

CARLA LEAL BARBOZA XAVIER

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DA ENERGIA
SOLAR NO BRASIL**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

SÃO PAULO

2023

CARLA LEAL BARBOZA XAVIER

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DA ENERGIA
SOLAR NO BRASIL**

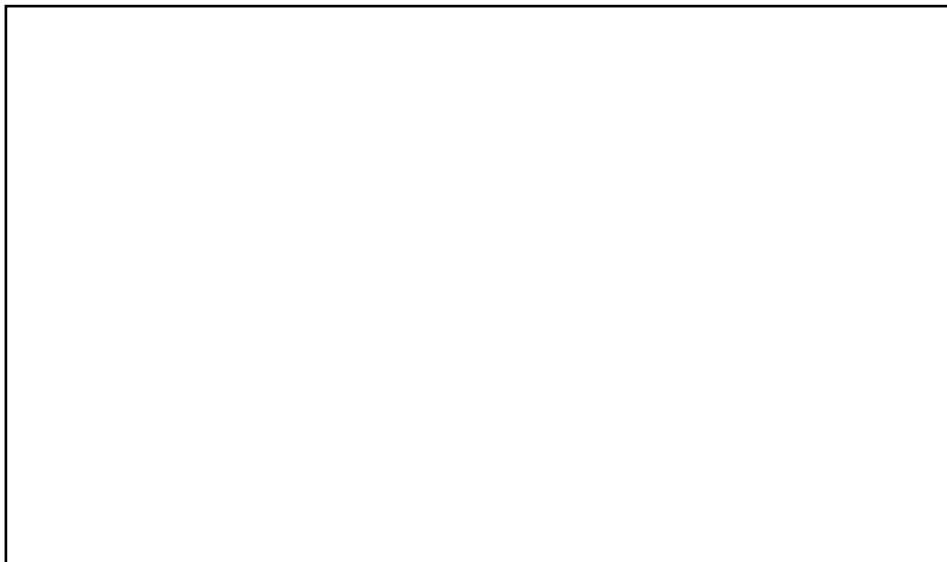
Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Nome da orientadora: Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Matai

SÃO PAULO

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for entering cataloging data. It occupies the lower half of the page.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sua presença constante em minha vida. Ao meu esposo, por sempre me apoiar e me incentivar a ser melhor a cada dia. Aos meus pais e irmãos por sempre acreditarem em mim e me ensinarem desde sempre que “o triunfo pertence a quem se atreve”. À minha orientadora, Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Matai, pelas essenciais intervenções nesta pesquisa. Por fim, aos meus professores e colegas do PECE pelos aprendizados que tivemos durante o curso e que levarei por toda a minha vida.

RESUMO

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A questão energética tem preocupado a comunidade científica mundial. O Brasil possui um sistema elétrico de baixo carbono e uma irradiação solar bem distribuída na maior parte das regiões brasileiras, evidenciando o seu grande potencial de produção de energia solar e de hidrogênio verde (H₂V) a partir dessa. Assim, este trabalho objetiva estudar a viabilidade da produção de hidrogênio verde por intermédio da energia solar no Brasil. Metodologicamente, conforme seus objetivos, é considerado como exploratório ou bibliográfico a partir de análise bibliométrica, de abordagem qualiquantitativa com dados secundários. Constatou-se que são poucas as publicações acerca do tema, ratificando ser uma área ainda embrionária e que pode ser mais pesquisada. A integração da fonte de energia solar e hidrogênio verde oferece novos caminhos para alcançar metas globais para a economia de carbono zero, equilibrando a rede elétrica e combatendo a intermitência da energia elétrica por meio do armazenamento de energia. Os desafios envolvem a produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde que são elementos cruciais para impulsionar a transição energética nacional em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis. A produção de H₂V em grande escala necessita de eficiência no processo de eletrólise e de infraestrutura que demandam altos investimentos; a redução dos custos associados é um cenário em que ainda são necessários avanços tecnológicos para tornar o hidrogênio verde economicamente viável. Viabilizar a produção de hidrogênio verde a partir da energia solar requer melhorias tecnológicas na produção, armazenamento, transporte e uso do H₂V. Também demanda a definição de marcos regulatórios específicos para produção e uso, e a adoção de estratégias para investimentos na cadeia produtiva do H₂V. Nessas condições, o hidrogênio verde a partir da energia solar poderá ser, de fato, o substituto das fontes energéticas poluentes no mercado interno e produto para exportação de forma competitiva.

Palavras-chave: energia solar, hidrogênio verde, matriz energética, neutralidade de carbono.

ABSTRACT

GREEN HYDROGEN PRODUCTION FROM SOLAR ENERGY IN BRAZIL

The energy issue has worried the world scientific community. Brazil has a low-carbon electrical system and solar irradiation well distributed in most Brazilian regions, evidencing its great potential for producing solar energy and green hydrogen (H₂V) from it. Thus, this work aims to study the feasibility of producing green hydrogen using solar energy in Brazil. Methodologically, according to its objectives, it is considered exploratory or bibliographic based on bibliometric analysis, qualitative and quantitative approach with secondary data. It was found that there are few publications on the subject, confirming that it is still an embryonic area that can be further researched. The integration of solar power source and green hydrogen offers new avenues to achieve global goals for the zero-carbon economy, balancing the power grid and tackling electrical power intermittency through energy storage. The challenges involve the production, storage and transport of green hydrogen, which are crucial elements in driving the national energy transition towards cleaner and more sustainable energy sources. The production of H₂V on a large scale requires efficiency in the electrolysis process and infrastructure that demand high investments; reducing associated costs is a scenario where technological advances are still needed to make green hydrogen economically viable. Enabling the production of green hydrogen from solar energy requires technological improvements in the production, storage, transport and use of H₂V. It also demands the definition of specific regulatory frameworks for production and use, and the adoption of strategies for investments in the H₂V production chain. Under these conditions, green hydrogen from solar energy could be, in fact, the substitute for polluting energy sources in the domestic market and a competitive export product.

Keywords: solar energy, green hydrogen, energy matrix, carbon neutrality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Mundial, 2020.....	13
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira, 2023	14
Figura 3 - Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo, 2020.....	16
Figura 4 - Expansão da Matriz Elétrica Brasileira, 2023.....	22
Figura 5 - Radiação Solar média diária anual em Minas Gerais	23
Figura 6 - Eixos temáticos que compõem o PNH ₂	30
Figura 7 - Cadeia de produção, transformação, transporte e uso final do hidrogênio verde	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cor de Hidrogênio e descrição	24
Quadro 2 - Publicações acerca de H2V a partir de energia solar, 2021-2023	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Organização do trabalho	9
2	OBJETIVO.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	Contexto geral das matrizes energéticas global e brasileira	12
3.2	Panorama da energia solar no Brasil	17
3.3	Cenário do hidrogênio verde no Brasil	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
5	RESULTADOS	33
5.1	Produção de H ₂ V	35
5.2	Armazenamento e transformação do H ₂ V	37
5.3	Transporte do H ₂ V	39
5.4	A produção de H ₂ V a partir da energia solar no Brasil	42
6	DISCUSSÃO	44
7	CONCLUSÃO.....	46
7.1	Contribuições do trabalho.....	47
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A questão energética tem preocupado a comunidade científica em nível global diante da demanda crescente por energia e da pressão pela neutralização do carbono em razão do aquecimento global. Assim, a busca por fontes de produção alternativas de energia tem levado organizações nacionais e internacionais, grandes grupos e governos a investirem em pesquisas, tecnologias e instalação de indústrias nesse setor.

O hidrogênio (H_2) se apresenta como solução por deter significativas vantagens, como abundância na natureza, não é poluente, é de fácil dissipação, pode ser armazenado e transportado a partir de energia renovável, como a solar, entre longas distâncias e através dos oceanos (FONSECA, 2022).

Somente o H_2 não promove a neutralização do carbono, é necessário haver uma transição dos seus meios de produção, como a obtenção do hidrogênio pela eletrólise da molécula da água a partir da captura e transporte da energia solar ou eólica, que são abundantes no território brasileiro, constituindo o hidrogênio verde (H_2V) (TEIXEIRA JR, 2023).

O Brasil possui um sistema elétrico de baixo carbono e uma irradiação solar bem distribuída na maior parte dos estados e regiões brasileiras, evidenciando o seu grande potencial para produzir energia solar, inclusive, com capacidade para produzir o hidrogênio verde (GARCIA; CARVALHO, 2022).

O H_2V é matéria-prima e combustível o que consentirá a descarbonização em campos como a siderurgia e a produção de fertilizantes que são grandes poluentes, no entanto, há poucos estudos no Brasil sobre sua produção a partir de energia solar, decorrendo disso a motivação e importância desse estudo.

1.1 Organização do trabalho

Este estudo se organiza em 7 capítulos:

No Capítulo 1, tem-se a introdução ao tema, ressaltando a razão e a importância do estudo realizado.

O Capítulo 2 apresenta os objetivos do trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica, em que são apresentados o contexto geral da matriz energética no mundo e no Brasil, o panorama da geração de energia solar e de hidrogênio verde, o cenário mercadológico atualmente e as políticas públicas acerca do hidrogênio.

No Capítulo 4, são descritos passo a passo os métodos de pesquisa utilizados, que são a pesquisa exploratória ou bibliográfica a partir de análise bibliométrica, de abordagem qualiquantitativa com dados secundários.

O Capítulo 5 trata dos resultados acerca das publicações selecionadas, conforme o filtro utilizado, e das vantagens, limitações ou desafios na cadeia de produção do H₂V a partir da fonte solar encontrados nos estudos escolhidos.

No Capítulo 6, discutem-se os resultados encontrados para então entender a viabilidade da produção de hidrogênio verde por intermédio da energia solar no Brasil.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões acerca do estudo realizado, as principais contribuições do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVO

O trabalho objetiva estudar a viabilidade da produção de hidrogênio verde por intermédio da energia solar no Brasil.

Para consecução desse, elaboraram-se os objetivos específicos que são:

- a) analisar as publicações que relacionam a produção de hidrogênio verde à energia solar no Brasil;
- b) identificar as vantagens, limitações ou desafios na cadeia de produção do H₂V acoplado à fonte solar;
- c) descrever a cadeia produtiva do hidrogênio verde.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta pesquisa abarca duas tecnologias, a energia solar, que é abundante em variadas localidades brasileiras, e a de hidrogênio verde (H₂V), tida como promissora. Neste capítulo são apresentados o contexto geral da matriz energética no mundo e no Brasil, o panorama da geração de energia solar e de hidrogênio verde, o cenário mercadológico atualmente e as políticas públicas acerca do hidrogênio.

3.1 Contexto geral das matrizes energéticas global e brasileira

Existe uma coerência no desenvolvimento socioeconômico de um país e sua matriz energética. Essa é constituída pela estrutura de oferta e procura dos setores de energia, considerando as diversas fontes primárias¹ e secundárias², e os diferentes usos no sistema social e econômico (BRASIL, 2023a; NOGUEIRA; CARDOSO, 2007). A matriz energética também tem um impacto significativo no meio ambiente e na sustentabilidade em longo prazo, incluindo o potencial para mudanças climáticas de alto risco (ANDRADE; MATTEI; 2013).

Consoante o *International Panel on Climate Change* (IPCC, 2022), as principais causas do aquecimento global são resultantes das ações humanas, sobretudo, em razão da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) que elevam o acúmulo de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera: “[...] a dependência dos combustíveis fósseis está na origem das alterações climáticas: em 2019, o carvão, o petróleo e o gás contribuíram para 80% de todas as emissões de CO₂ relacionadas com a atividade humana” (IPCC, 2022, n.p). As informações do IPCC (2022) apontam que os níveis de CO₂ tiveram aumento de 47,3%, com média anual 410 partes/milhão.

A fim de dar resposta ao problema da mudança climática e de robustecer a ação dos países contra os efeitos e impactos dessas mudanças, na 21^a Conferência das Partes da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), na cidade

¹ Provém diretamente da natureza, como petróleo, gás natural, carvão mineral, energia solar, eólica, entre outras (BRASIL, 2021a).

² São resultantes dos diferentes centros de transformação, como óleo diesel, óleo combustível, gasolina, querosene, álcool etílico, entre outros (BRASIL, 2021a).

de Paris, ocorrera o Acordo de Paris. O Acordo foi assinado por 195 países, incluindo o Brasil, que devem ater o aumento da temperatura a 1,5°C superior ao nível pré-industrial (BRASIL, 2018).

Além do aquecimento global, mundialmente, o sistema de energia convencional passa por esgotamento progressivo dos recursos energéticos fósseis e por baixa eficiência energética (ROSA; GASPARIN, 2016). Esses problemas levaram os países a gerarem energia em níveis de tensão mais baixos, usando fontes alternativas, como energia eólica, fotovoltaica, biocombustíveis, entre outras (KRSTIĆ–FURUNDŽIĆ *et al.*, 2020).

