



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO
CURSO DE ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS**

LUCAS MANUEL GOMES DOS SANTOS

**HIDROGÊNIO VERDE:
REVOLUCIONANDO O FUTURO DA ENERGIA LIMPA**

**SUMÉ - PB
2024**

LUCAS MANUEL GOMES DOS SANTOS

**HIDROGÊNIO VERDE:
REVOLUCIONANDO O FUTURO DA ENERGIA LIMPA**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Biossistemas do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biossistemas.

Orientadora: Professora Dra. Débora Rafaelly Soares Silva.

**SUMÉ - PB
2024**



S237h Santos, Lucas Manuel Gomes dos.
Hidrogênio verde: revolucionando o future da energia limpa. / Lucas Manuel Gomes dos Santos. - 2024.

35 f.

Orientadora: Professora Dra. Débora Rafaelly Soares Silva.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biosistemas.

1. Hidrogênio verde. 2. Energia limpa. 3. Matriz energética. 4. Energia renovável. I. Silva, Débora Rafaelly Soares. II. Título.

CDU: 620.92(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

LUCAS MANUEL GOMES DOS SANTOS

**HIDROGÊNIO VERDE:
REVOLUCIONANDO O FUTURO DA ENERGIA LIMPA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biosistemas do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biosistemas.

BANCA EXAMINADORA:

**Professora Dra. Débora Rafaelly Soares Silva.
Orientadora – UATEC/CDSA/UFCG**

**Professora Dra. Josedite Saraiva de Souza.
Examinadora I – UFCG**

**Professora Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias.
Examinador II – UATEC/CDSA/UFCG**

Trabalho aprovado em: 10 de setembro de 2024.

SUMÉ - PB

AGRADECIMENTOS

Agradecer, em especial, a minha mãe e ao meu padrasto, Joelma e Eric, por me ajudarem sempre que possível, durante minha formação e na vida cotidiana.

Agradecer também a toda a minha família.

Agradecer a meus amigos, de graduação, de sala de aula, da vida, pela companhia, pelos bons momentos e pelas boas resenhas.

Agradecer a minhas duas cadelas, Kiara e Frida, que são uma alegria inestimável na minha vida.

Agradecer a toda comunidade científica e aos professores do CDSA, principalmente a Paulo Medeiros, Fabiana Pimentel, Ilza Brasileiro, Débora Rafaelly, Adriana Vital, Joelma Sales, e Edvaldo Eloy pelos momentos durante a graduação que em eu jamais me esquecerei.

E finalmente, agradecer a mim mesmo, que durante a pandemia do COVID-19, considerei seriamente desistir do curso mediante a dificuldade das circunstâncias, mas que devido a esforços que eu nem sabia que poderia fazer, quanto mais ter sucesso, estou aqui escrevendo isto.

*“Mas não, permaneço vivo,
prossigo a mística.
Vinte e sete anos con-
trariando a estatística.”*
Racionais MC's

RESUMO

Devido as mudanças na geopolítica internacional, diversos países têm buscado alternativas para as suas matrizes energéticas, recorrendo frequentemente a opções mais limpas e renováveis. Uma alternativa promissora é a utilização do hidrogênio verde (H2V) em substituição aos combustíveis fósseis e derivados do petróleo, pois possibilita a redução da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o hidrogênio verde é altamente versátil em suas aplicações, podendo ser utilizado em diversos setores, tais como: comércio, indústria e mobilidade, sendo denominado “combustível do futuro”. O consumo de hidrogênio tem se intensificado em países como China e Estados Unidos, sendo os dois países com a maior demanda energética do globo. Países com uma ampla gama de recursos naturais e fácil acesso a energias alternativas limpas tem considerado aumentar sua produção de hidrogênio, a exemplo do Brasil, cuja vasta extensão territorial e condições climáticas, contribuem para que o país se consolide como grande produtor de H2V. Desafios industriais, logísticos, técnicos e de gerenciamento ainda são os principais problemas a serem superados para consolidar esse recurso como uma das principais fontes de energias no mundo, visto que a transição energética por recursos menos poluentes e renováveis requer um nível de investimento elevado que pode desmotivar potenciais interessados. Nesse contexto, o estudo consistiu na realização de uma revisão sobre o hidrogênio verde considerado uma alternativa para a transição energética mundial, enfatizando a necessidade de investimentos em tecnologias e infraestrutura, assim como, a sua importância na mitigação dos impactos das mudanças climáticas e no fortalecimento das relações da geopolítica moderna.

Palavras-chave: H2V; matriz energética; energia renovável.

SANTOS, Lucas Manuel Gomes dos. **Green Hydrogen: Revolutionizing the Future of Clean Energy.** 2024. 31 f. Monografia (Curso de Engenharia de Biossistemas) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido. 2024.

ABSTRACT

Due to changes in international geopolitics, several countries have sought alternatives for their energy matrices, often resorting to cleaner and renewable options. One promising alternative is the use of green hydrogen (H₂V) to replace fossil fuels and petroleum derivatives, as it enables the reduction of greenhouse gas emissions. Furthermore, green hydrogen is highly versatile in its applications and can be used in several sectors, such as commerce, industry and mobility, and is called the “fuel of the future”. Hydrogen consumption has intensified in countries such as China and the United States, which are the two countries with the highest energy demand in the world. Countries with a wide range of natural resources and easy access to clean alternative energy sources have considered increasing their hydrogen production, such as Brazil, whose vast territorial extension and climatic conditions contribute to the country's consolidation as a major producer of H₂V. Industrial, logistical, technical and management challenges are still the main problems to be overcome in order to consolidate this resource as one of the main sources of energy in the world, since the energy transition to less polluting and renewable resources requires a high level of investment that can discourage potential interested parties. In this context, the study consisted of carrying out a bibliographic review on green hydrogen, considered a promising alternative in the global energy transition, emphasizing the need for investments in technologies and infrastructure, as well as its importance in reducing climate change and strengthening relations in modern geopolitics.

Keywords: H₂V; energy matrix; renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Diferentes processos para produção de hidrogênio.....	15
Figura 2 -	Representação esquemática da produção de hidrogênio por eletrólise.....	16
Figura 3 -	Processo de produção de energia através da biomassa.....	17
Figura 4 -	Processo de produção de hidrogênio usando biomassa.....	18
Figura 5 -	Número de patentes registradas relacionadas a produção de hidrogênio verde.....	20
Figura 6 -	Expectativa da demanda de hidrogênio no mercado interno do Japão.....	21
Figura 7 -	Classificações de regiões da Austrália de percentis (0% pior, 100% melhor) para produção de hidrogênio a partir de recursos renováveis: a) Energia solar fotovoltaica e b) Energia eólica.....	22
Figura 8 -	Produção de energia da Hidrelétrica de Itaipú nos últimos 8 anos.	23
Figura 9 -	Gráfico comparando consumo de energias renováveis Brasil x Mundo.....	24
Figura 10 -	Oferta interna de energia no Brasil em comparação com o resto do mundo em 2023.....	25
Figura 11 -	Percentual de produção de energias renováveis no país em 2023.	25
Figura 12 -	Expectativa no valor do Kg de H ₂ verde até 2050.....	27
Figura 13 -	Membrana interna de um eletrolizador com marcas alaranjadas de ferrugem.....	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVO.....	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	HIDROGÊNIO VERDE.....	13
2.2	PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE.....	14
2.2.1	Eletrólise da água.....	15
2.2.2	Reforma da biomassa.....	16
2.3	HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PRODUTORES.....	18
2.4	HIDROGÊNIO: CENÁRIO NO BRASIL.....	23
2.5	PRINCIPAIS DESAFIOS NA PRODUÇÃO E USO DO HIDROGÊNIO VERDE.....	27
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um elemento de influência nas relações geopolíticas contemporâneas, desde quando se tornou a matriz energética mundial desempenha papel fundamental a partir da era industrial e é um dos componentes principais para o funcionamento da economia moderna.

Porém, no contexto geopolítico moderno já ocorre uma reavaliação na dependência do petróleo por ser um recurso escasso. Os efeitos da sua escassez já são sentidos com uma forte crescente de investimentos em recursos energéticos renováveis como as bioenergias, energias nucleares e hidrogênio, por exemplo. Estas mudanças aquecem a competitividade no setor energético e todas as grandes empresas mundiais querem sair na frente no que é um recurso fundamental para todo o globo.

Segundo o relatório do IEA (International Energy Agency, 2024), os gastos globais em tecnologias de energias limpas progredem para atingir US\$ 2 trilhões, mesmo com custos de financiamento mais altos, o que dificulta países emergentes ou em desenvolvimento a executarem novos projetos.

