

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ENGENHARIA QUÍMICA

HUAMÃ MARCELINO SOUZA BELMONTE VIEIRA
LUIZ FELIPE SILVA FERREIRA
WELLINGTON BEZERRA DA SILVA

**Estudo da Viabilidade e Inserção do Hidrogênio Verde como Fonte de
Energia no Brasil**

São Paulo
2024

HUAMÃ MARCELINO SOUZA BELMONTE VIEIRA
LUIZ FELIPE SILVA FERREIRA
WELLINGTON BEZERRA DA SILVA

**Estudo da Viabilidade e Inserção do Hidrogênio Verde como Fonte de
Energia no Brasil**

Versão Original

Trabalho de Conclusão de Curso para
Departamento de Engenharia Química da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Química

Orientador: Prof. Dr. Luis Felipe Normandia Lourenço

São Paulo
2024

Autorizamos a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

VIEIRA, H. M. S. B.; FERREIRA, L. F. S.; SILVA, W. B. **Estudo da Viabilidade e Inserção do Hidrogênio Verde como Fonte de Energia no Brasil/** Huamã Marcelino Souza Belmonte Vieira, Luiz Felipe Silva Ferreira, Wellington Bezerra da Silva; orientador, Luis Felipe Normandia Lourenço - São Paulo, 2024.

57p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Hidrogênio Verde 2.Viabilidade 3.Brasil

I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química

Nomes: VIEIRA, Huamã Marcelino Souza Belmonte; FERREIRA, Luiz Felipe Silva; SILVA, Wellington Bezerra.

Título: Estudo da viabilidade e inserção do hidrogênio verde como fonte de energia no Brasil.

Trabalho de Conclusão de Curso para Departamento de Engenharia Química da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Luis Felipe Normandia Lourenço

Instituição: Instituto de Energia e Meio Ambiente - Universidade de São Paulo

Julgamento:

Profa. Dra. Martina Costa Reis

Instituição: Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

Julgamento:

Dedicamos este trabalho a nossos pais, pelo apoio, encorajamento e toda atenção durante estes anos. A todos os amigos que contribuíram das mais variadas formas para a conclusão deste trabalho e do bacharelado, em especial Felipe Takeshi Nakata.

AGRADECIMENTOS

Ser Engenheiro Químico na melhor faculdade do Brasil é um privilégio imenso que nem sabemos como mensurar, além de uma realização de um sonho.

Primeiramente, agradecemos a Deus, pela vida, cuidado, sabedoria e acompanhamento nesta jornada.

Agradecemos a nossa família e amigos, pelo apoio incondicional durante esses anos, e por tornarem os momentos mais árduos mais leves, nas conversas, risadas e comemorações.

Por fim, agradecemos também ao nosso orientador Prof. Dr. Luis Felipe Normandia Lourenço pelo acompanhamento na execução desta monografia, e a Profa. Dra. Martina Costa Reis pela avaliação do mesmo.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo referente à produção, aplicação e a viabilidade do hidrogênio verde como fonte de energia renovável, focando no Brasil, onde o tema está em relevância nos últimos meses, sendo palco de decisões governamentais, jurídicas e científicas. O hidrogênio verde é produzido a partir da eletrólise da água por meio de fontes renováveis como eólica e solar, um processo de separação da molécula de água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) por meio da passagem de uma corrente elétrica na solução aquosa. Ele pode ser utilizado como fonte de energia quando combinado as células a combustível e podem ajudar na redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE) se produzido a partir de fontes renováveis, além disso, ele também possui aplicação como combustível no setor de transportes e como matéria prima para a indústria farmacêutica e de aço. Hodiernamente no Brasil, discute-se a implementação, investimento, regulamentação e como se dará o processo de transição de fonte energética, com objetivo de descarbonizar o setor de transporte e de mobilidade do país. Ademais, no estudo de caso a partir da sensibilidade financeira, indicou-se que o preço viável do H_2V é de 4,05 USD/kg. Denotando-se que são necessários esforços no sentido do barateamento dos custos da produção.

Palavras-chave: hidrogênio verde, viabilidade econômica-científica; Brasil; energia renovável.

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the production, application, and feasibility of green hydrogen as a renewable energy source, with a special focus on Brazil. In recent months the topic of green hydrogen has gained attention due to governmental, judicial, and scientific decisions. Green hydrogen is produced through the electrolysis of water using renewable sources such as wind and solar power. This process that separates water molecules (H_2O) into hydrogen (H_2) and oxygen (O_2) by passing an electric current through the aqueous solution. It can be used as an energy source when combined with fuel cells and has the potential to reducing greenhouse gas emissions (GHG) if produced from renewable sources. Moreover, it has applications as a fuel in the transportation sector and as a raw material in the pharmaceutical and steel industries. Currently, Brazilian court and scientific community is debating the implementation, investment, regulation, and the process of transitioning to a new energy source with the goal of decarbonizing the country's transportation and mobility sector. The recent studies points that projects in the field has medium returns while comparing with others sustainable projects, moreover, Brazil regions offers better geographical coverage and advantages for green energy production. Finally, a valuation of a project in the field was conducted and pointed to the availability of green energy projects in the country, the ideal price for the H_2V is USD 4,05/kg. This shows that is necessary to cheap the cost prices to have a H_2V in an accessible price for society.

Keywords: green hydrogen, economic-scientific feasibility, Brazil, renewable energy.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
3 MÉTODOS.....	13
4 DESENVOLVIMENTO.....	14
4.1. Contextualização.....	14
4.1.1 O Hidrogênio, a Matéria Prima.....	14
4.1.2 Consumo de Hidrogênio no Mundo.....	16
4.1.3 Contexto Energético, oferta e demanda de Hidrogênio.....	18
4.1.4 Ilhas de Energia e Oportunidade de Geração de Hidrogênio.....	19
4.2 Processo Químico.....	21
4.2.1 A Eletrólise.....	21
4.2.1.1 Eletrólise Alcalina.....	22
4.2.1.2 Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons (PEM).....	23
4.2.1.3 Eletrólise de Óxido Sólido (SOE).....	25
4.2.2 Operação de uma Planta de Produção de Hidrogênio Verde.....	27
4.3 Uso do Hidrogênio e Potencial Brasileiro.....	27
4.4 Logística e Armazenamento.....	29
4.5 Investimento, Pesquisas e Projetos-Piloto no Brasil.....	30
4.5.1 Investimento Nacional e Internacional.....	30
4.5.1.1 Porto de Pacém, Ceará.....	31
4.5.1.2 Porto de Suape, Pernambuco.....	31
4.5.1.3 Porto de Açu, Rio de Janeiro.....	32
4.5.2 Linhas de Pesquisa do Hidrogênio na USP.....	33
4.5.3 Projeto-Piloto da Petrobras.....	34
4.6 Legislação e Programas Governamentais do Brasil.....	35
4.6.1 Projetos de Lei.....	35
4.6.2 Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2).....	36
4.6.3 Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro).....	38
4.6.4 Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC).....	38
4.7 Estudo de Caso da Viabilidade Econômica de Uma Planta de Produção Hidrogênio Verde.....	39
4.7.1 Sistema de Produção (eletrolisador PEMs).....	40
4.7.2 Produção de H ₂	40
4.7.3 Resumo dos demonstrativos financeiros.....	40
4.7.4 Investimento do Eletrolisador Alcalino.....	41
4.7.5 Sistema de dessalinização da água de alimentação do processo.....	42
4.7.6 Custo da energia elétrica para a indústria de H ₂ V no Brasil.....	42
4.7.7 Investimentos e custos operacionais totais.....	43

4.7.8 Análise de sensibilidade.....	44
4.7.9 Discussões e Resultados.....	45
4.8 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU.....	47
5 CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

O conceito de hidrogênio verde está intrinsecamente ligado à produção sustentável de hidrogênio, e seu método central envolve a utilização de eletrólise alimentada por fontes de energia renovável, como a solar ou eólica. No decorrer desse processo, a água é submetida a um processo eletroquímico no qual a eletricidade, proveniente dessas fontes renováveis, é utilizada para decompor a água em hidrogênio e oxigênio.