Necessário se faz conceituar eficiência energética, que se trata do nível de intensidade energética da economia; quanto mais alta for a intensidade energética, menor será a eficiência da conversão de energia em produtos e serviços (BRASIL, 2019).

A matriz energética mundial está ilustrada no gráfico da Figura 1.

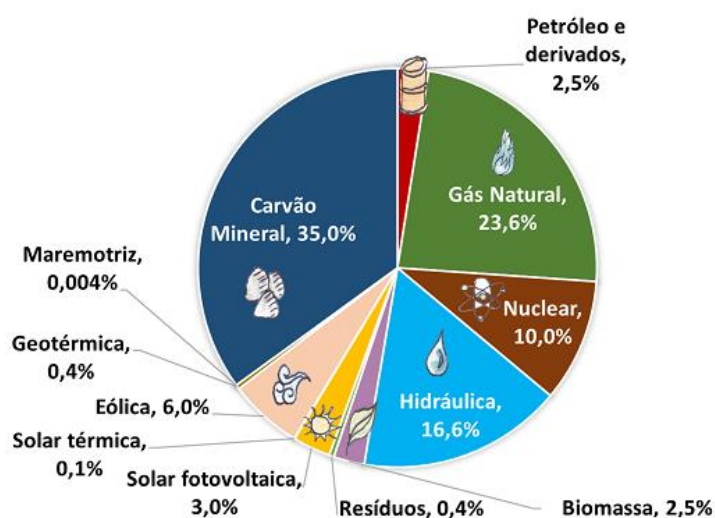


Figura 1 - Matriz Energética Mundial, 2020

* Outras, 2,5%, correspondem a, entre outras, solar, eólica e geotérmica.

Fonte: International Energy Agency (2022 *apud* BRASIL, 2023a)

Observa-se que a matriz energética mundial é composta, sobretudo, de matrizes convencionais, não renováveis, como de carvão mineral, gás natural, nuclear, petróleo e derivados, que juntas compreendem 71,1% de toda a energia produzida. Além disso, fontes de energia como petróleo e carvão mineral, ao serem queimadas, liberam gases poluentes, contribuindo para aumento do efeito estufa.

Nessas circunstâncias, faz-se urgente a promoção de forma eficaz das fontes de energia renováveis e da eficiência energética. Para isso, é importante considerar o uso de tecnologias mais eficientes, visto que não existe mais espaço para combustíveis fósseis num mundo alinhado com o Acordo de Paris.

No Brasil, a matriz elétrica é mais renovável que sua matriz energética, posto que a maior parte da energia elétrica é gerada por usinas hidrelétricas. Há crescimento da energia eólica; é crescente também a geração distribuída (GD), que é a geração das placas solares sobre telhados, o que contribui para que a elétrica continue renovável (BRASIL, 2023a).

A matriz elétrica brasileira, até o início de abril de 2023, está representada no gráfico da Figura 2.



Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira, 2023
Fonte: Absolar (2023)

A energia elétrica gerada por fontes não renováveis no Brasil corresponde a 14,3%, relativa à queima de combustíveis fósseis e às reações químicas no núcleo dos átomos, principalmente, do urânio. Quase metade das fontes renováveis é a hídrica (49,9%), seguida da fonte solar (12,6%), da eólica (11,9%) e da Biomassa/Biogás (7,5%) que compõem 81,9% da matriz elétrica brasileira.

Em 2 de maio de 2023, o Brasil somou 191.702,7 MW de potência fiscalizada; desse total, 83,55% da matriz elétrica brasileira é renovável, segundo dados atualizados do

Sistema de Informações de Geração (SIGA), da Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2023b).

Diferentemente do mundo, a matriz elétrica brasileira se baseia em fontes renováveis de energia, em virtude disso, as usinas geradoras emitem menos CO₂. Mesmo assim, em 12 de setembro de 2016, o Brasil concluiu o documento com metas em que se compromete com o Acordo de Paris, deixando de ser metas pretendidas, tornando-se oficiais (BRASIL, 2017).

Assim, o Brasil

[...] comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 (BRASIL, 2018).

As metas brasileiras são consideradas ambiciosas, visto que é estimada a redução em 66% da emissão de gases de efeito estufa por intensidade de emissões em 2025 e em 75% em 2030, num país cuja população aumenta continuamente, assim como a intensidade de emissão de gases e de renda *per capita*.

Em 2008, o governo brasileiro já estava consciente da necessidade de processos de geração de energia e de eficiência energética que reduzissem a emissão de gases e poluentes na atmosfera e assegurassem o desenvolvimento sustentável, tanto que celebrou entre Brasil e Alemanha acordo cooperativista em âmbito energético com foco nesses processos.

O Acordo foi promulgado por meio do Decreto nº 7.685, de 1º de março de 2012. Evidenciam-se seu art. 1º, que prevê os objetivos do Acordo, com destaque para a promoção e estímulo ao intercâmbio científico e tecnológico e a abertura para o setor privado participar das iniciativas desenvolvidas por meio do Acordo; e o art. 3º, que elenca as áreas tidas como apropriadas para cooperação bilateral do Acordo: energias renováveis, eficiência energética, tecnologias inovadoras de propulsão e geração, mecanismo de desenvolvimento limpo, melhores tecnologias disponíveis no uso sustentável das fontes não renováveis (BRASIL, 2012a).

Além disso, relativo à sétima meta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), energia sustentável e limpa, o Brasil manteve sem alteração a Meta 7.1 que é, “Até 2030, assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia”. (BRASIL, 2019).

Na Meta 7.2, o Brasil propõe, “Até 2030, manter elevada a participação de energias renováveis na matriz energética nacional.” (BRASIL, 2019), visto que essas representam 82,9% na geração de energia elétrica, e no mundo corresponde a 28,6%, como mostra o gráfico da Figura 3.

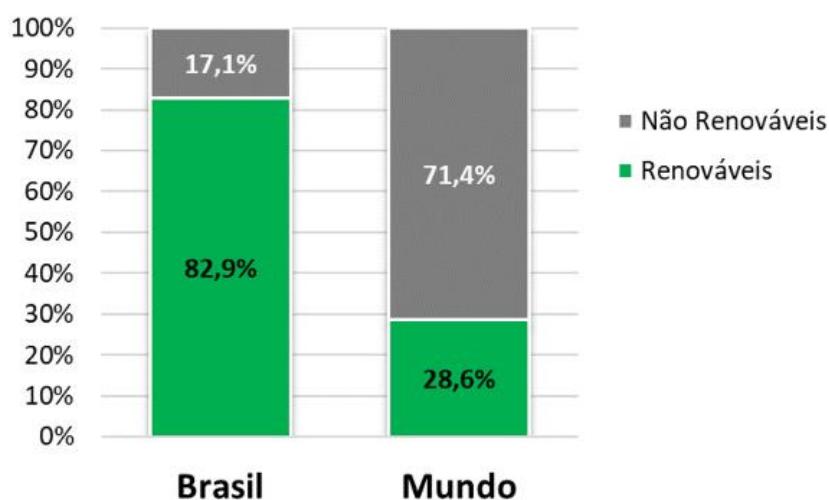


Figura 3 - Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo, 2020
Fonte: Brasil (2023a)

No gráfico, é possível perceber que o uso de fontes de energia renovável e não renovável no Brasil é inversamente proporcional em relação ao mundo, o que coloca o país em situação confortável, mas não de estagnação, porque há muito a se fazer para se alcançar uma ótima eficiência energética.

Na Meta 7.3, a ONU visa “Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética.”, mas o Brasil pretende aumentar essa taxa, porque, nos últimos 20 anos, o histórico do indicador de intensidade energética indica a inviabilidade de dobrar a taxa de variação do indicador de eficiência energética (BRASIL, 2019).

A Meta 7.a da ONU intenta “Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis,

eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas [...]”. O Brasil se compromete com a meta sem alterações (BRASIL, 2019).

A Meta 7.b das Nações Unidas objetiva “[...] expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento [...]”. O Brasil se compromete com a meta (BRASIL, 2019).

Frente às metas estabelecidas pelo ONU, o Brasil se comprometeu a garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos os brasileiros e essas questões vêm sendo atacadas pelas políticas de energia com a proposição de novas energias limpas e renováveis, as quais provocam menor impacto no meio ambiente e menor emissão de gases de efeito estufa.

A energia solar é uma das opções para diminuir a emissão de gases do efeito estufa, que será tratada no próximo tópico. A escolha por essa fonte está relacionada ao uso consciente dos recursos naturais e a aspectos como autonomia, qualidade, economia e custo-benefício, em razão de isenções e outras políticas que incentivam a instalação de placas fotovoltaicas e de usinas solares (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020).

É indubitável que a transição para uma matriz energética mais sustentável pode ser alcançada por meio de políticas públicas, incentivos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias (BRASIL, 2019). Além disso, a conscientização e a participação da sociedade civil são fundamentais para garantir a adoção de práticas mais assertivas e a construção de um futuro mais próspero e equilibrado em termos de energia.

3.2 Panorama da energia solar no Brasil

Há regularidade no potencial energético solar no Brasil que se reveste como vantagem em relação aos países da Europa cuja tecnologia é bastante avançada. Também, os potenciais menores no território brasileiro estão no patamar dos maiores potenciais energéticos solares europeus, segundo informa Sauaia (2016). Relativo às nações com maior potência instalada de geração de energia fonte solar, o Brasil está em 8º

lugar no *ranking* mundial em 2022, e em 4º dos que mais instalação de energia solar fizeram em 2021 (BRASIL... 2023).

Aproveita-se a energia solar a partir do calor ou em forma de luz. A eletricidade é gerada por meio do emprego do calor na usina heliotérmica ou diretamente nos painéis fotovoltaicos, pela radiação solar. Na forma de luz não se gera eletricidade à noite. O sistema fotovoltaico, que utiliza painéis solares, é instalado em locais que não possuem cobertura vegetal, onde já houve desmatamento, por exemplo; ou ainda pode ser instalado em telhados de construções rurais ou urbanas, sendo denominado Geração Distribuída (GD) ou microgeração (BRASIL, 2023c). Assim, no geral, a energia solar pode se destinar às residências ou edificações para aquecimento de água e aos processos de produção nas indústrias (BRASIL, 2021b).

O sistema de aquecimento solar (SAS) se traduz em diversos benefícios:

Para os consumidores, a utilização de SAS pode reduzir o gasto total com energia. Para o setor elétrico, o seu uso pode reduzir o consumo de eletricidade da rede, a demanda de ponta em períodos críticos e as perdas técnicas no sistema, postergando novos investimentos em geração, transmissão e distribuição. Finalmente, do ponto de vista ambiental, o uso de SAS pode contribuir com a redução de emissões de GEE, por se tratar de uma fonte de energia limpa (BRASIL, 2021b, p. 300).

Entre os benefícios da fonte solar para o Brasil, destacam-se a produção de mais 30,6 GW de potência instalada; são mais de R\$ 151,7 bilhões em novos investimentos que geram 918,4 mil novos empregos; gera a arrecadação de mais de R\$ 44,5 bilhões em tributos e se evita emitir 39,1 milhões de toneladas de CO₂, estes montantes são considerados a partir de 2012 (ABSOLAR, 2023).

Evidencia-se que, em 2022, 3,74 GW da potência instalada em GD solar provieram dos sistemas residenciais; 1,46 GW de estabelecimentos comerciais; e 1,01 GW dos sistemas das propriedades rurais (HEIN, 2023). A GD colabora para que a matriz energética seja mais limpa, cause menos impacto à natureza, diminua a perda de energia elétrica, melhore a rede de distribuição, também conduza ao consumo consciente de energia (CARDOSO *et al.* 2021).

A usina heliotérmica utiliza a energia solar concentrada, que é produzida por meio de espelhos diretivos da energia solar para um local que aquece a água; essa se transforma em vapor, que gira uma turbina e essa gera a eletricidade. Assim, converte-

se a radiação solar em energia térmica, depois em energia mecânica e, finalmente, em energia elétrica. Visto que o processo inclui energia térmica, pode-se armazenar o calor, quando não houver energia solar suficiente, como em dias nublados e à noite. Uma das vantagens dessa fonte renovável é que se gera energia em grande escala, além de ser possível o armazenamento térmico (WEINSTEIN *et al.*, 2015).

Relativo às tecnologias de células fotovoltaicas disponíveis comercialmente, essas possuem custos e desempenhos desiguais. São três tipos reconhecidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO): de silício monocristalino, de policristalino e filmes finos. Os painéis mais comercializados mundialmente são de silício monocristalino e de policristalino (MOREIRA NETO; SOUZA, 2020). As matérias-primas principais de células fotovoltaicas e baterias são silício e lítio, respectivamente, e o Brasil possui portentosas reservas dessas (BRASIL, 2009).