Em seu relatório, o IEA pontua que o valor investido é o dobro do valor em combustíveis fósseis no mesmo período, o que auxilia a melhorar cadeia de suprimentos e a diminuir o custo de produção de energias limpas em todo o globo, mesmo com a economia do mundo enfrentando recessões.

Ainda sobre o seu relatório anual, o IEA pontua uma problemática: apesar decrescente, o desequilíbrio e déficit em investimentos nos países emergentes. Somando os países do BRICS, principalmente China, Índia e Brasil, os investimentos chegam a US\$300 bilhões pela primeira vez, mas este valor representa apenas 15% do investimento global em energias limpas. O valor está muito abaixo do que é necessário para atender a crescente demanda destes países, onde o alto custo inicial no setor é o principal impedimento.

As principais energias renováveis são: energia solar fotovoltaica concentrada e em escala unitária, eólica, bioenergias e hidroenergias. Mas, na última década, uma nova fonte de energia renovável vem ganhando espaço e investimento a nível mundial: o hidrogênio verde.

Historicamente, o hidrogênio não é uma energia nova, mas apenas recentemente se tornou uma energia limpa. No século passado, o hidrogênio era produzido

usando combustíveis fósseis como força motriz para sua produção, logo, era classificado como “uma produção de pouca emissão de CO₂” (IEA, 2024). Com o crescente investimento em outras energias limpas, a energia motriz para produção de hidrogênio foi convertida, principalmente, em energia solar, uma fonte abundante, sustentável e sem a emissão de gases de efeito estufa. Com esta mudança, o hidrogênio ganhou espaço e investimento, principalmente na China, cujo a demanda energética é alta e, tem se intensificado as exigências para transição energética no país (Borges, 2022).

Para produção de hidrogênio são necessários poucos produtos, apenas água e algum sal mineral para conduzir a eletricidade, esta solução eletrolítica é mais comumente usada em um aparelho chamado eletrolizador, que consiste em eletrodos imersos na solução eletrolítica que é mantida saturada com gás de hidrogênio com a passagem contínua de eletricidade e a alta pressão interna. Para garantir que a meia-reação $2H^+ + 2e = H_2 (g)$ aconteça rapidamente e de forma reversível, o eletrodo deve ter algum tipo de cobertura material para acelerar o processo catalítico (Holler, 1988).

Apesar de utilizar poucos componentes e ser um processo mais simples do que a produção e outras energias, o hidrogênio possui algumas dificuldades para se consolidar no mercado, a primeira é o preço de se produzir hidrogênio verde, que ainda é alto. Outro problema é o seu armazenamento, visto que para o hidrogênio se tornar líquido, teria que atingir uma temperatura de -253°C, e no estado gasoso tem uma densidade muito baixa (0,089kg/m³) podendo facilmente vazar de reservatórios (Borges, 2022).

Outro problema é que a produção de hidrogênio tem demandas muito específicas nas suas plantas de produção: alta velocidade do fluido eletrolítico ($\geq 3m/s$), alta pressão (≥ 24 bar), intensa corrosão causada pelo fluido eletrolítico nos dutos e a baixa familiaridade dos técnicos que lidarão com o produto (CPG, 2022).

Todas estas questões citadas são alguns dos fatores que impedem o hidrogênio de progredir em uma escala maior na matriz energética global, saber como se sobressair nessa nova premissa se tornou uma obsessão de economias emergentes para ter uma vantagem nageopolítica das próximas décadas. Neste trabalho, discutiremos alguns pontos sobre o assunto e apontaremos um direcionamento para os próximos anos a respeito dessa nova fonte de energia emergente.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão de literatura sobre o hidrogênio verde considerado uma alternativa promissora para a transição energética mundial, enfatizando a necessidade de investimentos em tecnologias e infraestrutura, assim como, a sua importância na mitigação dos impactos das mudanças climáticas e no fortalecimento das relações da geopolítica moderna.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar o conceito de hidrogênio verde;
- Integrar tecnologias e conceitos nos processos de produção de hidrogênio verde;
- Apresentar o cenário atual do hidrogênio verde no Brasil;
- Analisar o crescente mercado produtivo de hidrogênio verde;
- Identificar os principais desafios na produção/geração do hidrogênio verde.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, representando 90% da massa de toda matéria. É um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável sob condições a nível do mar. Presente majoritariamente na terra em sua forma molecular (na água, em hidrocarbonetos, etc), é caracterizado por possuir a maior quantidade energética por unidade de massa (142 MJ/kg) se comparado com combustíveis fósseis (quase três vezes mais que o gás natural) (Soares, 2019).

O hidrogênio pode ser extraído de suas fontes naturais de diversas formas, sejam elas hidrocarbonetos ou não, através de métodos fotônicos, elétricos, químicos, bioenergéticos, a base de calor ou uma combinação destes métodos (El-Emam; Özcam, 2019).

O hidrogênio é sempre um gás incolor, mas dependendo de sua origem, sua titulação passa a receber o nome de uma cor, ou seja, quando o mesmo é utilizado para transporte de energia, pode ser distinguido entre hidrogênio cinza, azul, marrom (ou preto), turquesa e verde. Dentre todos estes, apenas o verde é livre de CO₂, sendo produzido com ajuda de energias renováveis, se tornando verdadeiramente uma energia limpa e sustentável (Osman, 2021).

O hidrogênio verde é aquele produzido a partir de energias renováveis, como por exemplo, através da energia solar e eólica, sem produção de CO₂. Cientistas e especialistas do setor energético estão convencidos de que o hidrogênio verde, produzido de forma neutra para o clima, possa levar a contribuições decisivas para a redução de CO₂ em diversos setores da indústria mundial (Lara; Richter, 2023).

O Quadro 1 abaixo, exemplifica diferentes rotas de produção e suas respectivas eficiências na produção de hidrogênio:

Quadro 1 - Diferentes formas de produção do gás de hidrogênio.

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

Fonte: NAEA, 2023.

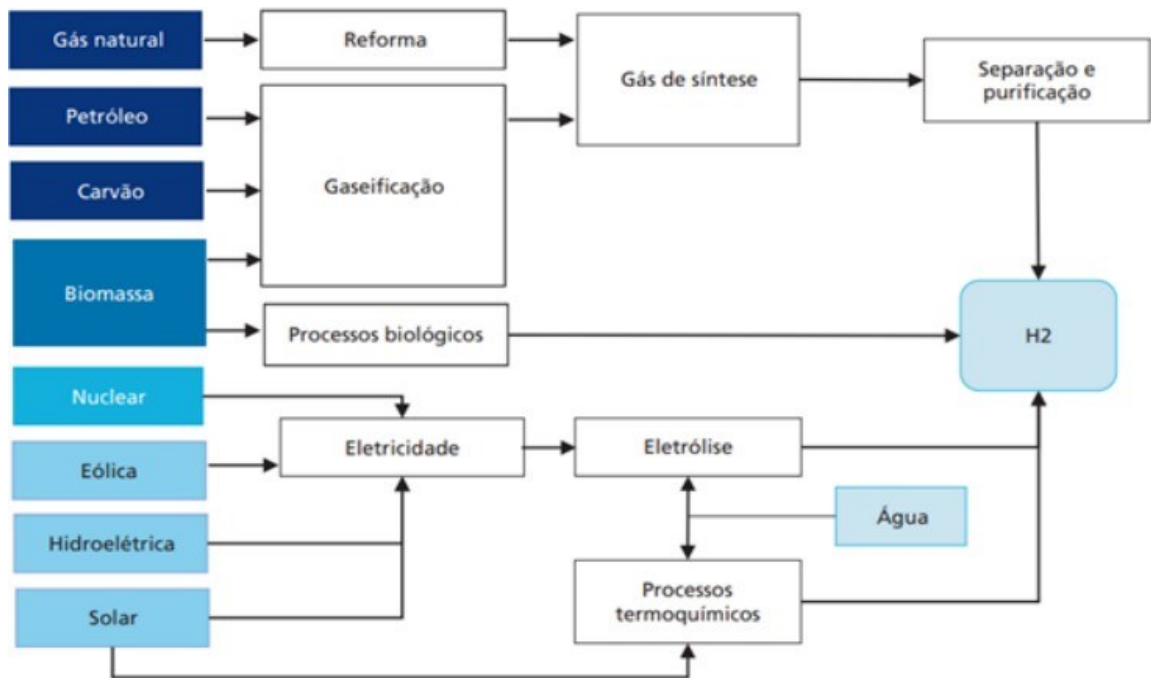
Nos dias atuais, cerca de 120 milhões de toneladas de hidrogênio proveniente de combustíveis fósseis são geradas e consumidas, cerca de 96% de todo o hidrogênio produzido mundialmente. Apesar de bastante atrativo, o hidrogênio verde ainda é mais caro do que o produzido através de carvão e gás natural (Paiva, 2022).