O diferencial fundamental do hidrogênio verde reside na sua característica de ser gerado sem a emissão de carbono. Ao contrário de métodos tradicionais, que muitas vezes dependem de combustíveis fósseis e contribuem para as emissões de gases de efeito estufa, a produção de hidrogênio verde é ambientalmente benigna. Esse aspecto o posiciona como uma fonte de energia limpa, sendo uma peça-chave na transição para uma matriz energética mais sustentável. Assim, o hidrogênio verde não apenas se destaca por sua capacidade de ser uma fonte versátil de energia, aplicável em diversos setores, como transporte e indústria, mas também pela sua contribuição significativa para mitigar as mudanças climáticas e promover uma transição efetiva para práticas energéticas mais sustentáveis.

O Brasil desponta como um potencial produtor mundial de hidrogênio verde, podendo se consolidar até 2030 nesse mercado segundo estimativas de um professor da UFSC²⁹, porém o avanço ainda esbarra na falta de regulamentação, tecnologia e incentivos para criação de projetos voltados para este fim. Contudo, isso pode mudar com o avanço de projetos-piloto no país, com o andamento de projetos de lei e programas voltados para atrair investimentos internacionais e nacionais, para financiar custos relacionados à instalação e a operação e dar base sólida para a alavancagem do setor no país. Tópicos ligados a logística, armazenamento e localização das plantas produtoras, também influem na tomada de decisão frente ao processo de transição energética do país.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho de conclusão de curso tem por objetivo o estudo da viabilidade da inserção do hidrogênio verde como fonte de energia focando no Brasil, país considerado como potencial de produção mundial desse setor, mas que ainda não possui regulamentação nacional, dificultando o investimento, crescimento e expansão. Hodiernamente é debatido o tema nas casas legislativas do Brasil, sendo portanto um acompanhamento periódico de novos desdobramentos. Abaixo será apresentado o contexto, o panorama geral, o processo produtivo, projetos ativos e uma análise da viabilidade econômica do processo de produção do hidrogênio verde no Brasil através de um estudo de caso e a inserção deste tema com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável propostos pela Organização das Nações Unidas.

3 MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foi adotada uma abordagem metodológica que combina pesquisa bibliográfica, análise de dados e estudo de caso. A pesquisa bibliográfica foi crucial para a obtenção de informações consolidadas sobre a produção e aplicação do hidrogênio verde, assim como a viabilidade dessa fonte de energia renovável. A revisão de literatura também permitiu compreender as decisões governamentais, jurídicas e científicas recentes relacionadas ao hidrogênio verde no contexto brasileiro.

A coleta de dados é realizada por meio de fontes confiáveis, incluindo artigos científicos, relatórios governamentais, documentos legislativos e dados de organizações ambientais e energéticas. A análise desses dados tem sido fundamental para a compreensão da situação atual do hidrogênio verde no Brasil, identificando tendências, desafios e oportunidades. Ademais, a consulta às atualidades nos principais editoriais jornalísticos do Brasil sobre o Hidrogênio é crucial para o desenvolvimento do tema, uma vez que é um tema amplamente debatido na comunidade científica e política.

Um estudo de caso específico será conduzido para avaliar a aplicação do hidrogênio verde em um cenário real no Brasil. A escolha do caso permitirá uma análise mais aprofundada dos aspectos práticos, econômicos e ambientais envolvidos na produção e utilização do hidrogênio verde em um contexto específico, levando em conta fatores como infraestrutura, investimentos e regulamentações locais.

Com os resultados obtidos, far-se-á uma análise detalhada dos aspectos econômicos e ambientais, englobando os custos de produção, investimentos necessários, benefícios econômicos associados à transição para essa fonte de energia e a avaliação do potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1. Contextualização

4.1.1 O Hidrogênio, a Matéria Prima

O hidrogênio é um elemento químico com número atômico 1, representado pelo símbolo H^1 . Ele é caracterizado por propriedades químicas como inflamabilidade, ausência de cor, inodora e insolubilidade em água. Geralmente, está associado a outros elementos químicos, como a água ou metano¹. Apesar de ser o elemento mais abundante no universo, na Terra, o hidrogênio está presente em grandes quantidades, ligado a outros elementos, como o carbono em ligações de hidrocarbonetos, gerando produtos como o petróleo. No entanto, em sua forma única, representada por H_2 , é extremamente raro².

Dessa forma, é possível realizar sua produção industrialmente, fazendo a separação desses compostos o qual geralmente está acoplado resulta no H_2 em sua forma gasosa, na qual tem diversas utilidades. Essa separação pode ser obtida por meio da eletrólise da água, processo no qual terá detalhamento nas seções a seguir^{[1][2]}.

O H_2 é fonte de diversos processos de energia, tais processos recebem nome de cores para a identificação da sua fonte, tais nomenclaturas são chamadas de *rotas tecnológicas*³.

Figura 1 - Classificação do caminho de produção do hidrogênio por cores.



Fonte: Figura extraída de (THYMOS ENERGIA et al, 2023)³

Destas rotas tecnológicas emergem diferentes tipos de hidrogênio que se diferenciam na fonte de onde foram extraídos, como exemplo, o hidrogênio azul que advém da reforma a vapor do gás natural, mas que apresenta a captura e armazenamento de carbono como forma de reduzir emissões³. À exemplo, o hidrogênio cinza é obtido através da gaseificação do carvão, resultando na liberação de carbono para a atmosfera. Por sua vez, o hidrogênio azul emprega o mesmo processo, contudo, o CO₂ é capturado, não sendo liberado, o que contribui para reduzir os impactos ambientais. Já o hidrogênio verde destaca-se por não resultar na emissão de gás carbônico. Sua produção envolve a eletrólise da água, um processo no qual uma corrente elétrica é aplicada na água para separar o hidrogênio do oxigênio. Vale ressaltar que para gerar essa corrente elétrica, é necessária uma carga de energia considerável³.

Essas distinções entre os tipos de hidrogênio ressaltam a importância de considerar não apenas a eficiência energética, mas também os impactos ambientais associados a cada método de produção, consolidando o hidrogênio como uma peça fundamental na transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