Em conformidade com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2019-2029), das placas solares instaladas no Brasil a capacidade tende a ascender o quádruplo nesse decênio. Essa capacidade instalada é proporcional à quase duas usinas de Itaipu, uma das maiores do mundo e que detém 14 GW de potência (ENERGIA SOLAR... 2023).

Até 2019, registrava-se no Brasil um total de 4,4 Gigawatts (GW) de energia gerada pela Geração Centralizada (GC) e pela GD. Moreira Júnior e Souza (2020) afirmam que, nas capitais brasileiras, captam-se entre 4,9 kWh/m²/dia e 6 kWh/m²/dia de irradiação solar de forma inclinada. Esse contexto se reflete na capacitância produtiva do setor.

Informações publicadas pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar) mostram que desde julho de 2022, houve um aumento médio de 1 GW por mês. Essa consistência fará com que o crescimento total se aproxime de 83% em um ano (ABSOLAR, 2020).

Dados da ANEEL expõem que, em abril de 2023, foram superados 3 gigawatts (GW) de crescimento na matriz geradora de energia elétrica no ano. Nesse primeiro quadrimestre, foi de 3.343,1 megawatts (MW) a expansão na capacidade instalada. Provieram desse quantitativo 1.243,4 MW (37,19%) de oito usinas solares fotovoltaicas (BRASIL, 2023b).

Relativo ao crescimento da geração própria, esse ocorreu, principalmente, em virtude do prazo para as novas regras de compensação pela Lei 14.300/2022, a qual estabeleceu que até 2045 serão mantidas as atuais regras a quem, até 6 de janeiro de 2023, solicitar acesso ao sistema de geração própria de energia solar. A partir desse marco, as cobranças serão graduais e reduzirão o ganho das novas usinas, por isso houve procura generalizada à microgeração de energia fotovoltaica (HEIN, 2023).

A energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos é comercializada por *Virtual Net Metering* (Sistema de Compensação de Energia). Esse sistema permite que o excedente de energia produzida pela unidade consumidora de micro e minigeração seja direcionado para a rede distribuidora, que atua como bateria e armazena a energia que excede. Caso a energia fornecida seja superior à energia consumida, o consumidor recebe um crédito em kWh, que é utilizado para reduzir o consumo em outro ponto tarifário ou nas faturas dos meses seguintes. Também podem ser utilizados em outras unidades consumidoras, mas que pertençam à mesma área de licenciamento. Frente a esse processo de comercialização, retornam-se os investimentos feitos para implantar o sistema fotovoltaico num período entre seis e sete anos, podendo minorá-lo pelos programas de governo ou pela participação de empresas de energia (NASCIMENTO, 2017).

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a propagação de SAS é decorrente de políticas públicas municipais, estaduais e federais, com destaque para as políticas de Habitação de Interesse Social (HIS)³, as quais dispuseram sobre a obrigação ou incentivaram a utilização da tecnologia para determinados públicos ou região brasileira. A estimativa é que o SAS tenha alcançado, em 2019, 4,4 milhões de domicílios, dos quais 1,2 milhão são de HIS. Para 2030, estimam-se 8,1 milhões de unidades instaladas em residências e, dessas, 2,3 milhões de unidades sejam de HIS. A substituição de chuveiros elétricos por SAS até 2030 poderá evitar o consumo de energia elétrica nas residências que poderá atingir cerca de 1 TWh, que equivale a uma hidrelétrica de cerca de 200 MW (BRASIL, 2021b).

³ Habitação de Interesse Social se volta para a população de baixa renda que não detém acesso à moradia formal "nem condições para contratar os serviços de profissionais ligados à construção civil" (MOREIRA, 2020, n.p).

As políticas de HIS são contempladas pela lei n. 12.424/2011 que, em seu art. 82, autoriza o custeamento, no domínio do Programa Minha Casa, Minha Vida, da compra e instalação de dispositivos de energia solar ou que cooperem para reduzir o consumo de água em moradias (BRASIL, 2011a); na Portaria n. 325, de 7 de julho de 2011, do Ministério das Cidades, com destaque para o Anexo IV que traz a previsão de sistemas de aquecimento solar em empreendimentos compostos por unidades habitacionais unifamiliares (BRASIL, 2011b).

Outras normativas são a Resolução Normativa n. 1.059, de 07 de fevereiro de 2023, pela ANEEL (BRASIL, 2023d), que também alterou a Resolução Normativa (RN) n° 920, de 23 de fevereiro de 2021, que aprovava os procedimentos do programa de eficiência energética (BRASIL, 2021b); a RN n. 956, de 7 de dezembro de 2021, que estabelecia os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (BRASIL, 2021c); a RN n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021, que estabelecia as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica (BRASIL, 2022a); a RN n. 1009, de 22 de março de 2022, que estabelecia as normas atinentes ao contrato de aquisição de energia nos espaços regulados e livres de contratação (BRASIL, 2022b).

Entretanto uma das principais normativas, como já mencionado, é a lei n. 14.300/2022, conhecida como Marco Legal da Geração Distribuída ou de Taxação do sol. A principal alteração diz respeito à cobrança do Fio B, ou seja, o pagamento pelas linhas de transmissão de energia até o domicílio do consumidor. Assim, esse pagará o Fio B sobre toda a energia injetada na rede, o que muda a forma compensatória de créditos atinente à legislação anterior (MARQUES, 2022). O valor do Fio B será definido pela concessionária de energia de cada estado, no entanto, o percentual da cobrança, seguirá o aumento gradual estipulado pela ANEEL: a partir de 2023, 15%; de 2024, 30%; de 2025, 45%; de 2026, 60%; de 2027, 75%, e de 2028, 90% (BRASIL, 2022c).

As usinas que, em 2023, iniciaram a comercialização de energia solar, essas estão dispersas nas cinco regiões brasileiras, em 15 estados, e totalizam 104 usinas. Os estados que se destacaram, neste quadrimestre de 2023, com melhores resultados foram: Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Bahia e Piauí, com a produção de 1.057,8

MW, 687,4 MW, 567,1 MW e Piauí 314,9 MW, respectivamente. O maior crescimento em abril fora de Minas Gerais, com 231,0 MW (BRASIL, 2023c), conforme a Figura 4.

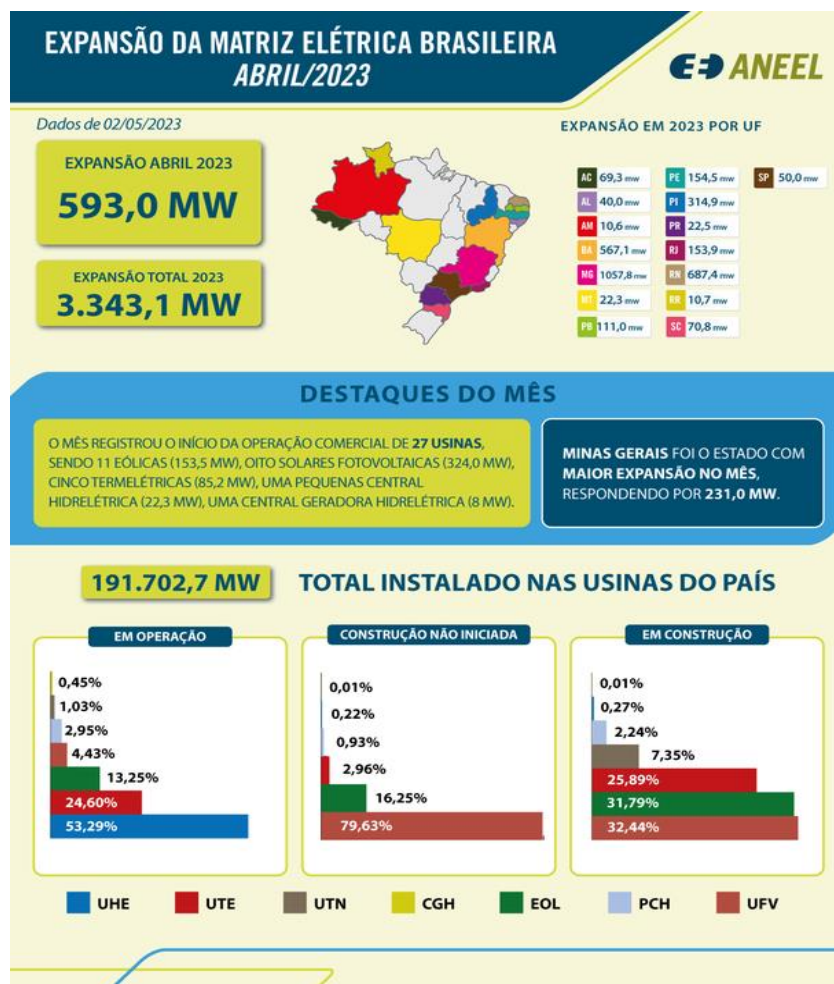


Figura 4 - Expansão da Matriz Elétrica Brasileira, 2023

Legenda: UHE - Usina Hidrelétrica; UTE - Usina termoeétrica; UTN – Usina Termonuclear; CGH - Centrais Geradoras Hidrelétricas; EOL - Usina Eolielétrica; PCH - Pequena Central Hidrelétrica; UFV - Central Geradora Fotovoltaica.

Fonte: Brasil (2023b)

Observa-se que, até abril de 2023, as usinas hidrelétricas continuam sendo de maior percentual em operação no Brasil (53,29%), seguida das usinas termoeletricas (24,60%), das usinas eolielétricas; ficando em quarto lugar as centrais geradoras fotovoltaicas (4,43%). Porém, essas estão em primeiro lugar em se tratando de construção de usinas não iniciada (79,63%) ou em construção (32,44%) Destaca-se no mês de abril o início de construção de 8 usinas solares fotovoltaicas, evidenciando o potencial dessa fonte renovável de energia.

O estado de Minas Gerais, sobretudo, em seus municípios do Norte, consoante a Figura 5, detém um amplo potencial para geração de energias renováveis,

nomeadamente de energia solar e biomassa. A geração de energia solar nas áreas rurais dessa região, que possui grandes extensões de terras pouco favoráveis à agropecuária e por ser uma área privilegiada de incidência de raios solares, torna-se uma oportunidade de desenvolvimento econômico e social (CARVALHO, 2022; GOMES; DUQUE, 2009).

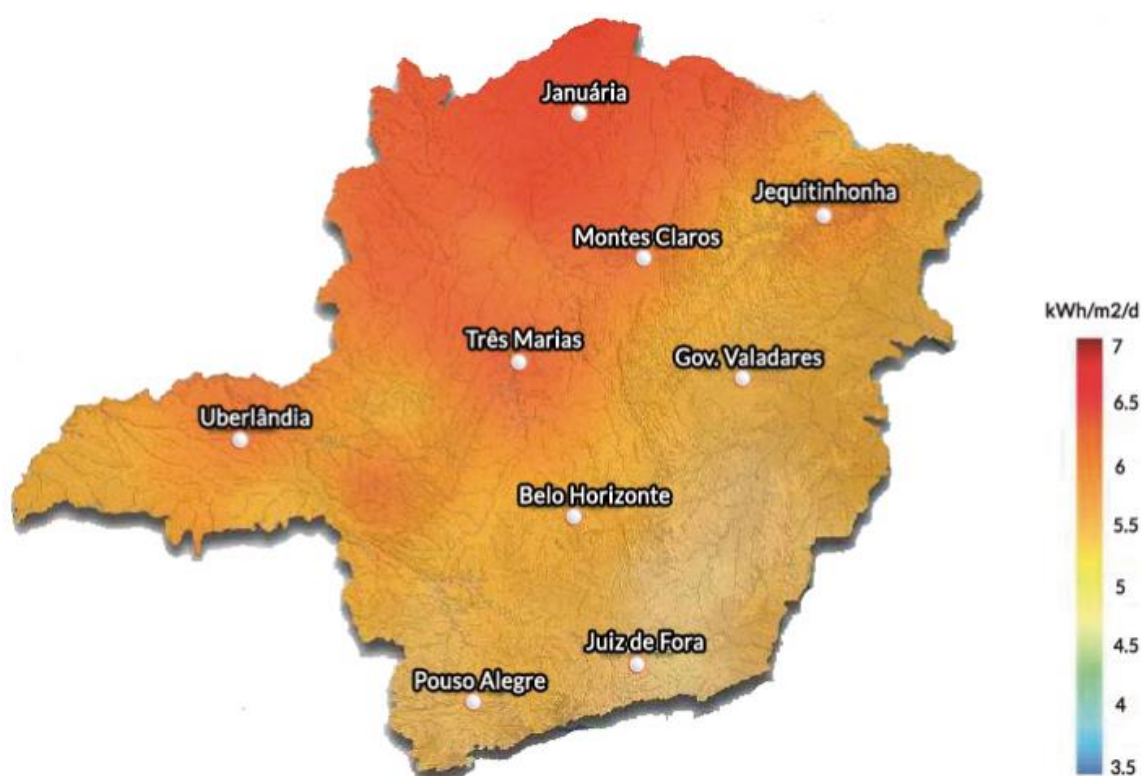


Figura 5 - Radiação Solar média diária anual em Minas Gerais
Fonte: CEMIG (2010, p.61)

Nota-se que a média diária anual de irradiação solar varia entre 5 e 6,5 kWh/m²/dia em todo o estado; no Norte de Minas, a média diária anual varia entre 6,5 e 7 kWh/m²/dia, evidenciando o alto potencial para geração de energia solar, visto que, para sistemas fotovoltaicos, a radiação solar deve ter uma média diária anual maior que 5,5 kWh/m²/dia.