Segundo o IRENA (2020): “nas próximas décadas é esperado uma queda no custo do hidrogênio verde, associado a produção de equipamentos (eletrolisadores) acessíveis e energias renováveis cada vez mais baratas. Neste cenário, é alcançado uma maior competitividade do hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis.”

2.1 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

A produção de hidrogênio verde pode ocorrer por duas fontes principais: biomassa usada em processos como gaseificação, pirólise, liquefação, hidrólise, etc; pela eletrólise da água, pela reforma do gás natural, entre outros processos que podem ser visto na Figura 1:

Figura 1 - Diferentes processos para produção de hidrogênio.



Fonte: Costa *et al* (2024).

2.1.1 Eletrólise da água

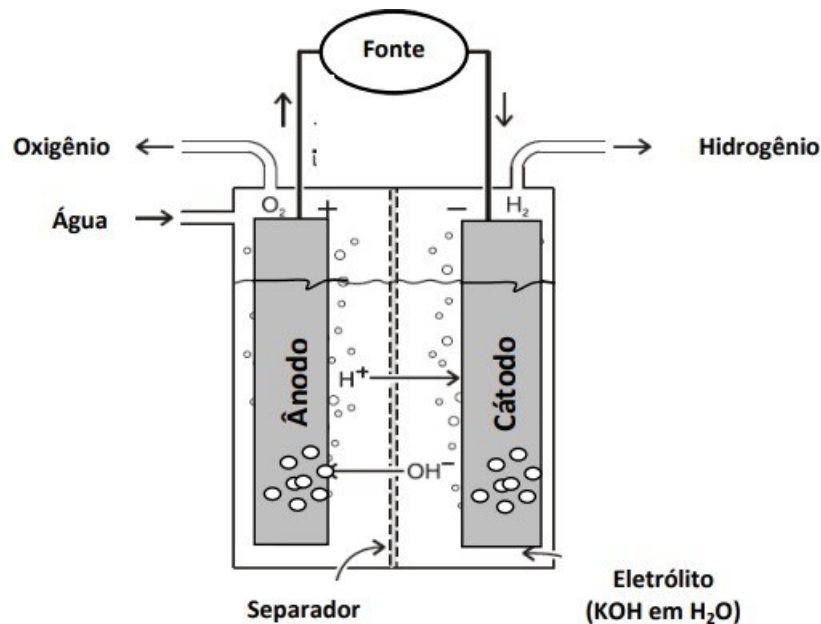
A eletrólise da água é a forma mais popular de se produzir hidrogênio hoje em dia e é amplamente adotada pela indústria. Consiste num processo eletroquímico de quebra da molécula de água em seus dois componentes, hidrogênio e oxigênio, ocasionado por uma corrente elétrica que passa na pela água. Existe um equipamento idealizado apenas para otimizar este processo, chamado eletrolisador, onde são distribuídos eletrodos (cátodos e ânodos), e para catalizar a reação, pode ser adicionado algum tipo de sal (NaCl, KOH, entre outros) na água para agir como condutor iônico (Costa, 2009).

Este conjunto de água e sal é chamado de fluido eletrolítico e, em conjunto com os eletrodos, são chamados de “células”. Um eletrolisador é formado por várias células e, a medida que são emitidas as cargas elétricas, se acumula o hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo em forma de bolhas que sobem a superfície do líquido e podem ser coletadas. Para evitar que os gases se misturem novamente e formem água, é adicionado uma membrana entre os polos elétricos (Sousa, 2013).

A Figura 2 representa um sistema relativamente simples que precisa apenas da fonte de energia, que se for renovável, já passa a ser considerada uma produção de

hidrogênio verde. Outra vantagem é a sua eficiência: se comparado a energia utilizada *versus* o valor energético produzido em hidrogênio, a eficiência flutua entre 80 a 94% (Kruse, 2002), sendo influenciada apenas pela pureza e porcentagem de massa seca de hidrogênio.

Figura 2 - Representação esquemática da produção de hidrogênio por eletrólise.



Fonte: Sousa(2013).

2.1.2 Reforma da biomassa

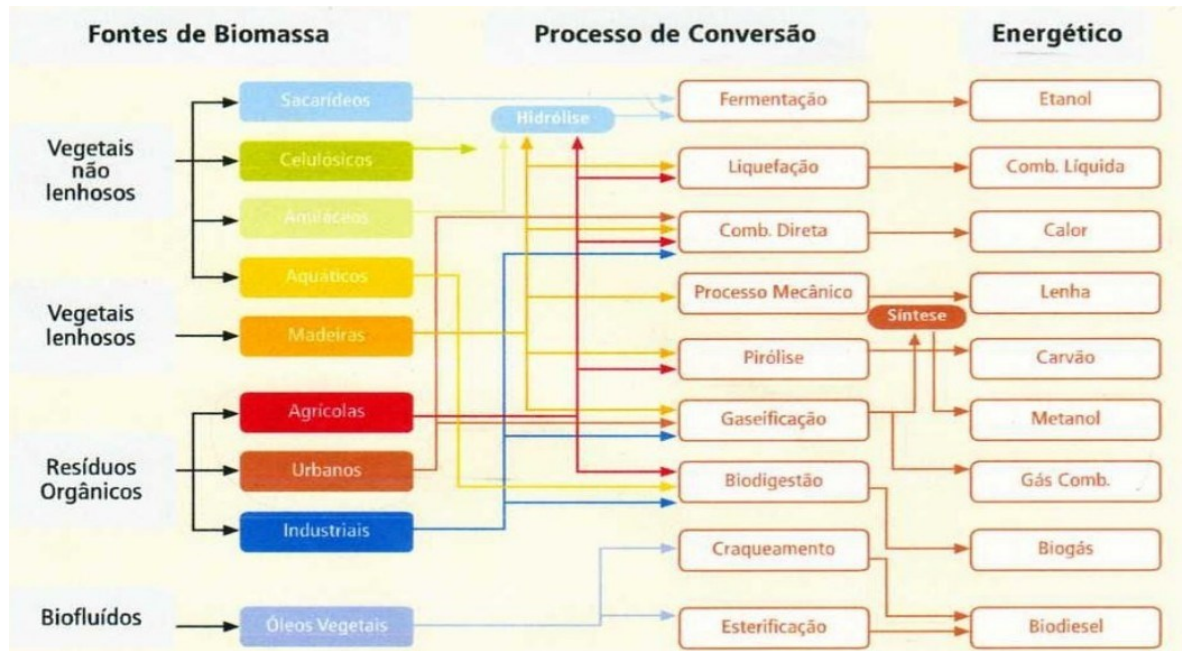
Por definição da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020), biomassa “é a massa utilizada para produção de energia, a partir da decomposição de organismos vivos, que pode ser de origem vegetal ou animal, como resto de alimentos, madeira, entre outros”.

A biomassa pode ser uma fonte de energia direta usada na queima de caldeiras ou fornos o que já a torna neutra em relação a gás carbônico, já que as plantas o absorvem do ar, mas através de alguns processos, pode se tornar uma fonte produtora de hidrogênio verde e influenciar fortemente a matriz energética mundial, já que, apenas 5% de toda biomassa disponível para produção de energia é aproveitada.

No Brasil, é de extrema importância pois as fontes de biomassa mais populares se encontram em abundância no país mas muito pouco é aproveitado, um exemplo é a cana-de-açúcar, que pode produzir bioetanol e o bagaço pode ser usado como biomassa para produção de hidrogênio verde. Na Figura 3 é possível visualizar os

diferentes tipos de matéria-prima e processos adotados para produção de energia.

Figura 3 - Processo de produção de energia através da biomassa.



Fonte: Fukurozaki (2011).