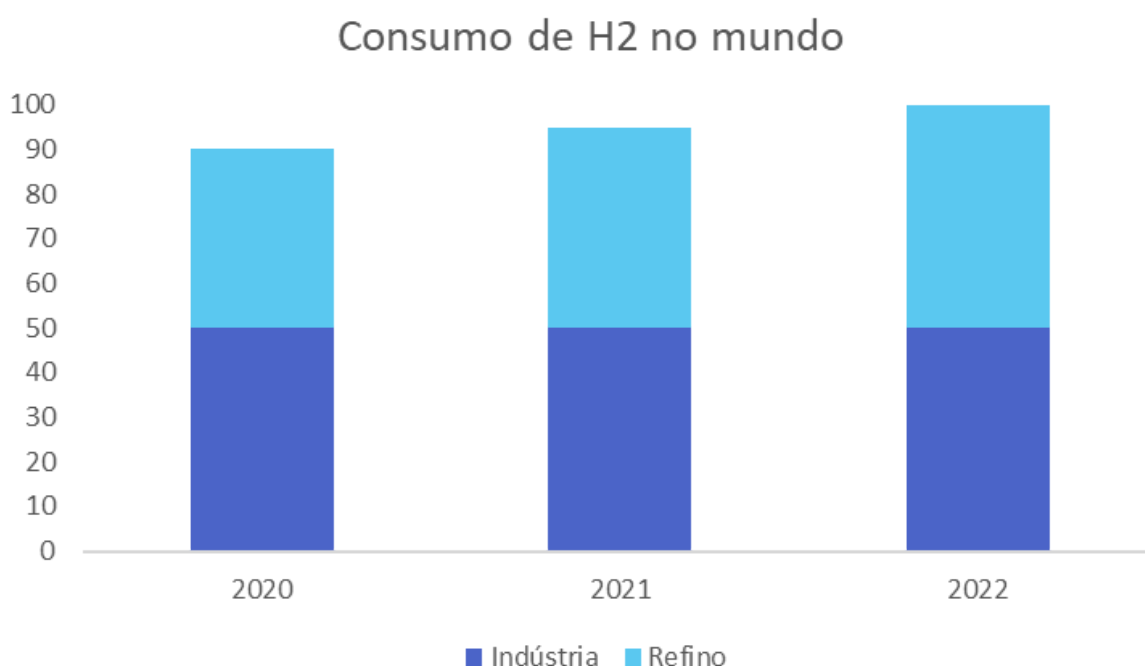
É imprescindível contar com hidrogênio puro na fabricação de energia sustentável advinda de fontes químicas, considerando que 1 kg de hidrogênio equivale, em termos energéticos, a aproximadamente 2,1 e 2,8 kg de gás natural e gasolina, respectivamente². Além disso, a única entrada para liberar essa energia no processo de produção de hidrogênio verde é a oxigênio e a única saída é a água, que pode ser reaproveitada para outros processos, como irrigação por exemplo. A produção de hidrogênio pode ocorrer por meio de diversos métodos, como eletrólise, reforma de gás natural, gaseificação de carvão, entre outros.

4.1.2 Consumo de Hidrogênio no Mundo

Atualmente, o mundo enfrenta desafios significativos relacionados à crise climática, originada pela degradação da camada de ozônio, poluição dos recursos hídricos, desmatamento de florestas densas e exploração desenfreada de petróleo nos mares. Estes fatores convergentes motivaram intensos esforços por parte dos principais líderes globais, direcionados à mitigação dos impactos decorrentes dessa crise planetária⁵.

Em 2022, de acordo com a *International Energy Agency*⁴, o planeta consumiu 95 milhões de toneladas de hidrogênio, e hoje cerca de 120 milhões de toneladas são produzidos, sendo um terço disso em misturas com outros gases. com diversas aplicações industriais e químicas mas concentradas na produção de aço, produto amplamente utilizado sobretudo em construções.

Figura 2 - Consumo do hidrogênio por setor por ano



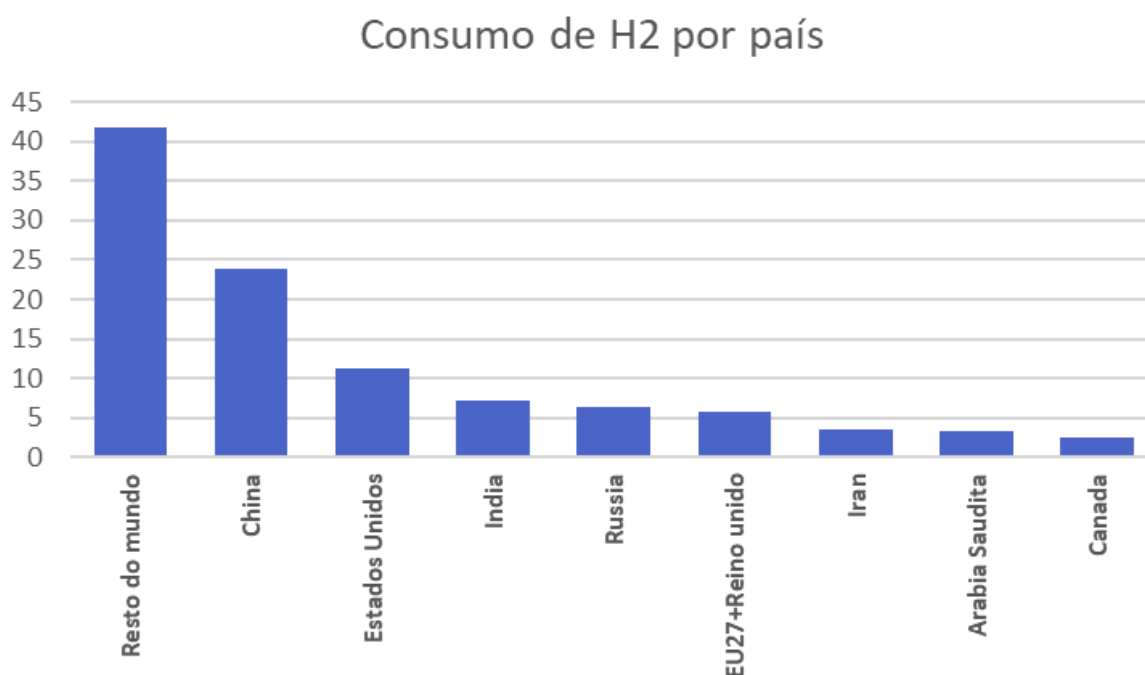
Fonte: Autoria própria com base nos dados de (IEA,2019)³⁸

A China hoje é a maior produtora e consumidora de hidrogênio no mundo, produzindo cerca de 24 milhões de hidrogênio puro por ano⁴. Desde 2020, a China possui mais de 30 projetos de hidrogênio verde em construção. Tais esforços em torno do Hidrogênio pela China demonstra os esforços das grandes nações na

transição energética. Como exemplo, a China produziu cerca de 8400 células elétricas para veículos, e conta com um plano de 5 anos, iniciado em 2021, para ter o hidrogênio como uma das seis principais indústrias do futuro.

Segundo projeções⁴, o hidrogênio pode representar até 12% do consumo global de energia até 2050, o aumento desse percentual é ocasionado pela emergência climática e pelos acordos da emissão zero de CO₂ (dióxido de carbono) feitos pelos países.

Figura 3 - Consumo do hidrogênio por país.



Fonte: Autoria própria com base nos dados de (IEA,2019)³⁸

Esses esforços concentram-se na troca de combustíveis fósseis como fonte de energia por energias renováveis como o Hidrogênio, essa troca pode ser para plantas industriais operarem em condições sustentáveis, pode ser unido com o Nitrogênio (N₂) para a formação de amônia verde que tem utilizado em fertilizantes, pode também ser utilizado no meio de transporte, seja marítimo, por caminhões, gasoduto ou para armazenamento, e também em usos no fim das cadeias de suprimentos, como indústrias siderúrgica, química, refinarias. Serve também para a geração de energia e/ou aquecimento.

No escopo do presente trabalho, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível, que será explicado mais detalhadamente nas seções posteriores, podendo gerar calor de mais de 1000°C sem emitir CO₂.

4.1.3 Contexto Energético, oferta e demanda de Hidrogênio

Recentemente, após a pandemia de Covid-19, a guerra Rússia vs Ucrânia, entre outras crises que envolveram a cadeia de energia, a molécula do hidrogênio se tornou mais valiosa, fator causado pelo aumento da demanda energética e pela sustentabilidade. Tais conflitos põem em cheque a subsistência de comunidades e as economias mundiais, por exemplo, o atual desentendimento da Rússia contra a União Europeia resultou em uma escalada do preço do GLP (gás liquefeito de petróleo). Ademais, conflitos entre países participantes da OPEP (Organização dos Países Produtores de Petróleo) também resultam em cortes da oferta da commodity, resultando no deslocamento do preço para níveis mais altos. Dessa forma, com preços mais altos, gerando inflação em todas as cadeias da economia, como meios de transporte, alimentos, e construção, levou a inflação mundial a níveis recordes.