Frente ao exposto, a energia solar demonstrou ser fonte de energia sustentável e acessível a diversos públicos. A partir da instalação do sistema fotovoltaico, pode-se reduzir os custos com eletricidade, diminuir a demanda energética das hidrelétricas e controlar a emissão de gases de efeito estufa.

Outra alternativa na estratégia climática e de energia para abatimento de emissões de carbono é o hidrogênio – assunto da próxima seção – o qual viabiliza o

armazenamento e beneficia o vínculo dos setores energéticos aos industriais e de transporte.

3.3 Cenário do hidrogênio verde no Brasil

O hidrogênio (H₂), embora seja o elemento que mais abunde no mundo, não está disponível de forma livre na natureza; são necessários processos industriais na separação das moléculas desse elemento de outras substâncias que o contêm, a exemplo da água e do gás metano (TEIXEIRA JR, 2023).

O hidrogênio tem várias vantagens como combustível, pois é seguro para o meio ambiente, dissipa-se facilmente e pode ser armazenado, o que possibilita o seu transporte por grandes distâncias e pelos oceanos. O transporte do hidrogênio pode ser feito na forma de gás, liquefeito ou por meio de outro produto químico (FONSECA, 2022; GURLIT *et al.*, 2021).

Grande parte da produção de hidrogênio utiliza o gás natural como matéria-prima obtendo hidrogênio (H₂) e gás carbônico (CO₂) o qual, no código de cores usado para identificar o hidrogênio pelo processo usado para produzi-lo, denomina-se hidrogênio cinza, que é produzido do gás natural. As demais cores estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Cor de Hidrogênio e descrição

Cor do hidrogênio	Descrição
Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS*.
Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS.
Hidrogênio cinza	Produzido do gás natural, sem CCUS.
Hidrogênio azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS.
Hidrogênio verde	Produzido a partir de fontes renováveis via eletrólise da água.
Hidrogênio branco	Hidrogênio natural ou geológico.
Hidrogênio turquesa	Produzido por craqueamento térmico metano, sem gerar CO ₂ .
Hidrogênio musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, por meio de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.
Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear.

* CCUS - captura, utilização e armazenamento de carbono

Fonte: Oliveira (2022, p.14)

O hidrogênio rosa não emite CO₂ em sua produção, entretanto, a fonte de eletricidade é nuclear. Um hidrogênio menos poluente é conhecido como "azul", pois se tornam mínimas as emissões poluentes pela captura do gás, por consequência há menos impactos contraproducentes no meio ambiente; e outra opção é produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água, cujo resultado é o hidrogênio verde. Também há a possibilidade de produzir o hidrogênio musgo, a partir da biomassa, entre outros constantes no Quadro 1 (TEIXEIRA JR, 2023; GURLIT *et al.*, 2021).

A utilização do hidrogênio esteve centrada em aplicações muito peculiares, como a refinação de petróleo ou a produção de amoníaco, mas agora a perspectiva é outra em razão do aumento no investimento em fontes de energia renováveis, sobretudo na energia eólica e na solar, e o desenvolvimento tecnológico e industrial do eletrolisador que reduziram o custo de produção de hidrogênio verde (GURLIT *et al.*, 2021).

O H₂ pode ser empregado como matéria-prima nas indústrias química, siderúrgica, de refino, mineração, cimento, vidros; também para geração de calor e eletricidade. Ainda pode ou tem potencial para ser utilizado em indústrias alimentícia, metalúrgica, eletrônica, de soldagem, na medicina e na criogenia. No transporte, como combustível, pode ser empregado no meio rodoviário – em veículos leves e pesados – marítimo, ferroviário e aeroviário (WHA INTERNATIONAL, 2021; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019). Mas uma das aplicações mais relevantes do H₂ é como vetor energético em sistemas de energia renovável, com o propósito de fornecer energia para áreas isoladas (SILVA; SEVERINO; OLIVEIRA, 2013).

Como as possibilidades mais promissoras para obtenção do hidrogênio verde são a eletrólise da molécula da água pela captura e transporte da energia solar ou eólica, que são abundantes no território brasileiro, isso torna o país forte candidato à liderança na indústria dessa energia (TEIXEIRA JR, 2023).

Para cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris, é preciso reduzir as emissões de CO₂, mas a neutralidade do carbono requerida pode ser aplicada em veículos leves, em seus motores elétricos e baterias, no entanto, isso não é possível para atividades críticas como em grandes navios, aviões e indústrias siderúrgicas – nesses casos, a solução poderá ser o hidrogênio verde (TEIXEIRA JR, 2023).

Exemplo de aplicação em veículo ocorreu com acadêmicos de oito universidades brasileiras que foram desafiados a produzir um veículo do tipo Baja ou Fórmula que fosse movido à molécula de hidrogênio, vencendo a equipe da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pelo melhor desempenho do baja Júpiter – primeiro carro movido a hidrogênio do mundo. A corrente elétrica que alimenta o motor do veículo é gerada pela reação reversa da eletrólise da água na célula, assim, o H₂O é o subproduto da reação nela. O Júpiter se equipara aos veículos elétricos convencionais em suas vantagens, porém, o tempo de abastecimento do baja é menor em razão de se dar pela troca do cilindro, enquanto naqueles se abastece com recarga de bateria, podendo chegar a horas (RESENDE, 2022).

Outro veículo a hidrogênio foi desenvolvido por pesquisadores da USP, no Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (Cietec), em que a célula combustível utiliza o hidrogênio e o carbono e produz como resíduo apenas água (BERNARDES, 2003).

Em Los Angeles e Tóquio, principais mercados do veículo, circula o Toyota Mirai, que é referência em mobilidade e sustentabilidade, produzido desde 2015 e está em sua segunda geração. Em japonês, “Mirai” significa futuro e isso se justifica em razão de o sedã de luxo ser movido à célula de hidrogênio que fica armazenado em baterias em 3 tanques em sua parte inferior. Com um tanque é possível percorrer cerca de 600 km. Outros que compartilham dessa tecnologia são o Hyundai Nexo e Honda Clarity (CERQUEIRA, 2022; LIRA, 2022).

No processo de produção do combustível, não existe combustão, apenas uma reação química.

O hidrogênio é pressurizado em um catalisador, onde seus íons e elétrons são separados. Os elétrons formam a corrente elétrica que é enviada ao motor, fazendo as rodas do carro girarem e os sistemas eletrônicos funcionarem. As moléculas de oxigênio se juntam aos íons de hidrogênio residuais, formando água (LIRA, 2022, n.p).

Para a descarbonização, o uso da célula-combustível a hidrogênio verde se mostra como solução, e sua produção e uso são relevantes, contudo, os custos de implantação de sistemas híbridos envolvendo fontes de energia alternativas ainda são bastante altos.

Como há necessidade de neutralizar carbono, justificam-se os investimentos, tanto que existem vultosos investimentos em três hubs de hidrogênio verde localizados em regiões portuárias no Brasil: em Suape, no estado de Pernambuco; Pecém, no Ceará; e Açu, no Rio de Janeiro (CERQUEIRA, 2022; LIRA, 2022).

Não obstante, produzir hidrogênio em grande escala pode não ser em breve tempo. Como supramencionado, almeja-se que seu uso inicial seja nos setores e empreendimentos industriais emissores de gases de efeito estufa, com dificuldade de viabilizar a descarbonização, como as grandes siderúrgicas que usam carvão para produzir aço – são bem poluentes; grandes navios, como os cargueiros, e aviões são movidos a combustíveis fósseis; a produção de fertilizantes e as refinarias que utilizam atualmente o hidrogênio cinza. Todos esses precisam substituir suas fontes poluentes por hidrogênio verde, ainda que para os navios e aviões seja inviável o uso de bateria, por não durar em longa distância, mas poderiam utilizar o hidrogênio verde puro, na forma de amônia ou metanol (TEIXEIRA JR, 2023).

O principal cliente do hidrogênio verde tende a ser o setor de refino por já consumir 74% do hidrogênio designado às refinarias, seguido pelo de fertilizantes e amônia, cujo consumo anual é de 87 mil toneladas de hidrogênio cinza. Para se alcançar uma cadeia de hidrogênio sustentável é imperativa uma política pública, como marco regulatório, tecnologia e mercado que impulsionem a produção de equipamentos e prestação de serviços no segmento (MACHADO, 2022a).

Para o setor aéreo, que tem aumentado a emissão de gases poluentes, a geração de hidrogênio verde permitirá a redução na emissão de CO₂, mas ainda há um desafio que é levar a produção do H₂ para o aeroporto. O Brasil precisa encontrar alternativa, uma vez que assinou o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) e deverá cumprir as medidas impostas para a neutralidade do carbono a partir de 2027. Uma opção mais limpa é a produção de um tipo de querosene como combustível para avião, em que hidrogênio verde e carbono passariam por um reator de Fischer-Tropsch e geraria o petróleo sintético, tornando a aviação sustentável (NO SETOR... 2021).

O Ministério de Minas e Energia (MME) brasileiro já se antecipou e apresentou proposta para inserção do *sustainable aviation fuel* (SAF) na aviação nacional. Foi

estabelecido que, nos voos domésticos, a partir de 1º de janeiro de 2027, deverá ser misturado o SAF, que é uma composição de combustível de aviação convencional com agentes mais sustentáveis, ao querosene fóssil (MACHADO, 2022b).

Ao produzir o hidrogênio verde, há possibilidade de exportá-lo, pois são 194 países signatários do Acordo de Paris, além do Brasil, e alguns com pouca capacidade de produzir energia a partir de fontes renováveis, mas dispostos a pagar por sua produção (TEIXEIRA JR, 2023).

Há também destaque para os grandes investimentos feitos no setor no Brasil por petroleiras, países exportadores de petróleo, produtores de ferro, startup norte-americana. Mas o Brasil não está sozinho nessa corrida para produzir a nova energia, países como Chile, Austrália, Estados Unidos já possuem projetos ambiciosos de produção, tendo os dois primeiros um grande potencial solar por deterem deserto em seus territórios (TEIXEIRA JR, 2023).

Quanto aos investimentos em âmbito nacional, o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) possui programa que apoia projetos pilotos de produção ou que utilizarão hidrogênio verde. Em conformidade com o BNDES, suas linhas de financiamento serão expandidas para apoio a projetos de produção, para exportação, de hidrogênio verde em larga escala, isso devido a serem astronômicos os investimentos necessários, que podem ser dezenas de bilhões de reais, apenas para construção das plantas (CHIAPINNI, 2022).

A prioridade na destinação dos recursos à pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia foram orientados à Agência Nacional de Energia Elétrica e à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis pela Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, aprovado pelo governo federal em 9 de março de 2021 (BRASIL, 2021d).

Já o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) brasileiro foi instituído pela Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, aprovado pelo governo federal em 3 de agosto de 2022 (BRASIL, 2022d). O PNH₂ visa fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio no Brasil como fonte energética secundária. O uso do hidrogênio ainda apresenta desafios em sua cadeia de energia como em sua produção, no transporte, no armazenamento e em seu consumo.

Destaca-se o art. 3º que determina os princípios do PNH₂:

- I - a valorização do potencial nacional de recursos energéticos;
- II - o reconhecimento da diversidade de fontes energéticas e alternativas tecnológicas disponíveis ou potenciais;
- III - a descarbonização da economia;
- IV - a valorização e incentivo ao desenvolvimento tecnológico nacional;
- V - o desenvolvimento de um mercado competitivo;
- VI - a busca de sinergias e articulação com outros Países; e
- VII - o reconhecimento da contribuição da indústria nacional (BRASIL, 2022d, n.p).