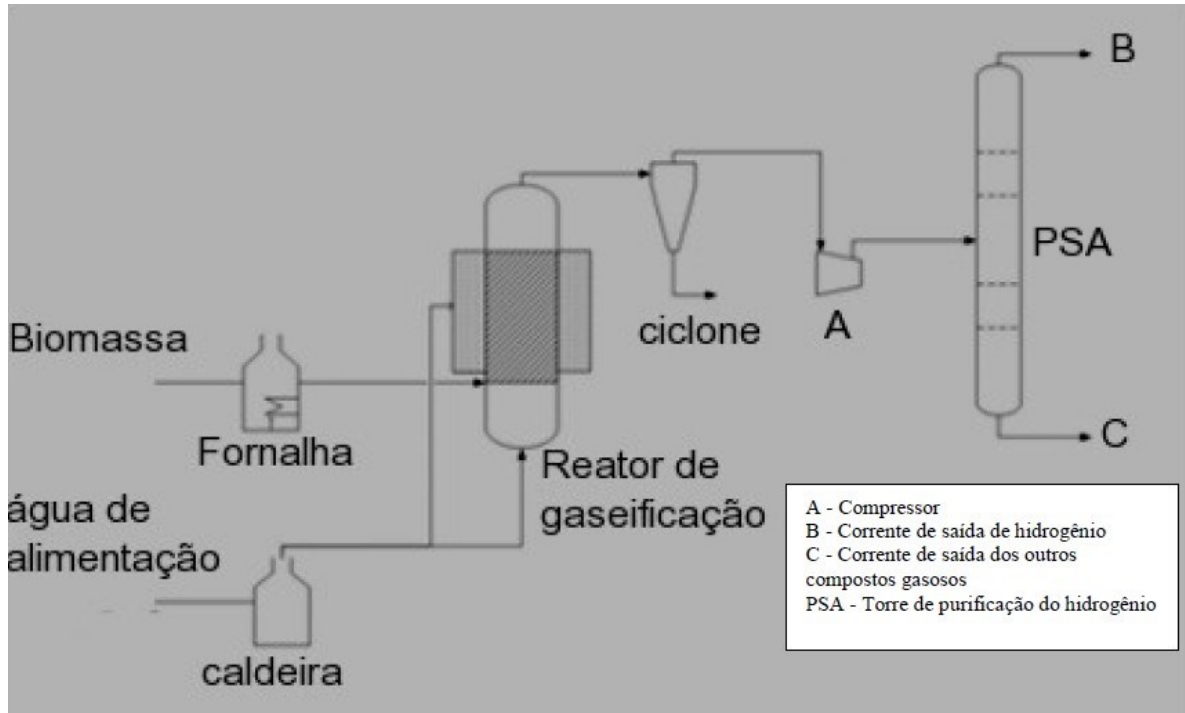
Um dos principais processos de produção do hidrogênio a base de biomassa é a gaseificação a vapor, conforme descrito na Figura 4, que consiste na adição de biomassa, óxido de cálcio e vapor no interior de um reator.

A biomassa é inserida numa fornalha a baixas temperaturas e com baixo teor de oxigênio, para ter uma queima parcial e facilitar sua decomposição. Estes restos são inseridos num reator onde também entram o vapor de água e o óxido de cálcio. Dentro do reator ocorre a produção de diversos gases e cinzas, a função principal do óxido de cálcio nesta etapa é se agregar ao gás carbônico e facilitar sua separação na etapa posterior que é a separação no ciclone (Godoy e Vieira, 2015).

Com a passagem deste produto no ciclone, é separado a parte sólida da parte gasosa, sendo a segunda parte enviada a um compressor ligado a uma torre de purificação. Na torre de purificação, existem filtros em seu interior e duas saídas, uma superior e uma inferior. Na saída inferior saem a maioria dos gases e subprodutos, um deles sendo o carbonato de cálcio formado no reator e, na saída superior, sai hidrogênio já que é um gás muito mais leve que os outros produtos formados no processo

(Godoy e Vieira, 2015).

Figura 4 - Processo de produção de hidrogênio usando biomassa.



Fonte: Yunus (2010).

O uso de biomassas ainda é limitado por ser um recurso sub-utilizado pelos países com a maior produção, tendo ainda muita tecnologia a ser desenvolvida no setor, mas já é apontado como um substituto do carvão e um potencial substituto do petróleo quando este recurso começar a atingir níveis de escassez mais altos.

2.2 HIDROGÊNIO VERDE: PRINCIPAIS PRODUTORES

Como a produção de hidrogênio verde parte do uso de outras fontes renováveis de energia, é natural que países com grande disponibilidade desses recursos tenham mais interesse nessa nova cadeia produtiva, porém, mesmo países com menos recursos investem em mais tecnologias para se tornarem competitivos nesse nova geopolítica internacional. Estes investimentos em tecnologias podem ser visualizados pela quantidade de patentes depositadas, como mostra a Figura 5.

A China é o país que mais investe em produção de hidrogênio, hidrogênio este que ainda é majoritariamente de fontes poluentes pois a demanda energética do país

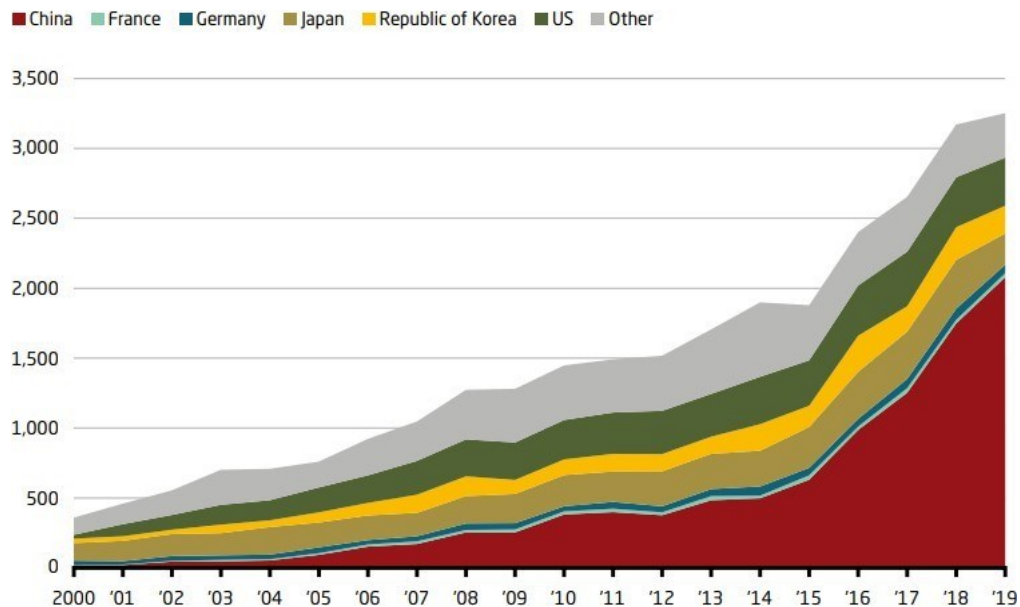
é muito elevada, mas em extensão territorial e capacidade produtiva de hidrogênio verde, a China já os reconhece e tem transicionado seus esforços para uma produção mais limpa (Matos & Bitencourt, 2023).

A China encara a produção de hidrogênio verde como a “próxima fronteira tecnológica”, e mira alto: em se tornar a referência em produção de hidrogênio verde em todo o mundo. A diferença entre China e Europa em relação a tecnologia de hidrogênio verde diminui rapidamente: a China já é responsável por 1/3 da produção de todos os eletrolizadores do mundo, as políticas regionais e das empresas do setor já estão com uma agenda muito a frente do planejamento nacional para a transição energética, apesar de Estados Unidos, Japão e Europa terem uma pesquisa e desenvolvimento mais a frente que a China, é apontado que este “gap” será fechado em menos de cinco anos, entre diversas outras ações que são tomadas para atingir a meta estabelecida internamente no país (MERICS, 2022).

Uma forma de avaliar isto é analisar as novas estratégias de mercado de diversas gigantes do setor energético da China, como por exemplo:

- SINOPEC (China Petroleum & Chemical Corporation): é a maior produtora de hidrogênio na China, produzindo mais de 3,5 milhões de toneladas/ano, correspondente a 14% da produção do país. A empresa já começou a investir capital no setor de produção de hidrogênio verde desde 2020 e a planta de produção de hidrogênio renovável em Xinjiang fornecerá hidrogênio ecologicamente correto para a produção de produtos químicos, ajudando assim a descarbonizar as fábricas químicas em Xinjiang (KAS, 2022).
- LONGi Green Energy Technology: uma das maiores fabricantes de painéis solares da China, já migra suas pesquisas para o setor de produção de hidrogênio verde aproveitando a experiência no mercado de energias renováveis (Chen *et al*, 2019).

Figura 5 - Número de patentes registradas relacionadas a produção de hidrogênio verde.



Fonte: Brown & Grünberg (2022).

Na União Europeia, se destacam os investimentos mas principalmente sua agenda, onde ano após ano, são estabelecidas novas metas de “Carbono Zero” e recordes de investimento em energias limpas, caso da BMW que, em sua sede em Munique, não produz mais motores a combustão interna desde Novembro de 2023, focando apenas em motores elétricos ou de outras fontes renováveis (Revista Quatro Rodas, 2024).

Tudo isso para cumprir metas estabelecidas pelo Acordo de Paris em 2015, onde dois países europeus (Grã-Bretanha e França) tem cargos permanentes como conselheiros da ONU e o atual Secretário-Geral é português (António Guterres). Todo este empenho público mostra como a UE está comprometida em atingir a neutralidade nas emissões até os prazos estabelecidos para 2030 (Oliveira, 2021).