Dessa forma, energia limpa advinda do hidrogênio verde, ajudará nas metas de descarbonização de diversos setores, levando à uma melhora da qualidade do ar, água, e à segurança energética.

Neste sentido, os anúncios de novos projetos de produção de Hidrogênio verde continuam crescendo, porém apenas 5% destes obtiveram investimentos sólidos e sem incerteza da evolução da demanda futura⁴, isso é ocasionado pela falta de clareza acerca da certificação e regulamentação da infraestrutura disponível para produção e entrega da energia advinda do hidrogênio para à sociedade, tema que será mais profundamente discutido nas seções futuras⁴.

Do lado da demanda, a necessidade é crescente, contudo ainda contido em aplicações tradicionais, sendo que as aplicações onde mais economizaria-se emissões de CO₂ seriam em indústrias pesadas e de longa distância, nestas a aplicação do Hidrogênio como fonte de energia é menos de 0.1% da demanda total, ao passo que essa indústria irá fazer parte de um terço da demanda total de hidrogênio global até 2030, segundo o plano de Net Zero Emissions de 2050 (NZE cenário)^{4;5;6}.

As emissões de gases estufa são o principal foco do desenvolvimento de novas fontes de energias renováveis e com emissão zero de CO₂, sendo assim no cenário positivo, as fontes de energia advindas do Hidrogênio farão parte de importantes setores onde as emissões de CO₂ são muito difíceis de aplicar ou implementar^{3;5}.

Nesse contexto, um país que possui enormes reservas energéticas sustentáveis surge como um potencial ofertante de energia no mundo. O H2V foi apontado no Plano Nacional de Energia 2050, que descreveu o plano energético do país até 2050. Neste, o Hidrogênio foi apontado como uma das energias disruptivas e de alto interesse nacional¹⁰.

4.1.4 Ilhas de Energia e Oportunidade de Geração de Hidrogênio

As ilhas de energia estão emergindo como um enclave crucial de inovação no panorama das energias renováveis, especialmente no que diz respeito à integração de fontes como solar e eólica. A energia solar, capturada através de painéis fotovoltaicos, e a energia eólica, extraída por meio de turbinas eólicas, representam reservatórios abundantes e inesgotáveis de energia limpa e renovável. A engenharia por trás das ilhas de energia visa extrair o máximo potencial dessas fontes intermitentes, combinando-as estrategicamente para assegurar um suprimento constante e ininterrupto de energia. Enquanto os painéis solares convertem a luz solar em eletricidade durante o dia, as turbinas eólicas geram energia movidas pelos ventos. Essa gestão astuciosa dos recursos disponíveis permite uma operação contínua, mesmo em situações onde uma das fontes esteja temporariamente em baixa produção.

No entanto, um dos desafios enfrentados pelas ilhas de energia é o fenômeno conhecido como curtailment, que consiste na necessidade de reduzir a produção de energia quando a demanda é baixa ou quando a rede não consegue absorver todo o excedente produzido. Esse problema surge sobretudo quando a produção de energia excede a capacidade de armazenamento ou transmissão disponível. Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como uma solução altamente promissora.

O hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como a solar e a eólica. Quando há um excedente na produção de energia, ao invés de simplesmente desperdiçá-la, essa energia pode ser direcionada para a produção de hidrogênio verde. Esse hidrogênio pode então ser armazenado para uso futuro ou ser empregado como combustível em diversas aplicações, incluindo transporte e geração de energia.

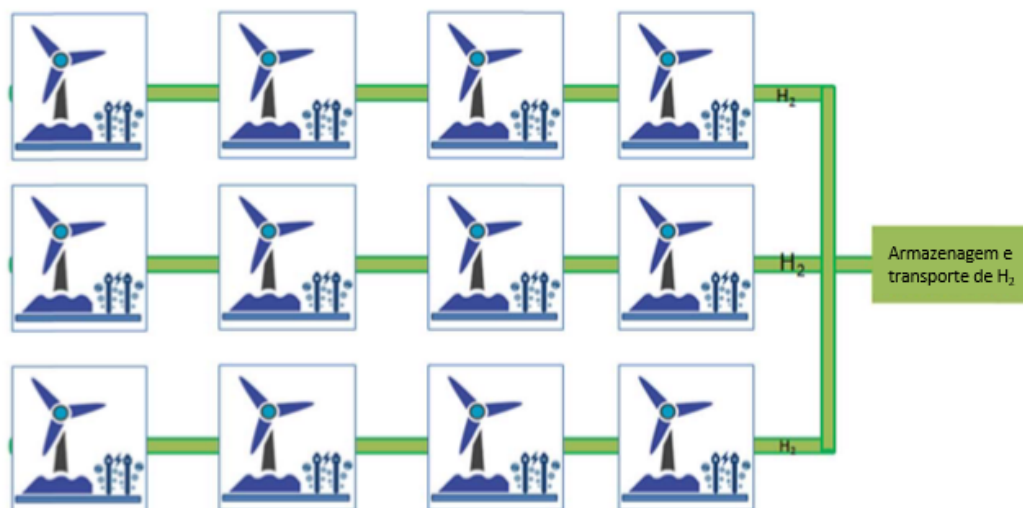
Ao considerar as vantagens do P2G (Power-to-Gas) em comparação com o armazenamento em baterias, é possível destacar alguns pontos cruciais. Em primeiro lugar, o hidrogênio verde produzido por meio do P2G pode ser armazenado por longos períodos de tempo, constituindo uma vantagem considerável em relação às baterias, cuja capacidade de armazenamento tende a ser mais limitada. Além disso, o P2G permite o armazenamento de energia em grande escala, superando as restrições de tamanho e custo associadas às baterias. Sua versatilidade também se destaca, pois o hidrogênio verde pode ser utilizado em uma ampla variedade de aplicações, desde o abastecimento de veículos até o aquecimento de edifícios e processos industriais.

No entanto, é importante reconhecer que o P2G também apresenta desvantagens em comparação com o armazenamento em baterias. Em termos de eficiência energética, o processo de conversão de eletricidade em gás e vice-versa no P2G resulta em perdas que não são observadas no armazenamento direto em baterias. Além disso, o custo inicial da tecnologia P2G ainda é relativamente alto em comparação com o armazenamento em baterias. Por fim, a implementação do P2G requer uma infraestrutura significativa, incluindo instalações de eletrólise e armazenamento de hidrogênio, o que pode representar um desafio em termos de custos e complexidade.

Considerando então a aplicação direta do hidrogênio verde para a geração de energia ou uso como combustível, tem-se o conceito da produção de hidrogênio em ilhas offshore e seu envio para consumo onshore. O transporte de hidrogênio verde das ilhas de energia offshore para o consumo em onshore é um dos principais desafios logísticos para o desenvolvimento desse mercado. Uma das alternativas é o uso de tubulações para transporte de gases, que são mais baratas que cabos de eletricidade e podem aproveitar a infraestrutura existente de outros tipos de gases, como o gás natural. No entanto, essa opção requer adaptações técnicas, como o aumento de pressão para o bombeamento de H_2 , que deve ser o triplo do volume transportado em relação ao gás natural. Além disso, há riscos de vazamento, corrosão e embrittlement das tubulações pelo hidrogênio e o fato de que a produção de H_2 verde tenha de estar limitada geograficamente a pontos no Brasil onde existe uma rede de tubulação de gás natural, o que é um problema quando se considera pontos estratégicos de ilhas de energia justamente para uma maior produção de energia eólica. Além disso, os gasodutos podem enfrentar resistência social e

política, devido à associação com o gás fóssil e aos possíveis impactos sobre as comunidades afetadas.