O primeiro princípio tem como propósito valorizar as diversas fontes para obtenção do hidrogênio e sua aplicação em vários setores produtivos; o segundo, reconhecer as múltiplas fontes energéticas que já existem ou podem ser descobertas para produzir, armazenar e usar o hidrogênio; o terceiro, considerar que o hidrogênio contribui para descarbonização até 2050; o quarto, propõe a valorização dos investimentos e experiências existentes no Brasil para continuarem a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação, visando à autonomia tecnológica; o quinto se relaciona com a demanda interna e com a exportação de hidrogênio em curto, médio e longo prazos; o sexto, busca a cooperação e coordenação internacional; e, por último, o sétimo, atesta que a indústria brasileira está apta para cooperar com a economia do hidrogênio.

Sobre a cooperação internacional, o Brasil e a Alemanha já são parceiros por meio da do Ministério de Ciência Tecnologia e Inovações (MCTI) e Ministério de Minas e Energia (MME) brasileiros e a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), que é uma agência alemã de cooperação internacional, e juntos desenvolvem o projeto ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos (BARBOSA; SOUZA, 2022).

Para estruturação do PNH₂, a Resolução nº 6/2022 determinou em seu art. 4º, seis eixos temáticos que contêm as diretrizes do Programa, conforme a Figura 6.



Figura 6 - Eixos temáticos que compõem o PNH₂
 Fonte: Brasil (2021e, p. 14)

O Eixo 1 tem como escopo mapear e fortalecer as bases existentes para o desenvolvimento do hidrogênio, também os hiatos a serem preenchidos. O Eixo 2 visa promover capacitação para os recursos humanos a fim de que desenvolvam competências necessárias na cadeia de produção, transporte, armazenamento e uso do hidrogênio. O Eixo 3 objetiva estudar e planejar a demanda e oferta do hidrogênio no setor de energia. O Eixo 4 designa a reestruturação das normativas regulatória e legislações sobre incluir o hidrogênio na matriz energética brasileira. O Eixo 5 visa identificar que setores nacionais já operam com o uso do hidrogênio para incentivar a adoção desse em outras cadeias produtivas. E o Eixo 6 determina o mapeamento do planejamento energético e das políticas setoriais no setor de hidrogênio dos principais países.

O Brasil tem potencialidade para se sobressair nesse mercado, uma vez que mais de 80% de sua matriz energética provém de fontes renováveis e possui vastos recursos energéticos com possibilidade de uso para produzir hidrogênio de baixo carbono.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo, conforme seus objetivos, é considerado como exploratório ou bibliográfico a partir de análise bibliométrica, de abordagem qualiquantitativa com dados secundários (GIL, 2019).

A pesquisa exploratória ou bibliográfica é feita a partir da busca de referências teóricas previamente examinadas e publicadas em formato impresso ou eletrônico, como livros, artigos científicos, sítios (FONSECA, 2002). Os dados secundários são obtidos nessas mesmas fontes (LAKATOS; MARCONI, 2010). Nesta pesquisa, esperava-se encontrar um número relevante de publicações que relacionavam a produção de hidrogênio verde à energia solar no Brasil, que apontassem vantagens, limitações ou desafios na cadeia de produção do H₂V acoplado à fonte solar e descrevessem a cadeia produtiva do hidrogênio verde.

A análise bibliométrica utiliza a abordagem quantitativa para avaliar a produção científica de um campo específico do conhecimento, ou seja, usa métricas e indicadores para examinar o impacto e a visibilidade da produção científica em um determinado campo do saber. Um dos principais indicadores utilizados na análise bibliométrica é o número total de publicações em um determinado período de tempo (DERELI *et al.*, 2011). A análise bibliométrica foi empregada para analisar as publicações que relacionam a produção de hidrogênio à energia solar no Brasil.

A pesquisa qualitativa se concentra no desenvolvimento conceitual da realidade, de ideias, opiniões, de elementos que não podem ser expressos em número. Centra-se no universo dos significados, crenças, valores e atitudes, explorando as classes mais profundas dos processos e dos fenômenos que não podem ser simplificados em variáveis mensuráveis (MINAYO, 2007).

Para proceder à pesquisa exploratória, que visa estudar a viabilidade da produção de hidrogênio verde por intermédio da energia solar no Brasil, foi utilizada a base de dados Google Scholar e SciELO. Foram utilizados os termos “hidrogênio verde”, “energia solar” e “energia fotovoltaica” e teve como limite os artigos publicados entre 2021 e 2023. As palavras poderiam estar no resumo, título ou nas palavras-chave das publicações. Para refinamento, utilizaram-se critérios como publicações brasileiras e

o tempo de aproximados 4 anos, devido às discussões de gerar H₂V como vetor energético ser relativamente recente no Brasil. Desse modo, foram eliminadas as publicações que não estavam compreendidas nesse período, que não fossem relativas ao Brasil e as que abarcavam outras fontes alternativas de energia que não, especificadamente, a solar.

A base de dados SciELO não retornou nenhum periódico com o filtro utilizado. A pesquisa no base de dados do Google Scholar retornou um conjunto de 15 publicações sobre hidrogênio verde, energia solar e Brasil, no período de 2021 a 2023, contudo, após leitura do resumo, 5 foram eliminadas por não tratarem do tema especificadamente. Desse modo, 10 publicações (5 trabalhos de conclusão de curso e 5 artigos científicos) foram selecionados para se estudar a viabilidade da produção de hidrogênio verde por intermédio da energia solar no Brasil.

5 RESULTADOS

As publicações selecionadas estão compreendidas entre 2021 e 2023, corroborando a ideia de que são poucas as publicações acerca do tema, ratificando ser uma área ainda embrionária e que pode ser mais pesquisada. No Quadro 2, tem-se um resumo das publicações em ordem cronológica.

Quadro 2 - Publicações acerca de H2V a partir de energia solar, 2021-2023

Autor(es)	Título	Palavras-chave
SILVA, Débora Cristina Ferreira da (2021)	Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização: uma breve revisão bibliográfica.	Hidrogênio (H ₂), Captura de CO ₂ , Transição energética, Células a combustível; Descarbonização.
ABREU, Thiago Modesto de; <i>et al.</i> (2022)	Desafios e oportunidades para o mercado de hidrogênio verde no Brasil: Uma análise SWOT.	hidrogênio verde, análise SWOT, transição energética
ANDRADE, Carla Freitas de; <i>et al.</i> (2022)	Um estudo bibliométrico sobre tendências de pesquisa na produção de hidrogênio a partir da fonte solar baseada na Scopus.	Energia Fotovoltaica, Energia Solar, Hidrogênio Verde, Revisão Bibliométrica.
BEZERRA, Daniel Alves <i>et al.</i> (2022)	Análise bibliométrica das publicações relacionadas à produção de hidrogênio e fonte solar fotovoltaica.	Energia Fotovoltaica, Hidrogênio Verde, Revisão Bibliométrica
FONSECA, Roberto Giannetti da (2022)	A era do hidrogênio verde no século XXI.	Hidrogênio Verde, Desenvolvimento Sustentável, Brasil, Transição Energética, Descarbonização
GARCIA, José Victor; CARVALHO, Julia (2022)	Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil	Hidrogênio Verde, Fontes Renováveis de Energia, Brasil, Exportação, Descarbonização
MORAES, Luanna Lima de (2022)	O cenário do hidrogênio verde: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região.	Hidrogênio; Hidrogênio Verde, Transição Energética, Descarbonização, Economia do Hidrogênio
SILVA, Thamyres de Andrade (2022)	O hidrogênio na geração distribuída: desafios e possibilidades.	Geração Distribuída, Hidrogênio, Descarbonização, Transição Energética
SOUZA, Natália Paula de (2022)	O hidrogênio verde para geração de energia elétrica no Brasil.	Economia Verde, Fontes Renováveis, Transição Energética, Usina de Eletrolise
BITENCOURT, Layse de Paula (2023)	Análise bibliométrica e projeto de um sistema de geração de hidrogênio verde	Energias renováveis, Hidrogênio verde, Eletrolisado Energia solar

Fonte: Dados da pesquisa

O trabalho de Silva (2021) discorreu acerca das barreiras técnicas com vistas a mapear os principais obstáculos que limitam a competitividade do H₂V no setor de energia no Brasil. Abreu *et al.* (2022) aplicaram a análise SWOT para, estrategicamente, mapearem e identificarem forças, fraquezas do ambiente interno;

oportunidades e ameaças do ambiente externo que possibilitaram identificar as competências e a atuação do Brasil no mercado em que se insere. Andrade *et al.* (2022) fizeram um levantamento bibliográfico sobre publicações no Brasil e no mundo que relacionam o hidrogênio com a energia fotovoltaica e com energia solar térmica. Bezerra *et al.* (2022) procederam a uma análise bibliométrica para analisar as publicações que relacionam a energia solar com a produção de hidrogênio. Fonseca (2022) procura situar o Brasil na transição energética global pela produção de H₂V de forma competitiva. Garcia e Carvalho (2022) analisaram a conjuntura atual da cadeia de H₂V no Brasil e o potencial de aplicação interna. Moraes (2022) fez uma revisão dos conceitos gerais do hidrogênio, uma revisão de sua economia, aplicações em projetos-piloto e traçou um histórico das ações e iniciativas no mundo e no Brasil para se desenvolver a indústria do H₂V. Silva (2022) realizou uma pesquisa bibliográfica de publicações sobre o processo de transição energética, os principais métodos para a produção do hidrogênio, a sua utilização como fonte de energia, sua adição na geração distribuída e o panorama atual do Brasil em relação ao hidrogênio limpo. Souza (2022) realizou um estudo exploratório acerca do potencial do uso do hidrogênio verde na geração de energia elétrica nas próximas décadas. Bitencourt (2023) realizou uma revisão bibliométrica em trabalhos publicados no Brasil e no mundo que relacionam a produção de H₂V com energia fotovoltaica e elaborou um projeto-piloto de produção de H₂V tendo como fonte de energia o excedente gerado em instalações fotovoltaicas da Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé. Constata-se que apenas um trabalho trata do desenvolvimento de um projeto de produção de H₂V; uma parte fez revisão bibliométrica (2) ou bibliográfica (2), alguns (2) mapearam as forças ou obstáculos que circundam a competitividade do H₂V no setor de energia no Brasil; os demais (3) analisaram a conjuntura atual da cadeia de H₂V no Brasil, o potencial de aplicação interna e no mercado global.

Serão, a partir dos estudos apontados, descritos as vantagens, limitações ou desafios na cadeia do H₂V acoplado à fonte solar para conduzir à conclusão a respeito da viabilidade da produção de H₂V por intermédio da energia solar no Brasil.

5.1 Produção de H₂V

Na produção de hidrogênio verde, também conhecida como rota tecnológica, os custos estão entre US\$ 2,50 - 6,80/kg (em 16 de maio de 2023, o preço do dólar comercial é R\$ 4,90585, portanto, convertidos e atualizados em Reais, os custos estão entre 12,27 e 33,36/kg) enquanto o preço em 2022 da produção de hidrogênio cinza era de US\$ 1–1,80/kg (R\$ 4,90585 - R\$ 8,83/kg, convertidos e atualizados em maio de 2023) e do hidrogênio azul é de US\$ 1,40–2,40/kg (R\$ 6,87 - R\$ 11,77/kg, convertidos e atualizados em maio de 2023) (MACEDO; PEYERL, 2022 *apud* ANDRADE *et al.*, 2022).

Os mercados de produção mais atraentes para o hidrogênio verde são os que têm recursos renováveis abundantes e de baixo custo, assim, a produção de H₂V se torna viável frente à redução nos custos de energia renovável e na integração de sistemas de energia.

A produção do H₂V pode ocorrer a partir da eletrólise da água, empregando no processo, por exemplo, energia solar. É um processo que envolve o uso da luz solar para produzir energia elétrica por meio de painéis solares fotovoltaicos. A eletricidade gerada, que é usada para realizar a eletrólise da água, separa da molécula da água (H₂O) o hidrogênio (H₂) e oxigênio (O). Nesse processo, geram-se bolhas de H₂ e O que podem ser usados isoladamente ou combinados. O hidrogênio produzido nesse processo é altamente puro, por isso, é comumente utilizado em células a combustível, contudo, o vapor d'água promove corrosão em equipamentos usados na compressão, armazenagem ou transporte, ou ainda, em temperaturas muito baixas, pode congelar, comprometendo tubulações e válvulas; embora os eletrolisadores, de regra, contenham secadores em torres que consomem pouca energia. Em suma, a eletrólise é relevante sob o ponto de vista ambiental, posto que não se emite CO₂ porque provém de fontes renováveis de energia (SILVA, 2021).

Evidencia-se que, sob esse ponto de vista, o hidrogênio verde é o vetor energético com maior capacidade para auxiliar na redução da dependência por combustíveis fósseis e, portanto, na descarbonização mais rápida da economia, já que provém de uma energia limpa.