Como falado anteriormente, a BMW é uma das montadoras que se comprometeu a produzir apenas veículos civis elétricos até 2027, restando apenas sua frota de veículos de serviço (caminhões, ônibus, vans, etc) utilizando combustíveis fósseis, mas de forma reduzida (BMW Group, 2024). Isto é possível devido a uma parceria firmada entre a alemã e uma montadora japonesa que é referência mundial quando o assunto é veículos movidos a hidrogênio: a Toyota.

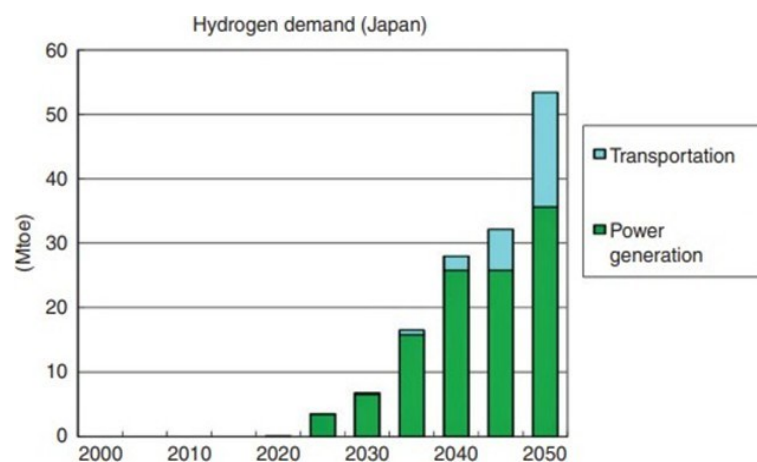
O resultado dessa parceria é o BMW iX5, um SUV movido a hidrogênio que utiliza a tecnologia do Toyota Mirai, um sedã a hidrogênio que foi cobaia de testes da japonesa em diversos lugares. Os dois veículos se comportam como um veículo elétrico mas tem uma dirigibilidade mais semelhante a veículos de combustão comuns: o eletrolisador fica no cofre do motor, aproveitando o espaço onde tradicionalmente haveria um motor de combustão interna (CPG, 2022).

Isso mostra que, apesar de ser uma tecnologia de ponta, a medida que novos padrões são alcançados, essas tecnologias estão cada vez mais inseridas no dia-a-dia das pessoas. É um empenho público-privado que torna essas agendas ditas como “rigorosas” algo possível num prazo tão curto.

Outro país que investe muito no hidrogênio verde é o Japão, porém, segue uma estratégia diferente: já que é inferior aos seus concorrentes em relação a recursos naturais e território, investe pesado em tecnologia de ponta para reduzir as dependências em energias nucleares, como mostra a Figura 6.

O Japão se prepara para entrar numa era de independência energética limpa, partindo desde o Protocolo de Kyoto, em 1997, e se impulsionando ainda mais a partir do Acordo de Paris em 2015. A parceria com a BMW é um exemplo de como o país se prepara para esta mudança e já se projeta a demanda, sendo também apoiada pelo poder público.

Figura 6 - Expectativa da demanda de hidrogênio no mercado interno do Japão.



Fonte: Iida & Sakata (2019).

Em Dezembro de 2017, o “Conselho Ministerial sobre Energia Renovável, Hidrogênio e Questões Relacionadas” do Japão decidiu sobre uma “Estratégia Básica de Hidrogênio”. Os pontos-chave da estratégia são:

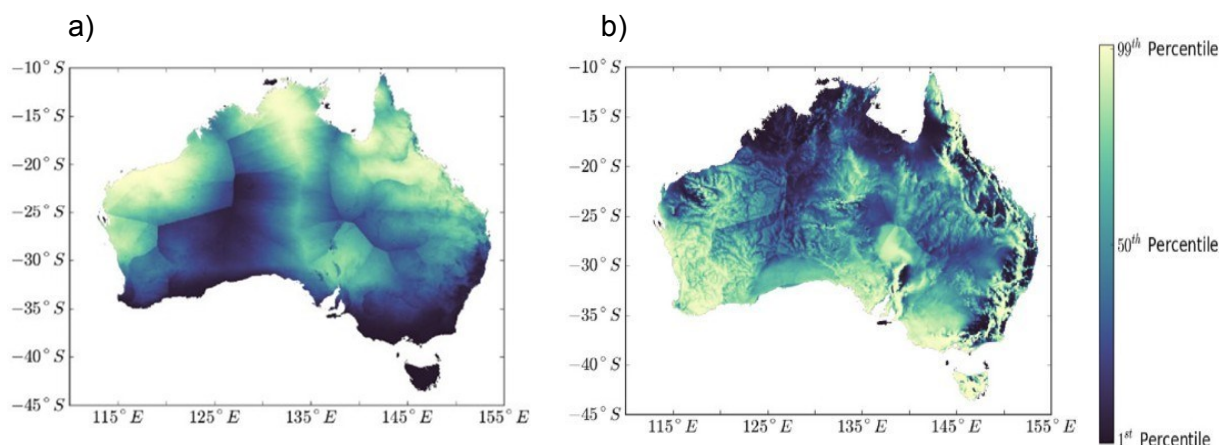
- (i) Visão sobre a Ação 2050+ até 2030;
- (ii) Posicionar o hidrogênio como uma nova opção de energia livre de carbono alinhada com as energias renováveis;
- (iii) Metas de custo do hidrogênio: 0,70\$USD/Nm³ (2019) para 0,20\$USD/Nm³ (até2030).

A meta estratégica de custo do hidrogênio de 0,20\$USD/Nm³ de 2030 foi definida com base em que, até então, a cadeia de fornecimento de hidrogênio em escala comercial deveria ser estabelecida em 300.000 toneladas de hidrogênio transportado pelo país (Iida & Sakata, 2019).

Um mercado próximo e muito promissor ao Japão é o da Austrália. O país é rico em extensão territorial e recursos naturais, sendo um candidato natural a posto de grande produtor de hidrogênio verde na geopolítica atual. O governo australiano já analisa questões infraestruturais do país e o potencial do país, como visto na Figuras 7, assim como o comércio de Japão e Coreia do Sul como possíveis interessados, sendo um competidor direto da China no mercado do leste asiático (Walsh *et al.*, 2021).

Figura 7 - Classificações de regiões da Austrália de percentis (0% pior, 100% melhor) para produção de hidrogênio a partir de recursos renováveis: a) Energia solar fotovoltaica e b) Energia eólica.

Fonte - Walsh *et al.* (2021).



2.3 HIDROGÊNIO: CENÁRIO NO BRASIL

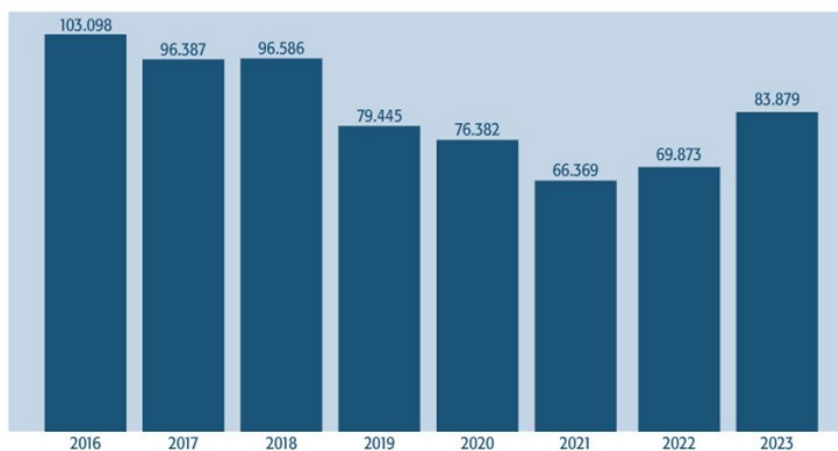
Nas duas últimas décadas (2000 a 2020), medidas internas no país foram adotadas para favorecer a instalação de fontes renováveis de energia a todos os cidadãos brasileiros. O primeiro projeto a adotar esse sistema no país foi o PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) em 2007, com o objetivo de retomar grandes obras de infraestrutura social, urbana, logística e energética (Pinto, 2007).

Entre 2000 e 2017, foram realizados 395 empreendimentos no setor de energia, sendo eles 344 empreendimentos no setor de geração e transmissão de energia elétrica com enfoque na produção de energia renovável, destes, 62 focados em infraestrutura do setor eólico e 31 focados em infraestrutura de usinas térmicas usando biomassa (Cardoso e Navarro, 2016); 6 empreendimentos focados em aumentar a produção de energias renováveis; 45 empreendimentos focados na distribuição social e urbana de iluminação, como no programa “Luz para Todos”(Pinto, 2017).