Figura 4 - Esquemática de uma Ilha de Energia.



Fonte: Imagem extraída de GONDAL, I. A. (2019)⁴⁵

4.2 Processo Químico

4.2.1 A Eletrólise

A utilização de eletricidade proveniente de fontes de energia renovável para realizar a divisão da água e produzir hidrogênio representa uma perspectiva promissora em direção a um mundo mais limpo e sustentável, onde o hidrogênio se destaca por sua maior densidade de energia gravimétrica. Assim, o avanço na tecnologia de eletrólise da água, voltada para a geração de hidrogênio a partir de fontes renováveis, e a subsequente conversão desse hidrogênio em energia elétrica, são objetivos globais fundamentais para o estabelecimento de uma fonte sustentável no futuro. Contudo, a viabilidade econômica da divisão da água ainda é desafiada em comparação com as fontes convencionais, devido aos elevados custos iniciais de energia e à eficiência na produção de hidrogênio¹⁶.

Considerando que a eletrólise da água é uma reação ascendente, evidenciada pelo valor positivo da energia livre de Gibbs, a enfrentar uma notável barreira cinética¹⁷. O desenho dos eletrodos desempenha um papel crucial na minimização dessa barreira cinética. Para aprimorar a eficiência global do processo

de divisão da água, torna-se necessária a pesquisa e desenvolvimento de eletrocatalisadores altamente ativos, caracterizados por baixa resistência à transferência de carga, custos reduzidos e menor consumo de energia. Com base no mecanismo de divisão e nas condições operacionais, a eletrólise da água pode ser classificada em três categorias principais: eletrólise alcalina iniciada por íons OH^- , eletrólise da membrana de troca de prótons iniciada por íons H^+ , e eletrólise de óxido sólido iniciada por íons O_2^- , todas direcionadas à divisão da água para a geração de hidrogênio¹⁸. Essa categorização também abrange o tipo de eletrólito, diversos componentes utilizados no eletrólito e a participação de vários agentes iônicos no processo.

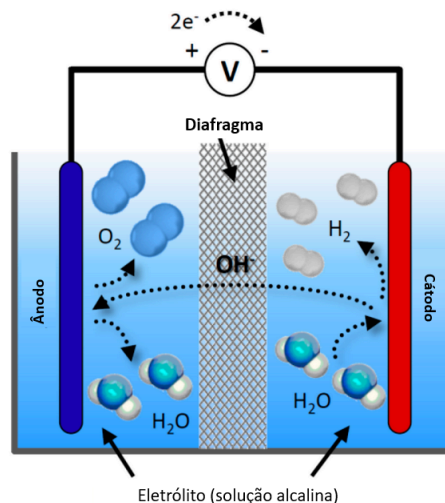
4.2.1.1 Eletrólise Alcalina

A tecnologia de eletrólise alcalina, empregada na produção de hidrogênio, é uma tecnologia consolidada que tem sido utilizada de forma contínua em diversas instalações de produção por mais de 120 anos¹⁹. Esta abordagem é economicamente viável, amplamente difundida e apresenta uma longa durabilidade. Contudo, algumas desvantagens associadas a unidades eletrolisadoras alcalinas incluem a pureza do hidrogênio produzido, uma alta demanda de potência operacional com baixa densidade de corrente, pressão reduzida na geração de hidrogênio e uma eficiência energética comprometida. A tecnologia de eletrólise alcalina tradicionalmente opera em temperatura ambiente, alcançando no máximo 80 °C, utilizando um eletrólito composto por uma solução aquosa básica contendo 30% em peso de hidróxido de potássio (KOH)²⁰. Uma membrana de troca iônica separa o cátodo e o ânodo, armazenando os gases resultantes, hidrogênio e oxigênio, em tanques distintos para uso futuro.

Os custos de capital (CAPEX) e as despesas operacionais anuais (OPEX) associados à tecnologia de eletrólise alcalina variam de acordo com o tamanho e a capacidade da planta. Para ilustrar, o CAPEX de uma planta com capacidade inferior a 1 MW e outra com cerca de 40 MW varia de 1250 euros por quilowatt a 700 euros por quilowatt, respectivamente²¹. Em relação às despesas operacionais, estas correspondem a aproximadamente 7% para uma planta de porte médio, mas espera-se que, com avanços contínuos na

pesquisa para aprimorar a abordagem técnica e a durabilidade, esse valor possa ser reduzido para 2% até 2030²¹.

Figura 5 - Representação do Eletrólito Alcalino.



Fonte: Figura extraída de SABA et al,2019.²¹

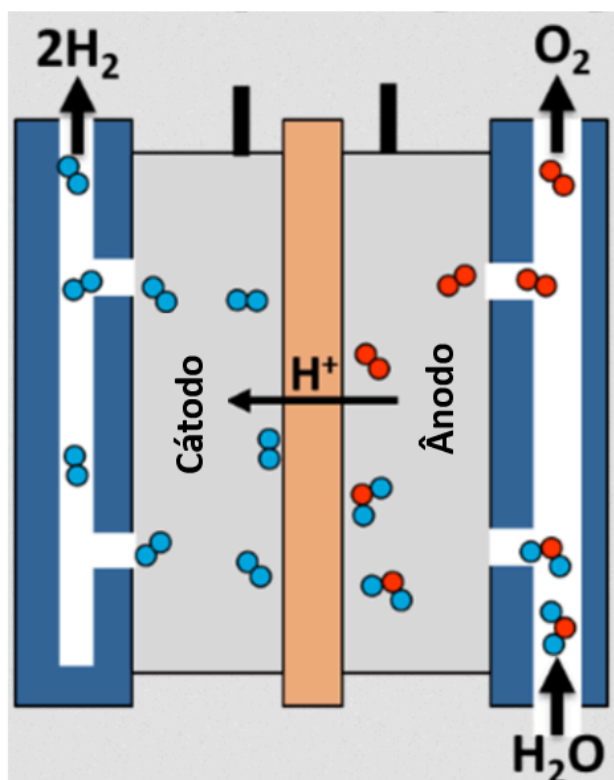
4.2.1.2 Eletrólise de Membrana de Troca de Prótons (PEM)

A tecnologia de eletrólise da água utilizando o eletrólito de membrana de troca de prótons (PEMs) também se destaca como uma abordagem madura, oferecendo a capacidade de operar em densidades de corrente satisfatórias com a aplicação de uma voltagem elevada. As PEMs têm a capacidade de gerar hidrogênio com uma notável pureza de 99,995%²². O papel crucial desempenhado pelas PEMs, especialmente as membranas à base de Nafion, reside na separação do ânodo e do cátodo em um eletrólito. Essas membranas apresentam propriedades notáveis em termos de condutividade, estabilidade térmica e química, resistência mecânica, além de manterem estabilidade em condições variadas de temperatura e pressão. No entanto, as principais desvantagens desta tecnologia incluem os custos associados ao eletrocatalisador e à membrana condutora PEM em relação à sua durabilidade global²³.