Fonseca (2022), Garcia e Carvalho (2022) corroboram essa produção de H₂V pela eletrólise da água referida por Silva (2021). Fonseca (2022) ressalta o potencial energético do H₂V que é superior aos combustíveis fósseis e lembra que, em razão do surgimento da energia solar flutuante, a qual utiliza lâmina d'água de fontes hídricas para gerar energia fotovoltaica, possibilita maior competitividade para a produção de H₂V.

Garcia e Carvalho (2022) consideram a técnica mais auspiciosa para obter hidrogênio puro e acrescentam que podem ser utilizados três tipos de eletrolisadores – Alcalinos (AWE), Óxido Sólido (SOE) e Membrana com Troca de Prótons (PEM) –, entretanto, o mais interessante para a produção de H₂V é o PEM devido ao seu design compacto, ter boa eficiência energética, produzir H₂ de alta pureza; possuir baixa permeabilidade de gás por meio da membrana, ter intervalo de temperatura largo, e ser mais adequado para ser acoplado à variedade de energias renováveis. No entanto, Moraes (2022) faz uma alerta sobre esse tipo de eletrolisador que demanda altos custos de investimento, além de possuir menor tempo de vida útil se comparado aos demais; Bitencourt (2023) corrobora o alto custo, justificando que o w necessita de materiais nobres associados a base de platina, irídio e o rutênio, e Silva (2022) ressalta que o tipo PEM detém a menor capacidade de produção do H₂V.

Bezerra *et al.* (2022), em sua pesquisa, apontaram um sistema autônomo que utiliza energia fotovoltaica (PV) e células de combustível (FC), assim, constituindo o sistema híbrido PVeFC-Baterias. A configuração do sistema é baseada em arquitetura que é realizada utilizando um inversor/carregador, impondo uma frequência e tensão adequadas à rede. A energia excedente produzida pelos sistemas fotovoltaicos pode ser utilizada para produzir hidrogênio, por meio da eletrólise da água. O H₂ armazenado durante o dia fornece células a combustível para produzir energia elétrica em períodos de pouca ou nenhuma radiação solar. A instalação básica é integrada e opera de forma automática, da forma mais simples possível. Nesse tipo de produção os painéis fotovoltaicos e o eletrolisador são os responsáveis pelo alto custo do sistema proposto.

O custo de produção de hidrogênio a partir da energia solar sofre influência de fatores técnicos e econômicos, sendo os gastos na eletrólise da água, estimados em 70% do custo total de produção do H₂V (FONSECA, 2022), os que mais concorrem para

inviabilizar a produção, no entanto, a produção de H₂V acoplada à energia solar pode até 2030 ter os custos das energias renováveis reduzidos e se ampliarem a produção de hidrogênio. Se houver produção em massa, os custos dos equipamentos de reabastecimento e os eletrolisadores poderão também sofrer queda.

Moraes (2022) afirma que também podem ser utilizados ciclos termoquímicos para quebrar a molécula da água para produção do hidrogênio, mas as fontes de altas temperaturas referidas para essa produção são, no presente, a nuclear e a solar concentrada que se encontram em processo incipiente de desenvolvimento e não são, ainda, comercializáveis.

5.2 Armazenamento e transformação do H₂V

Para Abreu *et al.* (2022), o armazenamento do hidrogênio é uma etapa intermediária essencial que ocorre entre a produção e o consumo desse elemento. Do ponto de vista tecnológico, existem diversas formas de armazenar o hidrogênio, as quais podem ser adaptadas com base na produção, transporte e uso final proposto. As principais tecnologias de armazenamento incluem a abordagem física, a adsorção e a química.

Registraram Abreu *et al.* (2022) que, no caso do armazenamento físico, em forma gasosa, é possível utilizar vasos de pressão, recipientes ou cavernas subterrâneas, mas possui algumas desvantagens, como baixa densidade volumétrica e alto consumo de energia para pressurização. Já o armazenamento em estado liquefeito permite maior densidade energética, ou seja, mais energia por unidade de volume, mas requer um alto consumo energético no processo de liquefação. Outra opção de armazenamento é a adsorção, que envolve a ligação de moléculas de hidrogênio a materiais com uma grande área superficial específica, como materiais carbônicos, estruturas metal-orgânicas, polímeros porosos e zeólitas. O armazenamento químico pode ser feito ligando hidretos metálicos a líquidos e gases em forma de amônia, metano, metanol, por exemplo. Possui a vantagem de poder armazenar quantidade grande de hidrogênio em um pequeno volume.

Garcia e Carvalho (2022) se referem ao armazenamento por estoque geológico do produto, ou em tanques. Entendem que o estoque geológico, que é uma técnica utilizada para armazenar gás natural, seja o condicionamento do H_2 em cavernas de sal, em reservatórios de gás natural e petróleo, em que esses já tenham se esgotado, ou em unidades geológicas subterrâneas. Essa técnica tem a potencialidade de ser o processo de armazenamento do hidrogênio de menor custo, porém, por enquanto, demanda custos para sua exploração e desenvolvimento. O armazenamento em tanques para estocagem do hidrogênio liquefeito detém elevada eficiência, o desafio é que, nessa condição, a energia de um litro de hidrogênio é equivalente à energia de 0,27 litros de gasolina, o que requer espaços maiores; já se o hidrogênio for transformado em amoníaco pode ser a solução ideal, visto que a amônia tem maior densidade, requerendo espaço físico menor para armazenagem quantidade semelhante de energia.

Moraes (2022) assevera que a armazenagem do hidrogênio em estado gasoso é simples por requerer apenas compressor e vaso de pressão. Mas há desvantagem porque para maiores pressões de armazenamento, maiores os investimentos de recursos financeiros em compressores e custos operacionais. Também clarifica que ao utilizar os gasodutos para o armazenamento de H_2 se têm problemas com a manutenção do circuito de dutos. No estado líquido do hidrogênio, o problema advém das perdas por vaporização, posto que se transferir calor para o fluido, o hidrogênio evapora.

Silva (2022) entendeu que armazenar e transportar hidrogênio líquido é mais factível e econômico se comparado ao hidrogênio gasoso, pois, nesse estado, passa a ter um volume maior em 853 vezes. O contratempo é que para tornar o hidrogênio liquefeito se demanda muita energia, devido à perda de 40% da energia nesse processo.

Em estado gasoso ou liquefeito, Souza (2022) aponta que o H_2 pode ser distribuído para se usar como combustível ou para geração de energia elétrica, o qual volta como energia para o meio ambiente.

Bitencourt (2023) ressalta os três estados possíveis para armazenamento do hidrogênio e assevera que, no estado sólido, a adsorção é feita na superfície de materiais como nanotubos de carbono, minerais, estruturas orgânicas, metálicas,

entre outros. Ressalta que são necessárias maneiras eficientes e viáveis economicamente de armazenar H_2 e que, para isso, imperam-se investimentos em pesquisas.

Silva (2021) registra outras formas de armazenamento de energia que mudam conforme as aplicações, como a geotérmica, supercondutor de armazenamento de energia magnética, armazenagem hidrelétrica com bombeamento para usina hidrelétrica, de energia e de ar comprimido. Alerta para o fato de que os sistemas de armazenamento por adsorção do hidrogênio, sendo basilares os hidretos metálicos, são alternativa para armazenar grandes quantidades de forma segura e compacta.

Andrade *et al.* (2022), por meio de seus achados, afirmam que o hidrogênio detém uma das opções com maior potencial de reduzir os custos de armazenamento de energia pela capacidade de ser armazenado por pouco ou longíssimo tempo. Informação ratificada por Bezerra *et al.* (2022).

Isso posto, observa-se que o armazenamento de H_2 ainda é desafio a ser enfrentado para permitir a expansão do produto e sua viabilidade para neutralizar carbono na economia. À proporção que os combustíveis fósseis forem substituídos pelo H_2V a descarbonização da economia decolará e, então, serão necessárias maiores opções de armazenamento.

5.3 Transporte do H_2V

O modal de transporte de hidrogênio ideal muda consoante a distância a ser percorrida, o local e o uso final visado. O hidrogênio final poderá ser conduzido por caminhões, gasodutos ou navios, contudo, algumas regras gerais devem ser consideradas para diferentes distâncias. Para curtas e médias distâncias, é necessário atualizar as redes de dutos e aumentar os volumes de H_2 a serem transportados, visando garantir uma otimização dos recursos. Em contrapartida, em cenários de menor demanda ou locais em que a demanda varia amplamente, a opção mais atrativa para o transporte é o desenvolvimento de plantas que já possuam uma rede de dutos para H_2 completa. Em distâncias maiores, o transporte por dutos subaquáticos é mais econômico que o transporte por navios. No entanto, seu uso

depende de a região geográfica de destino ser percorrível. Além disso, como não é apropriado o transporte de hidrogênio gasoso em longa distância, podem liquefazê-lo, convertê-lo em amônia ou buscar um transportador de hidrogênio orgânico líquido. Os custos dessas três formas são dependentes do meio de transporte empregado e dos custos de conversão correspondentes, asseveram Garcia e Carvalho (2022).

Notificam Abreu *et al.* (2022), em sua publicação, que a baixa densidade de energia do hidrogênio implica que seu transporte por longas distâncias demande um alto custo. No entanto, quando armazenado em moléculas maiores, o hidrogênio pode ser mais facilmente transportado por meio de gasodutos, com possibilidades de diminuir os custos para os usuários finais. Apesar de o uso de dutos ser uma opção benéfica em longo prazo, isso dependerá da existência de uma grande demanda. Atualmente, a distribuição de hidrogênio é dependente de caminhões que o transportem como gás ou líquido. No caso de envio de hidrogênio para outro país, comumente, é necessário liquefazê-lo ou transportá-lo como amônia.

Silva (2021) afirma existirem várias maneiras de transportar o hidrogênio, mas os oleodutos e gasodutos aparentam ser os métodos mais viáveis sob a visão econômica, pois podem transportar grandes quantidades por longas distâncias. No entanto, há que considerar que modificações em gasodutos requerem esforços para superar uma série de questões relacionada à segurança, como fragilização do material, corrosão e vedação eficiente para evitar vazamentos. Por essa razão, mesmo com a atratividade da descarbonização, o armazenamento e transporte do hidrogênio são considerados um desafio difícil de superar.

Acresce-se que linhas de transporte de H₂ exigirão manutenção mais rigorosa e provavelmente mais criteriosa para se evitarem vazamentos do que os gasodutos convencionais. Também, o investimento em instalação de um oleoduto pode variar expressivamente conforme o local. Outra questão importante em relação ao transporte é a eficiência que se define pela relação entre a queda de pressão causada pela distância de transporte e a quantidade de calor requerida para mover a substância. Nesse sentido, o hidrogênio necessita de energia quadruplicada para se mover por um gasoduto em comparação com o gás natural, afirma Silva (2021).

Para Fonseca (2022), a viabilidade em larga escala do uso do H₂V no futuro próximo depende significativamente da logística de transporte e o Brasil possui condições favoráveis para se tornar um dos principais fornecedores globais de hidrogênio verde com alta competitividade.

Não obstante, Silva (2022) aponta que o transporte do hidrogênio se liga declaradamente às formas de armazenamento, pois é imperioso comprimir o volume do H₂ para ser transportado se quiser obter quantidades expressivas de energia. E, após o transporte, o hidrogênio estará disposto para o seu uso visado, como matéria-prima, como combustível ou para gerar energia (SOUZA, 2022).

A seguir, ilustra-se o processo de produção, transformação, transporte e uso final do H₂V.