Apesar de ser dependente de petróleo como a maioria dos países, o Brasil se destaca por já utilizar uma energia limpa: a hidroenergia. A Hidrelétrica de Itaipu, inaugurada em 1984, concede energia a todos os estados do país e produziu no ano de 2023 um total de 83.879GWh (Figura 8), sem produzir uma única grama de CO₂, sendo um exemplo mundial (ITAIPU BINACIONAL, 2024).

Figura 8 - Produção de energia da Hidrelétrica de Itaipú nos últimos 8 anos.

PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA - GWh

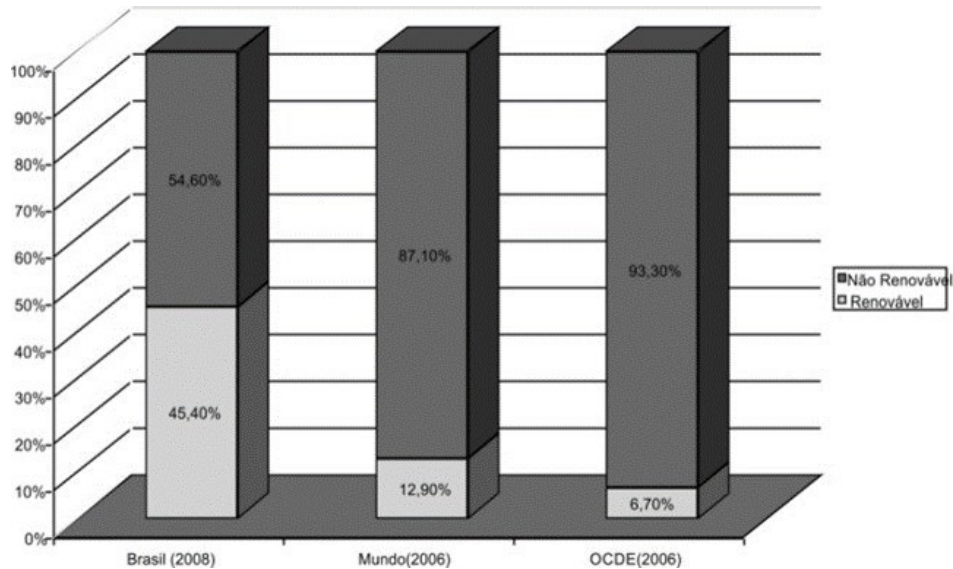


Fonte: ITAIPU BINACIONAL (2024).

Mas isso não reflete no panorama completo da situação: a hidrelétrica produz apenas 8,7% da energia utilizada no país (ITAIPU BINACIONAL, 2024), sendo que

segundo Andrade & Mattei (2013), no ano de 2008 o total das energias utilizadas no país eram 45,40% de fontes renováveis (Figura 9).

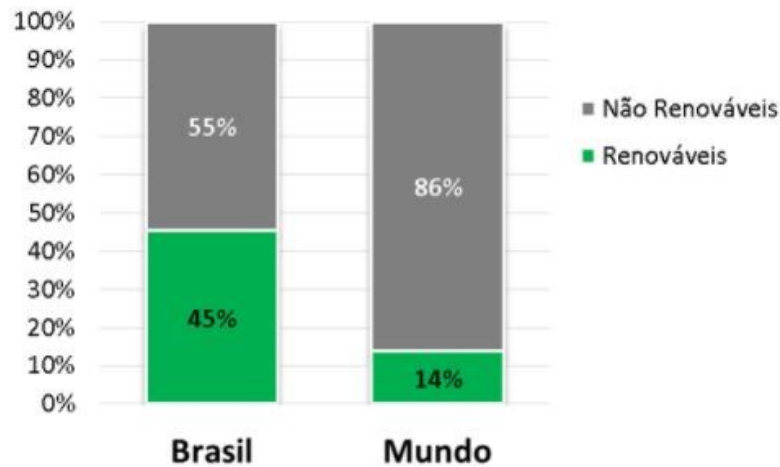
Figura 9 - Gráfico comparando consumo de energias renováveis Brasil x Mundo.



Fonte: Andrade & Mattei (2013).

Nos anos posteriores, houve um aumento no investimento em energias renováveis mas isto não refletiu no acréscimo no uso de energias limpas como mostra a Figura 10, apesar de ser um setor dominante no mercado brasileiro. A energia hidrelétrica pode aumentar repentinamente de custo com as secas e causa impactos ambientais severos com as barragens e represas. Se faz necessário investir em outras energias renováveis para diversificar as fontes e garantir maior segurança energética (Oliveira e Chediek, 2024).

Figura 10 - Oferta interna de energia no Brasil em comparação com o resto do mundo em 2023.



Fonte: Gradella (2023).

Para garantir uma política de produção de energia sem emissões de carbono, é necessário diversificar as fontes de produção, já que, caso ocorram adversidades no sistema produtivo, este problema não comprometa a segurança energética de um país, como exemplo: um período de pouca luz solar numa área de painéis solares, ou ventos fracos numa fazenda eólica.

Mas qual o verdadeiro potencial de produção de hidrogênio verde do Brasil? Muito alto. Como mostra a Figura 11, no país de hoje, a produção de energia é majoritariamente de fontes renováveis, como eólica, solar e bioprodutos (biomassa e biogás), fora a hidroenergia anteriormente citada (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Figura 11 - Percentual de produção de energias renováveis no país em 2023.

Fonte	%
Hidrelétricas	63,8
Eólicas	9,3
Biomassa e Biogás	8,9
Solar	1,4

Fonte: GOV.BR (2024).

“A sanção do Projeto de Lei do Hidrogênio fortalece o país como protagonista global da transição energética justa e inclusiva. Hoje temos um projeto histórico, que cria uma nova indústria para o Brasil, acendendo a chama que vai revolucionar a

matriz energética do planeta. É desenvolvimento tecnológico e industrial na cadeia produtiva do hidrogênio nacional”, disse o atual Ministro de Minas e Energia no começo do mês de Agosto de 2024, Alexandre Silveira, ao acompanhar o sancionamento do Projeto de Lei 14.984/2024 pelo Presidente Lula, que regulamenta a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono no país (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Outras decisões políticas já mostram tópicos relacionados ao hidrogênio e seu papel no futuro sustentável do país, como a Resolução CNPE nº 2 de 2021, no qual estabelece prioridade em investimentos de pesquisa e desenvolvimento. Por conta do país possuir potencial alto na produção de hidrogênio verde e um parque energético vasto em energias renováveis, sobra apenas resoluções de logística e tecnológicas essenciais, setores mais carêntes da indústria nacional e que desafiam toda a cadeia produtiva como transporte, armazenamento, distribuição e consumo (Ministério de Minas e Energia, 2022).

O verdadeiro potencial produtivo de hidrogênio verde no Brasil é visto no Nordeste, em função da abundância das fontes de energia solar e eólica nas regiões costeiras oferece condições para produção de energias limpas que podem alimentar plantas de produção de hidrogênio. Estados como o Ceará, Pernambuco e Bahia já fazem os movimentos iniciais para implantar infraestrutura que possa acomodar esta indústria (Lima, 2023).

No Ceará, o Complexo de Pecém já tem uma iniciativa para produzir e exportar hidrogênio através do Porto de Pecém. O Porto da Suape no Pernambuco, em parceria com o Senai, passa por melhorias para receber os produtos do *Tech Hub* Hidrogênio Verde produzido no estado, na Bahia, o polo petroquímico de Camaçari foi o primeiro projeto nacional para produção de hidrogênio verde em escala industrial, com investimento de US\$ 1,5 bilhões, com capacidade de produzir 100 mil toneladas até 2027 (Lima, 2023).

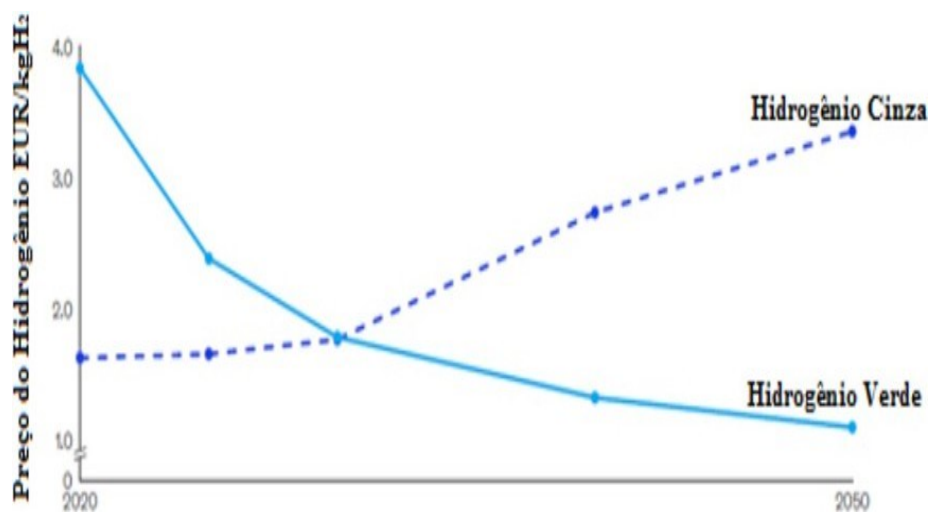
Apesar do Brasil andar rumo a uma produção maior de hidrogênio, a progressão é feita de forma lenta se comparada aos outros países do BRICS, parceiros do Brasil que também investem em produção de hidrogênio. O Brasil ainda está na etapa de “produção de baixa emissão”, enquanto todos os concorrentes já miram em produções de hidrogênio sem CO₂ em seu processo.