Para superar essas desvantagens, é essencial reduzir o custo de produção do eletrólito PEM, mantendo uma eficiência elevada. Comparando

o custo do material da pilha para o eletrólito PEM com o eletrólito alcalino, observa-se que o custo para o eletrólito PEM é substancialmente mais alto. Assim, é crucial direcionar a pesquisa para otimizar o dimensionamento do eletrólito, a pressão de saída de hidrogênio e oxigênio, bem como os parâmetros operacionais controlados²⁴.

Figura 6 - Representação do Eletrólito PEM.



Fonte: Figura extraída de Department of Energy⁴⁷

A redução significativa dos custos de capital associados ao eletrólito PEM pode ser alcançada enfrentando os desafios mencionados, visando uma redução de cerca de 2000 euros por quilowatt em 2020 para aproximadamente 900 euros por quilowatt até 2030. O foco da pesquisa deve se concentrar na diminuição dos custos operacionais relacionados ao eletrólito PEM. De maneira análoga às plantas de eletrólise alcalina, o custo nivelado do hidrogênio também pode ser controlado, passando de 7,37 euros por quilo de hidrogênio para 4,49 euros por quilo de hidrogênio, à medida que a capacidade do eletrólito PEM aumenta de 1 megawatt para 40 megawatts²⁶.

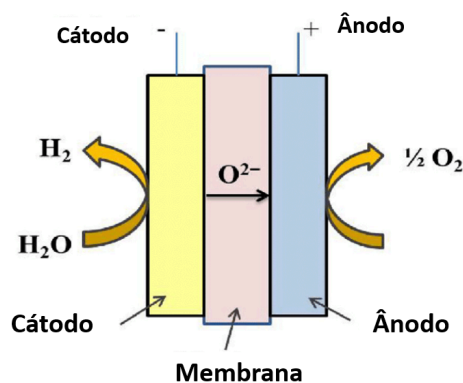
Um resumo dos diferentes processos é apresentado mais abaixo, abrangendo vários aspectos, desde operacionais até detalhes do sistema.

4.2.1.3 Eletrólise de Óxido Sólido (SOE)

Observa-se que a tecnologia de eletrólise de óxido sólido tem recebido ampla atenção nos últimos tempos devido por ser considerada um processo altamente eficiente para a conversão de energia elétrica, gerando íons ativos responsáveis pela divisão da água e produção de hidrogênio de alta pureza. Inventada por Donitz e Erdle em 1980, a tecnologia SOE (Solid Oxide Electrolysis) tem conquistado destaque, mas sua disponibilidade comercial é limitada devido à alta temperatura operacional, situada entre 500 a 1000 °C, e os refinamentos continuam em andamento. Embora a elevada temperatura proporciona eficiência superior em comparação com outros métodos, a degradação do material é uma consideração crucial. Em relação ao eletrólito PEM, a tecnologia SOE apresenta um tempo de resposta operacional mais rápido, graças à utilização de uma membrana cerâmica sólida que separa os eletrodos polarizados opostos, facilitando taxas de transferência de carga rápidas²⁷. Devido à sua maior condutividade iônica, a célula SOE também pode operar como uma célula de combustível, uma vantagem rara em comparação com outras tecnologias de eletrólise. No entanto, a principal desvantagem do eletrólito de óxido sólido reside na intensidade energética de seu processo, operando exclusivamente em altas temperaturas, ainda não sendo pronta para aplicações industriais em termos de prontidão tecnológica.

Dado que a tecnologia SOE ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, o CAPEX varia consideravelmente e é pouco confiável. Atualmente, o custo da energia do hidrogênio utilizando a técnica SOE está acima de 3000 euros por quilowatt de potência. Contudo, há uma projeção otimista indicando que esse custo pode ser reduzido para 750 euros por quilowatt até 2030, com o aprimoramento da instalação de mais plantas SOE²⁸. A tabela abaixo apresenta uma comparação resumida das diferentes tecnologias de eletrólise da água, incluindo detalhes dos parâmetros operacionais.

Figura 7 - Esquematização do Eletrodo SOE.



Fonte: Figura extraída de Gaikwad, P. S. et al.⁴⁹

Tabela 1 - Comparação entre diferentes tecnologias de eletrólise da água

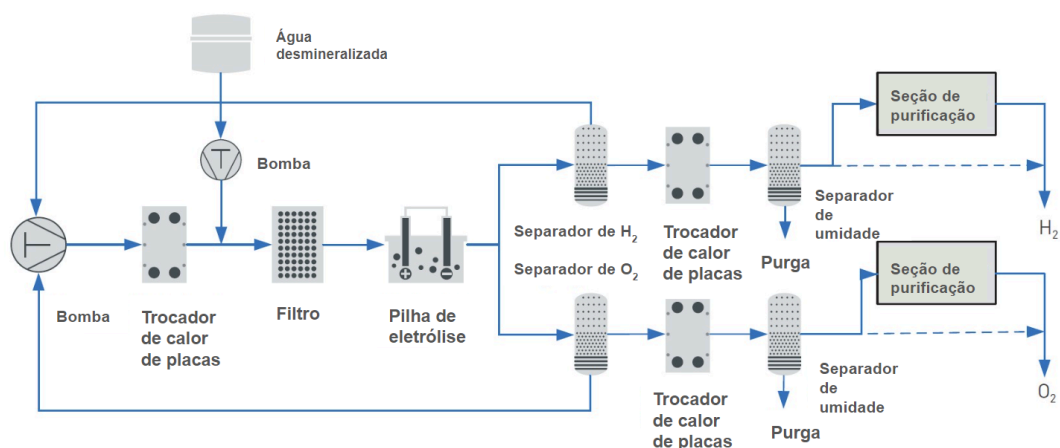
Características	Hidrólise Alcalina	Hidrólise PEM	Hidrólise SOE
Parâmetros de Operação			
Temperatura (°C)	40 a 90	20 a 100	150 a 1000
Pressão (bar)	< 30	< 200	< 20
Densidade de Corrente (A/cm ²)	0,20 a 0,40	0,60 a 2,00	0,30 a 2,00
Tensão (V)	1,8 a 2,4	1,8 a 2,2	0,7 a 1,5
Características Nominais			
Área da Célula (m ²)	< 4	< 0,13	< 0,06
Taxa de Produção	< 1400	< 400	< 10
Pureza do Gás (%)	> 99,50	< 99,99	< 99,90
Detalhes do Sistema			
Consumo de Energia (kWh/m ³)	~ 5,55	~ 5,40	~ 3,80
Eficiência (%)	51 a 60	46 a 60	76 a 81
Vida-útil da pilha (kh)	60 a 120	60 a 100	8 a 20
Degradação (%/ano)	0,25 a 1,50	0,50 a 2,50	3,00 a 50

Fonte: Autoria própria com base na tabela extraída de PANIGRAHY et al, 2022²⁸

4.2.2 Operação de uma Planta de Produção de Hidrogênio Verde

Em uma planta de escala industrial, a produção de hidrogênio verde se dá principalmente pela recirculação de água pela pilha de eletrólise. Conforme apresentado na figura 8, para o processo são necessários equipamentos de operações unitárias de modo a cumprir o que é desejado, entre eles o trocador de calor de placas, utilizado para resfriamento das correntes pelo fato da eletrólise ser uma reação exotérmica. Dentre os métodos de eletrólise que foram apresentados nas seções anteriores, podem ser empregadas aqui tanto a eletrólise alcalina quanto a PEM, sendo que a PEM necessita de água ultrapura, fazendo-se uso do filtro no processo. Ao ir para a extremidade da parte downstream do processo, utiliza-se ainda compressores para que o hidrogênio saia com alta pressão.

Figura 8 - Fluxograma de operação de uma planta de hidrogênio verde.