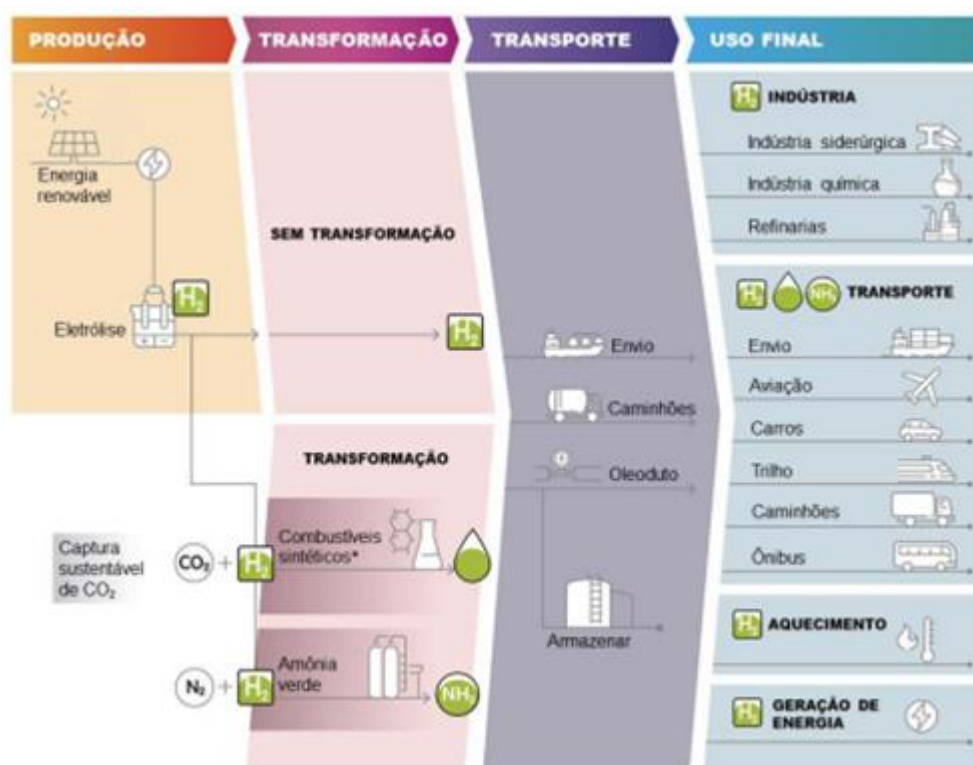


Figura 7 - Cadeia de produção, transformação, transporte e uso final do hidrogênio verde
Fonte: Adaptado de Fonseca (2022, p. 44)

Tem-se na figura acima todos os percursos na produção do hidrogênio verde, desde sua produção a partir da energia solar, passando pela eletrólise ou pela captura sustentável do CO₂, por sua transformação em combustíveis sintéticos ou amônia verde, ou não se transformando; sendo transportado ou enviado por navio, caminhões

ou oleoduto; dirigido ao armazenamento e, em seguida, destinando-se ao seu uso final, que pode ser na indústria, no transporte, aquecimento ou geração de energia.

5.4 A produção de H₂V a partir da energia solar no Brasil

Abreu *et al.* (2022) constataram que a matriz renovável brasileira é diversificada, com a possibilidade de chegar em 2031 com 93% da parcela renovável por efeito do crescimento das fontes renováveis, tornando o país mais competitivo.

A energia solar no Brasil tem um potencial quase um cêntuplo maior que a capacidade instalada e a grande parte desse será aplicado na produção de hidrogênio verde para exportação e para o mercado interno. Têm-se, no mínimo, quatro hubs para produção de hidrogênio verde no Brasil e todos eles já firmaram Memorandos de Entendimento com gigantescas organizações internacionais, afirma Fonseca (2022).

Garcia e Carvalho compartilham das ideias de Abreu *et al.* (2022) e Fonseca (2022), quando afirmam que o Brasil possui elevado potencial para produção de H₂V a partir de fontes renováveis, porque detém uma das matrizes mais limpas do globo. Evidenciam ainda que há no país ações e recursos que beneficiam o cenário técnico e regulatório das energias renováveis; também ressaltam que a irradiação solar é bem distribuída na maior parte dos estados e regiões brasileiros, sendo todos eles elegíveis para expandir o aproveitamento da energia solar. A ressalva feita pelos autores, baseada em seus estudos, se refere ao fato de que grande parte dos investimentos feitos na produção do H₂V são para sua exportação, sem garantias de que seja incorporado aos processos brasileiros nem que a fonte seja, verdadeiramente, de renovável e de que não causará danos socioambientais ao local em que está inserida.

Para Moraes (2022), o Brasil se encontra em posição privilegiada por dispor de fontes renováveis em abundância e tem a oportunidade de produzir H₂V, visto que já o inseriu no Plano Nacional de Energia.

Em razão de a matriz energética brasileira possuir expressivas fontes renováveis de energia, há um aumento das expectativas para a produção de H₂V tanto que já existe um projeto de lei (PL 725/2022), referendado como Lei do Hidrogênio, tramitando no Congresso Nacional com o propósito de suprir a lacuna normativa acerca da entidade

responsável pela regulamentação do hidrogênio e dos incentivos para uso do H₂V; também o anúncio em 2021 do projeto-piloto da primeira usina de hidrogênio verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no Ceará, elucida Silva (2022).

Souza (2022) aponta que os principais desafios para a produção de hidrogênio verde no Brasil que são a falta de uma cadeia produtiva estruturada e o alto investimento demandado pela produção, transporte e armazenamento, gerando um alto custo para a cadeia do H₂V no país que impacta com o índice de competitividade de outras fontes energéticas. Essa tese é corroborada por Silva (2021).

Entretanto, em seu estudo, Bitencourt (2023) constatou que, dada a necessidade de cumprir as metas de neutralização de carbono, espera-se que, até 2030, os preços dos eletrolisadores estejam 40% mais baratos, contribuindo para diminuir os custos de produção do H₂V no Brasil.

Bezerra *et al.* (2022) esperam que seus achados possam contribuir para a expansão da economia verde por meio da geração do hidrogênio a partir de uma fonte de energia renovável.

Expuseram-se, assim, os achados nos estudos selecionados acerca da produção, armazenamento e transformação, transporte e, especificadamente, produção de H₂V a partir da energia solar no Brasil do H₂V.

6 DISCUSSÃO

Na perspectiva deste estudo, a integração da fonte de energia solar e hidrogênio verde oferece novos caminhos para alcançar metas globais para a economia de carbono zero, equilibrando a rede elétrica e combatendo a intermitência da energia elétrica por meio do armazenamento de energia. O hidrogênio verde produzido pode ser usado em vários setores ou reconvertido em energia por meio de células de combustível, aumentando a flexibilidade da rede elétrica.

Os benefícios da produção de hidrogênio verde incluem segurança energética, mitigação de gases de efeito estufa, crescimento econômico e competitividade industrial. Além desses aspectos positivos, a matriz energética brasileira é possuidora de significativas fontes renováveis de energia, nomeadamente, da energia solar, de forma que o Brasil pode se posicionar com alta competitividade no mundo para produzir H₂ de baixo carbono.

Dados ao decréscimo, ao longo dos anos, no custo da geração de energia solar e as expectativas no crescimento da oferta - e conseqüentemente, redução do custo - dos eletrolisadores, considera-se que esses podem contribuir para que o fornecimento de hidrogênio tenha baixo custo.

Os desafios envolvem a produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde que são elementos cruciais para impulsionar a transição energética nacional em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis. A produção de H₂V em grande escala necessita de eficiência no processo de eletrólise e de infraestrutura que demandam altos investimentos; a redução dos custos associados é um cenário em que ainda são necessários avanços tecnológicos para tornar o hidrogênio verde economicamente viável.

O armazenamento de hidrogênio verde também é um fator crítico. O hidrogênio é um gás de baixa densidade energética, o que significa que é necessário um espaço significativo para armazená-lo. Além disso, o armazenamento em longo prazo apresenta desafios de vazamentos e perdas. A pesquisa e o desenvolvimento de métodos de armazenamento mais eficientes e seguros são fundamentais para viabilizar o uso generalizado do hidrogênio verde.

Quanto ao transporte, os métodos têm desafios relacionados à segurança, eficiência energética e custos de infraestrutura. O desenvolvimento de tecnologias de transporte mais eficientes e seguras é essencial para garantir uma logística adequada e viável para o hidrogênio verde.

É fato que o hidrogênio limpo está atualmente desfrutando de um impulso político e comercial sem precedentes, com o número de políticas e projetos em todo o mundo se expandindo rapidamente. No entanto, no Brasil, os maiores investimentos têm sido para exportação do H₂V, não havendo políticas que fomentem uma produção interna. Outro obstáculo são as normativas legais que não são específicas para geração e produção de H₂V, mas são para uso do hidrogênio, podendo ser produzido a partir de qualquer fonte. Também é preciso ampliar as tecnologias e reduzir os custos para permitir que o hidrogênio verde seja amplamente produzido a partir da energia solar.

Embora ainda haja desafios a serem superados, o hidrogênio verde oferece uma solução promissora para a descarbonização de setores-chave e para alcançar metas mais ambiciosas de sustentabilidade ambiental. Investimentos contínuos em pesquisa, profissionais capacitados, desenvolvimento tecnológico e infraestrutura são necessários para impulsionar a adoção do hidrogênio verde em escala nacional.

Viabilizar a produção de hidrogênio verde a partir da energia solar requer melhorias tecnológicas na produção, armazenamento, transporte e uso do H₂V. Também demanda a definição de marcos regulatórios específicos para produção e uso, e a adoção de estratégias para investimentos na cadeia produtiva do H₂V. Desse modo, o hidrogênio verde poderá ser, de fato, o substituto das fontes energéticas poluentes no mercado interno e produto para exportação de forma competitiva.

7 CONCLUSÃO

O hidrogênio é ambientalmente limpo quando obtido de fontes de energia renováveis. O uso do sistema híbrido solar-hidrogênio pode maximizar o uso dos recursos energéticos no Brasil, visto que a produção de hidrogênio verde possui vantagens significativas.

Quantos aos objetivos, alcançou-se a análise das publicações que relacionam a produção de hidrogênio verde à energia solar no Brasil, quando se fez a análise bibliométrica, selecionando estudos compreendidos entre 2021 e 2023, em que se constatou serem poucas as publicações acerca do tema, certificando ser uma área ainda incipiente.

Relativo à identificação das vantagens de produção do H₂V acoplado à fonte solar, certificou-se que essa produção compreende a segurança energética, a redução de gases de efeito estufa, o crescimento econômico e a competitividade industrial. Destaca-se que a matriz energética brasileira conta com importantes fontes renováveis de energia, principalmente a energia solar, o que confere ao Brasil potencial para se firmar como um player global altamente competitivo na produção de H₂V.

As limitações na produção do H₂V se referem à requisição de melhorias tecnológicas na produção, armazenamento, transporte e uso; faltam definições de marcos regulatórios específicos para produção e uso; e o alto custo para geração de energia solar.

Atinente aos desafios na cadeia produtiva do hidrogênio verde, apontam-se aprovação de legislação específica para geração e produção de H₂V, ampliação de tecnologias e redução de custos para ampla produção daquele a partir da energia solar.

Ao se buscar descrever a cadeia produtiva do hidrogênio verde, obteve-se êxito, com os achados nos estudos selecionados sobre produção, armazenamento e transformação, transporte e produção de H₂V a partir da energia solar no Brasil.

Isso posto, constatou-se nesta pesquisa que o hidrogênio é uma fonte de energia que pode ser utilizada em uma ampla variedade de setores, incluindo transporte, indústria,

aquecimento e eletricidade; que o hidrogênio verde é uma solução escalável, permitindo o aumento da produção para atender à demanda crescente; e que contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, para a neutralidade de carbono e ajuda a mitigar as mudanças climáticas.

7.1 Contribuições do trabalho

Esta pesquisa forneceu uma análise das publicações que relacionam a produção de hidrogênio verde à energia solar no Brasil; a identificação das vantagens, limitações ou desafios na cadeia de produção do H₂V através de fonte solar e descreveu a cadeia produtiva do hidrogênio verde. Este estudo pode contribuir para o aumento de pesquisas na área, visto que são poucas, e auxiliar pesquisadores e interessados na produção de H₂V a partir de energia solar no Brasil, visto ser um tema essencial na linha de energias renováveis.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Uma vez que os municípios do norte de Minas Gerais possuem alto potencial para geração de energias solar, sugere-se um estudo sobre as vantagens, limitações ou desafios na produção do H₂V a partir de fonte solar nessa região.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Thiago Modesto de; BERNARDES, Luis Guilherme de Freitas; YAMACHITA, Roberto Akira; BORTONI, Edson da Costa. Desafios e oportunidades para o mercado de hidrogênio verde no Brasil: Uma análise SWOT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 13., 2022, Itajubá. **Resumos** [...]. Itajubá: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2022.
- ANDRADE, André Luiz Campos de; MATTEI, Lauro. A (in)sustentabilidade da matriz energética brasileira. **Revista Brasileira de Energia**, [S.l.], v. 19, n. 9, pp. 9-36, 2º sem. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280298682_A_INSUSTENTABILIDADE_DA_MATRIZ_ENERGETICA_BRASILEIRA. Acesso em: 2 jun. 2023.
- ANDRADE, Carla Freitas de; ANDRADE, Camilla Verbiski de; ALEGRE, José Antonio Andrés Velásquez; BEZERRA, Daniel Alves. Um estudo bibliométrico sobre tendências de pesquisa na produção de hidrogênio a partir da fonte solar baseada na Scopus. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, Miami, v. 16, p. 1-16, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA- ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Absolar, 2 jun. 2023. Disponível em <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 10 junho 2023.
- BARBOSA, Ruth; SOUZA, Vitoria. Especialistas brasileiros visitam a Alemanha para intercâmbio sobre a descarbonização da aviação. Power-to-X, 2022. Disponível em: <https://ptx-hub.org/pt-br/especialistas-brasileiros-visitam-a-alemanha-para-intercambio-sobre-a-descarbonizacao-da-aviacao/>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- BERNARDES, Júlio. USP: Empresa do Cietec desenvolve célula a combustível que produz energia a partir do hidrogênio. **Agência de Notícias da USP**, São Paulo, 2 jul. 2003. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/eventos/usp-empresa-do-cietec-desenvolve-celula-a-combustivel-que-produz-energia-a-partir-do-hidrogenio/>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- BEZERRA, Daniel Alves; ANDRADE, Carla Freitas de; ALMEIDA, Ana Fabíola Leite; BUENO, André Valente; Lobo, Fernanda Leite. Análise bibliométrica das publicações relacionadas à produção de hidrogênio e fonte solar fotovoltaica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR-CBENS, 9., 2022, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: Associação Brasileira de Energia Solar, 2022.
- BITENCOURT, Layse de Paula. **Análise bibliométrica e projeto de um sistema de geração de hidrogênio verde**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2023.
- BRASIL. **Decreto nº 7.685, de 1º de março de 2012**. Promulga o Acordo entre o Governo da República Federativa do Brasil e o Governo da República Federal da Alemanha sobre Cooperação no Setor de Energia com foco em Energias

Renováveis e Eficiência Energética, firmado em Brasília, em 14 de maio de 2008. Brasília-DF: Presidência da República, 1º mar. 2012a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7685.htm. Acesso em: 25 abr. 2023.