2.4 PRINCIPAIS DESAFIOS NA PRODUÇÃO E USO DO HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde é uma fonte energética que atrai os olhos da comunidade científica e empresas do setor de todo o mundo, mas mesmo assim, ainda encontra certa dificuldade de se consolidar no mercado por alguns motivos:

- **Preço:** O preço do hidrogênio ainda é algo que impede a sua competitividade frente a fontes mais “tradicionais” de energia, principalmente quando se fala de hidrogênio verde, já que é um mercado novo e novas técnicas devem ser adotadas com o passar do tempo para reduzir o custo de produção e, conseqüentemente, o custo total do produto, como mostra a Figura 12. O custo de produção do hidrogênio deve cair em 70% ao decorrer desta década e é esperado que o mercado mundial da eletrólise de hidrogênio cresça 1000 vezes a quantidade de hoje (Lara & Ritcher, 2023).

Figura 12 - Expectativa no valor do Kg de H₂ verde até 2050.



Fonte: Campos et al (2022).

- **Infraestrutura:** Como as especificações para produção de hidrogênio não são compatíveis com os métodos já utilizados, é necessário investir numa logística e tecnologias específicas para o mesmo. Devido a inexistência de uma padronização a ser seguida, cada país investe recursos em transporte e armazenamento do produto como pode, embaralhando a cadeia de produção e fazendo experimentações que podem não render resultados, ou render resultados apenas a um curto prazo, não sendo viável em décadas posteriores (Araujo & Azevedo,

2017). Um exemplo disso é o caso dos gasodutos tradicionais: o gás natural é um gás inerte a canos metálicos, não propiciando nenhum risco de ruptura, porém, o hidrogênio iônico que é produzido no eletrolizador, interagem com a camada metálica externa do cano, formando pequenos furos que se acumulam com o tempo, essas partículas de ferro bloqueiam a passagem do fluido eletrolítico no interior do aparelho, como mostra a Figura 13 (Colot, Louviaux, 2024).

Figura 13 - Membrana interna de um eletrolizador com marcas alaranjadas de ferrugem.



Fonte: Louviaux & Colot (2024).

- **Profissionais capacitados:** É um setor que demanda profissionais técnicos capazes de compreender as demandas e características de um sistema que gere hidrogênio. Incidentes que comprometam a produção podem ser evitados mas somente por pessoas capazes de entender os riscos atrelados a tais operações. O hidrogênio possui uma estrutura molecular única, sendo muito leve, sem cheiro ou cor, facilitando seu vazamento e dificultando sua percepção em um local. Também possui baixa energia de ignição, tornando qualquer mistura um potencial causador de incêndios e trazendo alta inflamabilidade, tornando qualquer incidente um incêndio de alto grau (WHA International, 2023).

Mediante os problemas apresentados, os esforços feitos atualmente mostram que o retorno não será breve, mas que, uma vez sobrepujados os mesmos serão os pilares de consolidação do hidrogênio verde na economia mundial.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Notoriamente, apesar do hidrogênio verde ser uma fonte de energia rica e abundante, alguns fatores limitantes ainda precisam ser superados, tais como: ausência de padronização, conhecimentos específicos da cadeia de produção, infraestrutura inadequada para suprir a produção e transporte, carência de corpo técnico especializado e valor pouco competitivo no mercado atual, uma vez que ainda não se consolidou no mercado mundial. Porém, os investimentos recordes anuais e o entendimento de que apenas uma fonte de energia renovável não é suficiente para atender a crescente demanda energética global, se faz necessário reconhecer o papel que o hidrogênio verde terá no futuro, sendo inevitável também a sua influência na geopolítica e nas parcerias entre países com grande potencial produtor e os detentores das tecnologias de produção.

Reconhecer o potencial do hidrogênio verde como elemento chave para descarbonização de cadeias produtivas é essencial para que as metas estabelecidas sejam alcançadas. É um recurso abundante, com alto valor energético e que possui uma produção simples com coprodutos inofensivos a natureza, sendo fundamental para a transição energética mundial. Apesar de diversos fatores que dificultam sua produção atualmente muitos países têm apostado no seu potencial para as próximas décadas. A exemplo do Brasil que possui condições ideais para assumir uma posição estratégica na produção de hidrogênio verde, visto que o país é um dos maiores produtores de energias renováveis, sendo visto como uma potência no setor e capaz de desenvolver novas tecnologias que acelerem ainda mais a descarbonização interna (pequenas plantas produtoras ao redor do país) e externa, atendendo a países que mantêm parcerias no setor.

Contudo, é necessário o ostensivo estudo da cadeia de produção do hidrogênio verde, não apenas no sentido energético, mas também ambiental e acadêmico, pois é uma área carente de profissionais capacitados e de infraestrutura. Sendo fundamental o incentivo dos setores público e privado, que viabilizem o mercado de hidrogênio, possibilitando um futuro com baixas emissões de gases poluentes e com uma sustentabilidade energética para suprir a demanda de diversos setores industriais.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, André Luis Campos, MATTEI, Lauro. **A (in)sustentabilidade da matriz energética brasileira**. Revista Brasileira de Energia, v. 19, n. 2, p. 9- 36, 24 ago. 2024. Disponível em: <<https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/304>>. Acesso em: Ago. 2024.

ARAÚJO, Marcos Antônio Alves; AZEVEDO, Francisco Fransualdo. **A produção de energia eólica no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil: um olhar sobre o uso dos territórios pelas corporações espanholas Iberdrola e Gestamp**. IV Simpósio Internacional de Historia de la Electrificación, Barcelona-ES, p. 1-23, 12 maio 2017. Disponível em: <https://www.ub.edu/geocrit/IVSimposio/Araujo.pdf>. Acesso em: Ago. 2024.

BORGES, Ana Carolina Fernandes. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética**. 66 p. UNESP, Rosana-SP, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/52d44e60-bac6-4b97-9cdb-5664bc27088d/content>. Acesso em: 5 Ago. 2024.

BMW GROUP. **Fábrica do BMW Group em Munique produzirá exclusivamente modelos 100% elétricos a partir do final de 2027**. PressClub Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.press.bmwgroup.com/brazil/article/detail/T0439051PT/fabrica-do-bmw-group-em-munique-produzira-exclusivamente-modelos-100-eltricos-a-partir-do-final-de-2027?language=pt>. Acesso em: 14 Ago. 2024.

BROWN, Alexander; GRÜMBERG, Nis. **CHINA'S NASCENT GREEN HYDROGEN SECTOR: How policy, research and business are forging a new industry**. Klosterstraße, Berlim. MERICS, 28 jun. 2022. Disponível em: <https://merics.org/sites/default/files/2022-06/MERICS_China_Monitor_No_77_Green-Hydrogen_EN_final.pdf>. Acesso em: 11 Ago. 2024.

CAMPOS, Alex M. A.; CRUZ, Lucas V.; NASCIMENTO, Ana Laura B.; ASSIS, Paulo S. **Alternativas para produção de aço com baixa emissão de dióxido de carbono**. ABM Week, São Paulo, SP, p. 1-16, 2022. Disponível em: <www.researchgate.net/publication/365696951>. Acesso em: 18 Ago. 2024.

CARDOSO JR, J. C.; NAVARRO, C. A. **O Planejamento Governamental no Brasil e a experiência recente (2007 A 2014) do programa de aceleração do Crescimento (PAC)**. IPEA, Brasília-DF, p. 1-74, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6590/1/td_2174.pdf>. Acessado em: 10 Set. 2024.

COMPANHIA DE PETRÓLEO E GÁS. **Quais os perigos do hidrogênio?**. Rio de Janeiro- RJ. 26 set. 2022. Disponível em: <<https://clickpetroleoegas.com.br/blog/hidrogenio/quais-os-perigos-do-hidrogenio/>>. Acesso em: 8 Ago. 2024.