Fonte: Figura extraída de Niekerk, R. et al⁴⁸

4.3 Uso do Hidrogênio e Potencial Brasileiro

Seguindo a tendência global, o Brasil tem 95% de sua produção de hidrogênio sendo ligada ao hidrogênio cinza, ou seja, obtido através da reforma de gás natural. O uso do hidrogênio no mercado consumidor brasileiro se volta para cinco principais setores industriais: o petroquímico no refino de combustíveis; no setor siderúrgico para a redução do ferro gusa; no setor de alimentos para a hidrogenação de alimentos, sendo o principal deles a margarina; o setor de vidros

planos para a inertização do banho de estanho e no setor de geração de energia para as termelétricas, onde é utilizado para o resfriamento de turbinas³⁶

Atualmente, o hidrogênio cinza fornecido para a indústria brasileira como insumo é realizado por quatro empresas de gases industriais: Linde, Air Liquide, Air Products e Messer.

O Brasil é um dos países favorecidos no quesito condições climáticas quando se refere a produção de energia elétrica através de fontes renováveis, como as fontes solar, eólica e hídrica, portanto se tornando um grande potencial exportador de hidrogênio verde. Este potencial é fortificado com a entrada em operação comercial em 2022 do complexo fotovoltaico Alex, nas cidades de Tabuleiro do Norte e Limoeiro do Norte, ambas no estado do Ceará produzindo cerca de 278,3 MW de energia, fazendo com que o país ultrapassasse a marca de 180 GW de potência para geração de energia elétrica a partir da fonte fotovoltaica³⁷. O Brasil tem a marca de possuir 87% de sua matriz energética sendo derivada de fontes renováveis, porém não se limita apenas a este valor, pois sugere-se que o país ainda tem margem para expandir este setor. Outro ponto que figura ser favorável a este alto potencial do país neste mercado, inclui-se a sua infraestrutura já existente para o transporte de etanol e biogás. Portanto, vale-se notar que o Brasil possui como vantagem competitiva o seu grande mercado produtor de energia elétrica através de fontes renováveis, o que tornaria o custo de produção do hidrogênio verde estimado em aproximadamente 1,50 US\$/kg para 2030, alinhado ao valor observado estimado em países como Estados Unidos, Austrália, Espanha e Arábia Saudita, chegando até aproximadamente 1,25 US\$/kg em 2040³⁷.

Alguns acordos de cooperação internacional já foram firmados com diversos países, principalmente de países desenvolvidos e em desenvolvimento, já que se interessam também por esse potencial carro-chefe da transição energética. Um destes acordos foi firmado com a Alemanha, onde como parceiros energéticos lançado em 2017, com o objetivo de descarbonizar totalmente a economia durante este século, produzem painéis de discussão, workshops para debate, voltados para questões como a integração dos sistemas de energia renovável, desenvolvimento do mercado de eletricidade, promoção da eficiência energética dentre outros tópicos, integrado ministérios dos dois países.

4.4 Logística e Armazenamento

O armazenamento de energia não é simples, dado que no caso do Hidrogênio trata-se de um combustível inflamável e altamente reativo. Dito isso, é importante que para o armazenamento dessa energia seja possível contar com localização geográfica adequada, preço de armazenamento adequado, e incentivo do Estado para tal armazenamento³⁰.

Geograficamente, segundo pesquisas, o espaço subterrâneo é adequado para armazenamento dessa energia, uma vez que, além de espaço, oferece mais segurança contra possíveis acidentes e já são utilizadas em larga escala. Além disso, pode-se com isso posicionar a energia de maneira a estar praticamente dentro das fontes de demanda. Há algumas formas de armazenar, sendo eles depósitos de gás e óleo, aquíferos, e espaços artificiais como cavernas de sal e minas de minério³¹.

É possível armazenar Hidrogênio Verde em forma de gás, líquido e novas tecnologias que envolvem o estado sólido do Hidrogênio. Existem pesquisas que buscam entender como armazená-lo em cilindros de altas pressões, e carregadores de H₂ como a amônia³⁰. O principal e mais almejado modo de armazenamento de Hidrogênio é em sistemas de células de combustíveis para transporte (ex. células de combustíveis de veículos). Para isso será necessário um estudo da demanda futura, e incentivo governamental para a construção de estações de recarga, utilização individual e coletiva do hidrogênio, bem como a proximidade se possível do hidrogênio armazenado próximo ao seu consumo, como a exemplo das usinas refinarias e sucroalcooleiras.

Além do armazenamento, o transporte desse hidrogênio é um dos pivôs da inserção desta alternativa verde, pois se necessário o hidrogênio percorrer um longo caminho antes de seu uso, os custos de transmissão e distribuição podem ser até três vezes maiores que o custo da produção do hidrogênio em si³⁸. Porém se o uso dele for perto de onde ele foi produzido, estes custos podem ser próximos a zero.

Hoje, a maior demanda de hidrogênio no Brasil vem de refinarias de petróleo e produção de fertilizantes (Empresa de Pesquisa Energética, 2022), no Brasil as principais empresas de fertilizantes se encontram geograficamente próximas às indústrias sucroalcooleiras. Em 2022, foram investidos mais de US\$ 22 bilhões em investimentos na construção de usinas de hidrogênio renovável no Brasil, e

analisando graficamente, percebe-se que todas são na região nordeste do país, região favorável para exportação de Hidrogênio, proximidade com a produção de energia renovável dos grandes parques eólicos, além da proximidade com usinas e refinarias.

4.5 Investimento, Pesquisas e Projetos-Piloto no Brasil

4.5.1 Investimento Nacional e Internacional

Até o ano de 2022, somaram-se um montante de US\$27 bilhões de investimentos anunciados para a construção de usinas produtoras de hidrogênio verde, estando essencialmente concentrados em três portos: Porto de Pecém no estado do Ceará, Porto de Suape no estado do Pernambuco e o Porto do Açu no estado do Rio de Janeiro³⁸. Esses três portos são definidos como pontos estratégicos, haja visto uma logística favorável no que tange principalmente à exportação, e proximidade com unidades produtoras de energia elétrica a partir de fontes renováveis e a polos industriais. Esse investimento é considerado significativo, e advém de diversas fontes e denota o forte potencial brasileiro, já que apresenta diversas regiões estratégicas para desenvolvimento desse novo produto. Alguns investimentos previstos já anunciados seguem na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Investimentos previstos no Brasil para a produção de H₂V

Local do Investimento	Valor previsto (US\$)	Empresa	País
Porto de Pacém, Ceará	6 bilhões	Fortescue Future Industries	Austrália
Porto de Pacém, Ceará	2 bilhões	Transhydrogen Alliance	Holanda
Porto de Pacém, Ceará	5,4 bilhões	Energix Energy	Austrália
Porto de Pacém, Ceará	6,95 bilhões	Qair	França
Porto de Pacém, Ceará	8 milhões	EDP do Brasil	Portugal
Porto de Suape, Pernambuco	3,8 bilhões	Qair	França
Porto de Suape, Pernambuco	-	Abreu e Lima (RNEST)	Brasil
Porto do Açu, Rio de Janeiro	3,2 bilhões	Fortescue Future Industries	Austrália
Santo André, São Paulo	19,4 milhões	Unipar	Brasil

Fonte: Autoria própria com base na tabela extraída de OLIVEIRA,2024³⁸

4.5.1.1 Porto de Pacém, Ceará

Este ponto estratégico tem como principal destaque sua localização na Zona de Processamento de Exportação (ZPE), onde possui incentivos fiscais diferenciados. Além disso, possui conexão direta com o Porto de Roterdã, na Holanda, que é o maior porto europeu, podendo servir como grande consumidor e distribuidor do hidrogênio verde produzido para o restante da Europa, indicando a importância dessa cooperação internacional não só para importação de equipamentos, mas também para a exportação.