BRASIL entra no ranking dos dez países com maior produção de energia solar. Jornal da USP, 11 abr. 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=625985>. Acesso em 11 jun. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.424, de 16 de junho de 2011**. Altera a Lei nº 11.977, de 7 de julho de 2009, que dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida - PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas, as Leis nºs 10.188, de 12 de fevereiro de 2001, 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 4.591, de 16 de dezembro de 1964, 8.212, de 24 de julho de 1991, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 - Código Civil; revoga dispositivos da Medida Provisória nº 2.197-43, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília-DF: Presidência da República, 16 jun. 2011a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12424.htm. Acesso em: 9 jun. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília-DF: Presidência da República, 4 ago. 2022c. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 9 jun. 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Portaria n. 325, de 7 de julho de 2011**. Dispõe sobre as diretrizes gerais para aquisição e alienação de imóveis por meio da transferência de recursos ao Fundo de Arrendamento Residencial - FAR, no âmbito do Programa Nacional de Habitação Urbana - PNHU, integrante do Programa Minha Casa, Minha Vida - PMCMV. Brasília-DF: Ministério das Cidades, 7 jun. 2011b. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/176708/>. Acesso em: 9 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). **Estudo Prospectivo em Energia Fotovoltaica**. Brasília: CGEE, 2009. (Nota Técnica). 48p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Expansão na matriz elétrica em 2023 é de 3,3 GW até abril**. Brasília-DF: ANEEL, 8 maio 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/expansao-na-matriz-eletrica-em-2023-e-de-3-3-gw-ate-abril>. Acesso em: 9 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução Normativa n. 920, de 23 de fevereiro de 2021. Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, revoga as Resoluções Normativas nº 395, de 15 de dezembro de 2009; nº 424, de 17 de dezembro de 2010; nº 432, de 5 de abril de 2011 e dá outras

providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 40. p. 59, 02 mar. 2021b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa n. 956, de 7 de dezembro de 2021**. Aprova os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE e revoga a Resolução Normativa nº: 556, de 18 de junho de 2013, o art. 1º da Resolução Normativa nº: 830, de 23 de outubro de 2018, e a Resolução Normativa nº: 892, de 11 de agosto de 2020. Brasília-DF: ANEEL, 7 dez. 2021c. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=424435>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa n. 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Brasília-DF: ANEEL, 3 de janeiro de 2022a. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa n. 1.009, de 22 de março de 2022**. Estabelece as regras atinentes à contratação de energia pelos agentes nos ambientes de contratação regulado e livre. Brasília-DF: ANEEL, 30 de março de 2022b. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=429484>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa n. 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, 1009, de 22 de março de 2022, e dá outras providências. Brasília-DF: ANEEL, 7 fev. 2023d. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf> . Acesso em 10 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 45. p. 2, 09 mar. 2021d.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 147. p. 6, 4 ago. 2022d.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética- EPE. **Balanco Energético Nacional 2021**: Ano base 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética- EPE. **Balanco Energético Nacional 2022**: Ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Fontes de Energia**. Brasília-DF: EPE, 2023c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#ENERGIA-SOLAR>. Acesso em: 4 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Brasília-DF: EPE, 2023a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ENERGETICA>. Acesso em: 2 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: MME/EPE, 2021b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 9 jun. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **PNH₂** - Programa Nacional de Hidrogênio. Proposta de Diretrizes. Brasília-DF: MME, julho de 2021e. 23 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Brasília-DF: MME, 2018. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 25 abr. 2023.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Brasília-DF: IPEA, 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>. Acesso em: 2 jun. 2023.

CARDOSO, Diego Silva; LOCATELLI, Pedro Sartori; RAMALHO, Wanderley; ASGARY, Nader. Distributed Generation of Photovoltaic Solar Energy: Impacts of Aneel's New Regulation Proposal on Investment Attractiveness. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 423–442, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1983465961993>. Acesso em: 2 jun. 2023.

CARVALHO, Sandra. Energia solar é esperança no Norte de MG. **Diário do Comércio**, Belo Horizonte, 11 fev. 2022. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/juntosporminas/energia-solar-e-esperanca-no-norte-de-mg/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE MINAS GERAIS – CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CEMIG, 2012. 80 p.

CERQUEIRA, Pedro. **Célula-combustível**: porque o hidrogênio é tido como o combustível do futuro. Portal Vrum, Belo Horizonte, 24 jun. 2022. Disponível em:

<https://www.vrum.com.br/noticias/celula-combustivel-porque-o-hidrogenio-e-tido-como-o-combustivel-do-futuro/>. Acesso em 12 jun. 2022.

CHIAPPINI, Gabriel. **BNDES lança programa para financiar projetos pilotos de hidrogênio verde**. Agência epbr, [online], 1º jul. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/bndes-lanca-programa-para-financiar-projetos-pilotos-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

FONSECA, João José Saraiva da. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará - UEC, 2002. Apostila.

FONSECA, Roberto Giannetti da. A era do hidrogênio verde no século XXI. **Inovação & Desenvolvimento: A Revista da FACEPE**, Recife, v. 1, n. 8, p. 40-45, 2022.

GARCIA, José Victor; CARVALHO, Julia. **Hidrogênio verde**: estudo de caso do Brasil. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Bioprocessos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. 3. reimp. São Paulo: Atlas, 2019.

GOMES, Wilma; DUQUE, Milene. **Governo de Minas incentiva produção de energia por meio de fontes renováveis**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad), 10 jul. 2019. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/3878-governo-de-minas-incentiva-producao-de-energia-por-meio-de-fontes-renovaveis>. Acesso em: 10 jun. 2023.

GURLIT, Wieland; GUILLAUMON, João; AUDE, Marcelo; CEOTTO, Henrique. **Hidrogênio verde**: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. McKinsey & Company, [online], 25 nov. 2021. Disponível em: https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo#/. Acesso em: 11 jun. 2023.

HEIN, Henrique. Brasil acrescentou mais de 9 GW de potência de energia solar em 2022. **Revista Canal Solar** [online], 2 jan. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/brasil-acrescentou-mais-de-9-gw-de-potencia-de-energia-solar-em-2022/>. Acesso em: 5 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY -IEA. **The Future of Hydrogen**. IEA, jun. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 15 jun. 2023.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Science 2030**. 2022. Disponível em: <https://climatescience2030.com/pt-pt/>. Acesso em: 2 jun. 2023.

KRSTIĆ–FURUNDŽIĆ, Aleksandra; SCOGNAMIGLIO, Alessandra; DEVETAKOVIC, Mirjana; FRONTINI, Francesco; SUDIMAC, Budimir. Trends in the integration of photovoltaic facilities into the built environment. **Open House International**, Philadelphia, v. 45, n. 1, p. 195-207, 2020. ISSN 0168-2601. DOI: <https://doi.org/10.1108/OHI-04-2020-0015>.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LIRA, Cauê. **Teste rápido**: Toyota Mirai é elétrico movido a hidrogênio, mas é quase impossível de abastecer. AutoEsporte, Globo, [online], 13 ago. 2022. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/testes/noticia/2022/08/teste-rapido-toyota-mirai-e-eletrico-movido-a-hidrogenio-mas-e-quase-impossivel-de-abastecer.ghtml>. Acesso em: 12 jun. 2022.

MACHADO, Nayara. **Combustível do Futuro fecha proposta para a aviação**. Agência epbr, [online], 12 abr. 2022b. Disponível em: <https://epbr.com.br/combustivel-do-futuro-fecha-proposta-para-a-aviacao/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

MACHADO, Nayara. **Quem serão os primeiros consumidores de hidrogênio verde no Brasil?** Agência epbr, [online], 6 out. 2022a. Disponível em: <https://epbr.com.br/quem-serao-os-primeiros-consumidores-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

MARQUES, Ricardo. **Entendendo a Tarifação do Fio B previsto na Lei 14.300**. Revista Canal Solar [online], 18 jan. 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/tarifacao-do-fio-b-previsto-na-lei-14-300/>. Acesso em 10 jun. 2023.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). **Pesquisa social**: teoria, método e criatividade. 25. ed. rev. atual. Petrópolis: Vozes, 2007. 108p.

MORAES, Luanna Lima de. **O cenário do hidrogênio verde**: uma revisão como suporte ao recente interesse surgido em indústrias e governos na região. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, 2022.

MOREIRA, Susana. **O que é Habitação de Interesse Social?** ArchDaily Brasil [online], 10 out. 2020. ISSN 0719-8906. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/925932/o-que-e-habitacao-de-interesse-social>. Acesso em: 9 jun. 2023.

MOREIRA JÚNIOR, Orlando; SOUZA, Celso Correia de. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha. **Interações**, Campo Grande, v. 21, n. 2, p. 379–387, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/t7NryC6KdCmwL4RXL4pjVfN/?lang=pt#>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia solar no Brasil**: situação e perspectivas. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017. (Estudo técnico). Disponível em: <http://bd.camara.leg.br/bd/handle/bdcamara/32259> Acesso em: 25 abr. 2023.

NO SETOR aéreo, hidrogênio verde é aposta para zerar emissões. Portal Hidrogênio Verde, 2021. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/no-setor-aereo-hidrogenio-verde-e-aposta-para-zerar-emissoes/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; CARDOSO, Rafael Balbino. Perspectivas da Matriz Energética mundial e no Brasil. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 2; ed. 22, p. 32-46, 2007.

PAIVA, Suelya da Silva Mendonça de. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

RESENDE, Ronan. **Unicamp constrói primeiro baja movido a hidrogênio do mundo**. Portal Vrum, Belo Horizonte, 22 ago. 2022. Disponível em: <https://www.vrum.com.br/acceleradas/unicamp-baja-movido-hidrogenio/>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ROSA, Antonio Robson Oliveira da; GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 140- 147, 2016.

SAUAIA, Rodrigo Lopes. **PV in Brazil: market status, opportunities and challenges**. São Paulo: InterSolar South America, 2016.

SILVA, Débora Cristina Ferreira da. **Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização: uma breve revisão bibliográfica**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em MBE Energia) – Instituto de Energia da PUC, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUCRIO, 2021.

SILVA, Sérgio Batista; SEVERINO, Mauro; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. **Renewable Energy** [S, l.], v. 57, p. 384–389, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2013.02.004.

SILVA, Thamyres de Andrade. **O hidrogênio na geração distribuída: desafios e possibilidades**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Unidade Acadêmica de Processos Industriais, Instituto Federal de Educação da Paraíba, João Pessoa, 2022.

SOUZA, Natália Paula de. **O hidrogênio verde para geração de energia elétrica no Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

TEIXEIRA JR, Sérgio. **Hidrogênio verde: um guia para entender o combustível do futuro**. Reset [*online*], 9 ago. 2022. Disponível em: https://www.capitalreset.com/guias/hidrogenio-verde/?utm_campaign=090822_-_guia_h2__coluna_gustavo_pimentel&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em: 10 jun. 2023.

WEINSTEIN, Lee A.; LOOMIS, James; BHATIA, Brikam; BIERMAN, David M.; WANG, Evelyn N.; CHEN, Gangue. Concentrating Solar Power. **Chemical Reviews**, Washington, DC, v. 115, n. 23, pág. 12797–12838, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00397>.

WHA INTERNATIONAL. **Hydrogen Industry Applications: Past, Present, and Future**. WHA, 2021. Disponível em: <https://wha-international.com/hydrogen-inindustry>. Acesso em: 15 jun. 2023.