COSTA, M. S.Q.; VAZ, C. R.; MALDONADO, M. U. **Hidrogênio verde: revisão de**

método de produção a partir do biogás. Congresso Internacional de Administração, UEPG, Ponta Grossa-PR, 2023. 12 p. Disponível em: <https://admpg.com.br/2023/anais/arquivos/07242023_140742_64beb0ce06ee6.pdf>. Acesso em: 2 Set. 2024.

COSTA, M. S.Q.; VAZ, C. R.; MALDONADO, M. U. **Hidrogênio verde**: revisão de método de produção a partir do biogás. Congresso Internacional de Administração, UEPG, Ponta Grossa-PR, 2023. 12 p. Disponível em: <https://admpg.com.br/2023/anais/arquivos/07242023_140742_64beb0ce06ee6.pdf>. Acesso em: 2 Set. 2024.

COSTA, U. M.; SILVA, L. C.; NOLASCO, L. F. L.; SOUSA, Y. W. S. **Bibliografia temática**: energia de biomassa. ANEEL, Brasília-DF, 2020, v. 2, n. 2, p. 1-14. Disponível em: <<https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/201772>>. Acesso em: 2 Set. 2024.

EL-EMAM, R. S., ÖZCAN, H. Comprehensive review on the technoeconomics of sustainable large-scale clean hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 593-609, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619303361>>. Acesso em: 21 Ago. 2024.

FUKUROZAKI, Sandra Harumi. **Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio**: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa da energia solar fotovoltaica. IPEM, São Paulo-SP, 2011. 180p. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Avalia%C3%A7%C3%A3o-do-ciclo-de-vida-de-potenciais-rotas-de-e-fukurozaki/82fbf826d0c619d7f6f5ae8b753f1fb3beb9e18e?utm_source=direct_link>. Acesso em: 10 Set. 2024.

GODOY, Renan; OLIVEIRA, Osvaldo. **Simulação da cinética reacional de um gaseificador de biomassa de leito fluidizado para produção de hidrogênio**. FATEB, Telêmaco Borba-PR, 2015, p. 1-10, 1. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/301987438>>. Acesso em: 2 Set. 2024.

GRADELLA, Giovanna. **Balanco da matriz energética brasileira em 2022**. Clima-tempo, Rio de Janeiro-RJ, 2023. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2023/01/02/balanco-da-matriz-energetica-brasileira-em-2022-8899>>. Acesso em: 10 Set. 2024.

HOLLER, F. James; WEST, Donald M.; SKOOG, Douglas A. **Princípios da Química Analítica**. 4. ed. Boston, Massachusetts: Cengage Learning, 1988. 1088 p. v. 1.

IIDA, Shigeki; SAKATA, Ko. **Hydrogen technologies and developments in Japan: cleanenergy**. v. 3, n. 2, p. 105-103, 8 maio 2019. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ce/article/3/2/105/5487130>>. Acesso em: 15 Ago. 2024.

IEA50. **World Energy Investment 2024**, Paris-FR, 1 jun. 2024. Disponível

em:

<<https://www.iea.org/news/investment-in-clean-energy-this-year-is-set-to-be-twice-the-amount-going-to-fossil-fuels>>. Acesso em: 6 Ago. 2024.

ITAIPU BINACIONAL. **Produção Anual de Energia: líder mundial na geração de energia limpa e renovável.** p. 1, 16 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 24 Ago. 2024.

KAS. **Perception of the implementation of a hydrogen economy in Asia-Pacific: an expert survey.** Hong Kong-CH. Konrad Adenauer Stiftung, 2022. Disponível em: <<https://www.kas.de/documents/265079/265128/>>. Acesso em: 12 Ago. 2024.

KRUSE, B.; GRINNA, S.; BUCH, C. **Hydrogen Status og muligheter.** Bellona, Oslo-NO, n. 4, p. 1-53. 2002. Disponível em: https://bellona.org/content/uploads/sites/3/Hydrogen_6-2002.pdf. Acesso em: 2 Set. 2024.

LIMA, Ana Carolina Oliveira. **Hidrogênio verde: principais perspectivas do cenário energético no Nordeste brasileiro.** UFC, Fortaleza-CE, p. 1-63, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75477>. Acessado em: 10 Set. 2024.

LARA, Daniella Mueller; RITCHER, Marc François. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro.** NAEA, Rio Grande do Sul, v. 26, n. 1, p. 413-436, 1 Abr. 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746>. Acesso em: 10 Ago. 2024.

LOUVIAUX, Sarah; COLOT, Christian. **Pitting corrosion, Pitting resistance equivalent number (PREN), Critical pitting temperature (CPT), Critical pitting potential.** CMI Groupe, Searing-BE, p. 1-6, 28 Set. 2022. Disponível em: <https://confluence.cmigrou-pe.com/display/HPDS/A.4+-+Pitting+corr>. Acesso em: 18 Jun. 2024.

MATOS, Janara de Camargo; BITENCOURT, Guilherme Ferreira. **Os investimentos em hidrogênio verde no mundo e o papel do Brasil nesta cadeia produtiva.** Praia Grande-SP, v. 16, p. 150-165, 1 jun. 2023. Disponível em: <https://www.fatecpg.edu.br/revista/index.php/ps/article/view/298/196>. Acesso em: 11 Ago. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Coges-PNH2 inicia atividades para elaboração da proposta do decreto regulamentar da Lei do Hidrogênio.** Diário Nacional da União, p. 1, 8 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/coges-pnh2-inicia-atividades-para-elaboracao-da-proposta-do-decreto-regulamentar-da-lei-do-hidrogenio>>. Acesso em: 18 Ago. 2024.

OLIVEIRA, Fernanda Paula; CHEDIEK, Juliana. **Comunidades de Energia.** Coimbra-PT, p. 211, Jul. 2024. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2x4VEQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acessado em: 10 Set. 2024.

OLIVEIRA, Yandra Patrícia Lima. **Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão**. Open Journal System, v. 4, n. 1, 17 dez. 2021. Disponível em:

<<https://meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/view/167>>. Acesso em: 14 Ago. 2024.

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

PAIVA, Suely da S. Mendonça. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. 112 p. UFRN, Natal-RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/47548/1/ProducaoHidrogenio-verde_Paiva_2022.pdf>. Acesso em: 11 Ago. 2024.

PINTO, M. C. de Oliveira. **Uma história de dois PACS: a gestão dos investimentos públicos em infraestrutura a partir do Programa de Aceleração do Crescimento**. Serviços e Informações do Brasil (GOV.br), 14 mar. 2017. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/945>>. Acesso em: 16 Ago. 2024.

PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS. **23.83% efficient mono-PERC incorporating advanced hydrogenation**. Progress in Photovoltaics, Sidney-AU, 13 jun. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3243>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

RODRIGUEZ, Henrique. "Dirigimos o BMW iX5 a hidrogênio que prepara o futuro da marca alemã". **Revista Quatro Rodas**, 18 jan. 2024. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/testes/dirigimos-o-bmw-ix5-a-hidrogenio-que-prepara-o-futuro-da-marca-alema>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

SOARES, José Diego Magalhães. **Produção de hidrogênio a partir de cascas de banana em reator anaeróbico em batelada**. 66 p. UFAL, Maceió-AL, 2019. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/5827/1/Produção%20de%20hidrogênio%20a%20partir%20de%20cascas%20de%20banana%20em%20reator%20anaeróbio%20em%20batelada.pdf>>. Acesso em: 8 Ago. 2024.

SOUZA, Aécio Barbosa. **Estudo de um eletrolisador bipolar alcalino visando a produção de H₂**. 119 p. UFCG, Campina Grande-PB, 2013. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/6272/AÉCIO%20BARBOSA%20SOUSA%20-%20TESE%20PPGEQ%202013.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Acesso em: 3 set. 2024.

WALSH, Stuart D. C.; EASTON, Laura; WENG, Zhehan; WANG, Changlong; MOLONEY, Joseph; FEITZ, Andrew. **Evaluating the economic fairways for hydrogen production in Australia**. International Journal of Hydrogen Energy, Melbourne-AU, v. 46, p. 12, 6 Set. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921033875>>. Acesso em: 16 Ago. 2024.

WHA INTERNATIONAL INC. (EUA). **WHA's Hydrogen Fire Risk Management Philosophy**, 20 set. 2023. Disponível em: <<https://wha-international.com/hydrogen-fire-risk-management/>> Acesso em: 21 Ago. 2024.

YUNUS, Mohd K.; AHMAD, Murni M.; INAYAT, Abrar; YUSUP, Suzana. **Simulation of Enhanced Biomass Gasification for Hydrogen Production using iCON**. World Academy of Science, 2010. Disponível em: <<https://lahore.comsats.edu.pk/Papers/Abstracts/179-8589072369258887058.pdf>>. Acesso em: 3 Set. 2024.