, October, no. October, pp. 1–6, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319653679>
- [2] W. Cheng and S. Lee, "How Green Are the National Hydrogen Strategies?," *Sustain.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–33, 2022, doi: 10.3390/su14031930.
- [3] N. Barhorst, *Green hydrogen*, vol. 2. 2020.
- [4] H. P. Bruce S, Temminghoff M, Hayward J, Schmidt E, Munnings C, Palfreyman D, "Australia National Hydrogen Roadmap," p. 92, 2018.
- [5] J. Brauns and T. Turek, "Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review," *Processes*, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.3390/pr8020248.
- [6] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

- [7] M. M. Rashid, M. K. Al Mesfer, H. Naseem, and M. Danish, “Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 3, pp. 2249–8958, 2015.
- [8] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, “A comprehensive review on PEM water electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901–4934, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [9] F. Stöckl, W. P. Schill, and A. Zerrahn, “Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-92511-6.
- [10] M. Niermann, S. Timmerberg, S. Drünert, and M. Kaltschmitt, “Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. July 2020, p. 110171, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110171.
- [11] BIG HIT, “project bighit,” 2022.
- [12] M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, P. Preuster, P. Wasserscheid, and D. Stolten, “Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model,” *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 290–302, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.050.
- [13] C. Yang and J. Ogden, “Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 2, pp. 268–286, 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009.
- [14] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde,” pp. 1–114, 2021, [Online]. Available: www.energypartnership.com.br
- [15] DW, “Carbon-intensive-cement-industry-feeling-the-heat,” 2019. <https://www.dw.com/en/carbon-intensive-cement-industry-feeling-the-heat/a-50546807> (accessed Jan. 24, 2024).
- [16] Anglo American, “Bigger is better: on board the world’s largest electric mining vehicle,” 2020. <https://www.mining-technology.com/features/bigger-is-better-on-board-the-worlds-largest-electric-mining-vehicle/>
- [17] H2VIEW, “Mining giants form green hydrogen consortium,” 2020. <https://www.h2-view.com/story/mining-giants-form-green-hydrogen-consortium/> (accessed Jan. 04, 2024).
- [18] IEA, “Global Hydrogen Review 2022,” *Glob. Hydrog. Rev. 2022*, 2022, doi: 10.1787/a15b8442-en.
- [19] arcelormittal, “hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg,” 2020, [Online]. Available: <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>
- [20] P. Agreement, E. Commission, and G. A. Europe, “The European glass sector contribution to a climate neutral economy,” no. June, pp. 1–9, 2019.
- [21] R. Stropnik and U. Stritih, “Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM,” *Renew. Energy*, vol. 97, pp. 671–679, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.011.
- [22] C. T. Machado and F. S. Miranda, “Photovoltaic solar energy: A briefly review,” *Rev. Virtual Quim.*, vol. 7, no. 1, pp. 126–143, 2015, doi: 10.5935/1984-6835.20150008.

- [23] S. Pieralli, M. Ritter, and M. Odening, “Efficiency of wind power production and its determinants,” *Energy*, vol. 90, pp. 429–438, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.055.
- [24] M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara, and H. Hassan, “A review of water electrolysis–based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 58, pp. 86994–87018, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-23323-y.
- [25] T. N. Veziroğlu and S. Şahin, “21st Century’s energy: Hydrogen energy system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 7, pp. 1820–1831, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.08.015.
- [26] L. Forndal and J. Greiff, “System Study of the Techno- Economic Potential of a Hydrogen System,” 2022.
- [27] J. Kotowicz, D. Węcel, and M. Jurczyk, “Analysis of component operation in power-to-gas-to-power installations,” *Appl. Energy*, vol. 216, no. February, pp. 45–59, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.050.

6. GLOSSÁRIO

P2G	<i>Power-to-Gas</i>
P2G2P	<i>Power-to-Gas-to-Power</i>
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i> ou membrana de troca de prótons
AEM	<i>Anion Exchange Membrane</i> ou membrana de troca aniônica
SOE	Eletrólito de Óxido Sólido
AWE	Eletrolisador alcalino
GCH ₂	Gás Comprimido de Hidrogênio
LH ₂	Hidrogênio Liquefeito
LOH ₂	Hidrogênio Orgânico Líquido
HVO	<i>Hydrogenated Vegetable Oil</i>
PEMFC	Células de Combustível de Membrana de Troca de Prótons
SOFC	Células de Combustível de Óxido Sólido
MCFC	Células de Combustível de Carbonato Fundido de Alta Temperatura
PAFC	Células de Combustível de Ácido Fosfórico