Diversos potenciais consumidores de hidrogênio verde se encontram presente no complexo industrial presente neste porto, incluindo setores com alto consumo de hidrogênio, como o siderúrgico, de fertilizantes e o setor petroquímico, sendo portanto outra vantagem deste ponto estratégico. Algumas empresas presentes neste complexo incluem: Vale, Enel, Votorantim, EDP, White Martins, Companhia Sulamericana de Cerâmica dentre outras diversas.

Outra vantagem competitiva deste porto, é a capacidade já previamente conhecida do estado do Ceará na produção de energia elétrica a partir da fonte eólica, tanto no modo offshore como onshore, chegando a um potencial maior que 200 GW, além do alto potencial de 643 GW para a produção a partir da energia solar³⁷. Vale ressaltar também que o estado conforme será descrito ainda no decorrer desta monografia, é o único com regulação específica para projetos de hidrogênio verde no país, conforme a Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente N° 3 DE 10/02/2022²⁵.

4.5.1.2 Porto de Suape, Pernambuco

Inicialmente com foco na produção no hidrogênio azul, hoje visa se tornar um grande exportador de hidrogênio verde e amônia, além de suprir a demanda local. Este porto apresenta como vantagem em seu complexo industrial, a existência de uma das principais refinarias do país, a Abreu e Lima, além de outras 150 indústrias de setores variados, indo desde petroquímico, passando por siderúrgico e chegando ao setor alimentício. A energia proveniente para a produção do hidrogênio verde, se baseia na

produção solar, onde o estado possui outorgado a capacidade de 3 GW de produção, porém está operando com apenas 167 MW³⁷.

Como dito, além do hidrogênio verde a região pretende se destacar na produção de amônia, especificamente a amônia verde, e isso é favorecido devido a sua localização, próxima a uma das principais capitais do nordeste, e com facilidade no escoamento para as regiões produtoras do país do agronegócio.

Em dezembro de 2023, durante a COP 28, o governo do Pernambuco lançou a Estratégia Estadual de Hidrogênio Verde, além de noticiar um investimento de R\$20 milhões, a fim de financiar, criar base, e permitir a construção de um projeto-piloto no porto, fomentando a transição energética para uma economia de baixo carbono. Contudo essa empreitada ainda se defronta com a tramitação na Assembleia Legislativa do estado do projeto de lei que visa fundamentar as diretrizes da Política Estadual sobre o Hidrogênio Verde⁴¹. Neste mesmo período, a empresa francesa Voltalia, assinou um Memorando de Entendimento com o Governo Estadual e o Complexo Industrial do Porto de Suape, para cooperação de um projeto de produção de hidrogênio verde no porto, com o objetivo de produção além de amônia verde, de metanol verde⁴².

4.5.1.3 Porto de Açu, Rio de Janeiro

Também inicialmente voltada para a produção do hidrogênio azul, este porto no Rio de Janeiro tem pretensão de aproveitar a infraestrutura, estratégia empregada, só que voltado para a produção do hidrogênio verde. Este porto tem como vantagem além da infraestrutura, a localização a próximos futuros parques eólicos offshore que possuem previsão de serem instalados no oceano próximo ao Rio de Janeiro e ao Espírito Santo³⁹.

Visando apenas exportação, a empresa Fortescue Future Industries, de origem australiana, pretende investir na instalação de uma indústria voltada apenas para a produção de amônia verde, com objetivo de produzir até 250 mil toneladas de amônia verde por ano após estudo de viabilidade de produção de hidrogênio verde⁴⁰.

4.5.2 Linhas de Pesquisa do Hidrogênio na USP

As principais universidades do Brasil influenciadas por novas tecnologias e demanda das empresas iniciaram as pesquisas sobre o Hidrogênio Verde. As pesquisas buscam entender melhor as eficiências, demandas e futuro do Hidrogênio Verde.

Recentemente a Universidade de São Paulo (USP) fez uma parceria com empresas do setor de combustíveis em busca de transformar etanol em hidrogênio verde. Essa é uma das formas de fabricar hidrogênio verde com baixa emissão de carbono. A pesquisa tem como premissa aproveitar a grande capacidade de produção de etanol do Brasil, que é um dos maiores produtores do subproduto no mundo, e decorrente do programa Proálcool (Programa Nacional do Álcool).

A linha de pesquisa utiliza o calor para converter o etanol em hidrogênio, em um processo chamado reforma térmica. Basicamente, o processo tem como subprodutos a produção de hidrocarbonetos, dessa forma envolve a conversão de hidrocarbonetos de cadeia longa em de cadeia curta, aumentando assim a octanagem, ou seja, tornando mais apto para a combustão, fabricando um combustível mais adequado.

Dessa forma, o objetivo é utilizar o combustível em ônibus de transporte, esse combustível será produzido e disponibilizado em uma estação experimental que alimentará o meio de transporte. Concomitante à este, há um projeto que está sendo desenvolvido pelo Research Centre for Greenhouse Gas Innovation (RCGI) busca converter o etanol em hidrogênio por reforma eletroquímica, este se aproxima do processo descrito anteriormente, no qual se baseia na eletrólise da água. A etapa crucial é a oxidação do etanol e como catalisar essa reação para a quebra da molécula de etanol. Dessa forma teria um reformador mais eficiente e de baixo custo a depender dos catalisadores.

Uma terceira linha de frente, que se encontra em fase inicial, é o aproveitamento da vinhaça (resíduo líquido resultante da produção de etanol), esse resíduo gera 10 a 14 litros para cada litro de etanol gerado, ou seja, com grande potencial de aproveitamento. Dessa forma, como possui majoritariamente água e matéria orgânica em sua composição pode ser utilizada em rotas tecnológicas para concentração da vinhaça e com reatores eletroquímicos reduzir a concentração de água e gerar hidrogênio.

A grande vantagem dos projetos propostos pelo RCGI reside na redução do desafio do transporte e estocagem do Hidrogênio Verde. Isso pois, além do desafio de custos de produção do H_2 , adicionaria-se a isso o custo logístico, inviabilizando ainda mais o desenvolvimento do trabalho. O etanol a ser utilizado já se encontra na forma líquida dentro da usina e já conta com infraestrutura consolidada no Brasil, dessa forma, poderia-se aproveitar dessa estrutura para eventual consumo do hidrogênio nos próprios locais de produção.

4.5.3 Projeto-Piloto da Petrobras

Fundada em 1953, a Petrobras que é a maior produtora e consumidora do hidrogênio cinza no Brasil, apresenta metas para redução das emissões de gás carbônico e metano em suas áreas de atuação, e com isso tem-se como um de seus objetivos, a substituição deste hidrogênio cinza, para o uso de hidrogênio verde. Porém esse objetivo ainda circunda sobre a óptica de conseguir viabilizar a cadeia deste hidrogênio sem depender do mercado externo, podendo se tornar um grande negócio para a empresa. O projeto de preparo da Petrobras para a transição energética permeia sobre o plano estratégico de 2024/2028 aprovado pelo Conselho de Administração da Petrobras no final de 2023, onde prevê um aumento de 31% no investimento em relação ao planejamento anterior, que chega a US\$ 102 bilhões, voltados para produção de energias renováveis, produção de hidrogênio, captura de carbono dentre outros segmentos³².

Recentemente a empresa que havia anunciado em fevereiro deste ano a construção de uma planta-piloto para a produção de hidrogênio verde de baixo carbono no estado do Rio Grande do Norte com aporte de R\$90 milhões em parceria com o Instituto Senai de Energias Renováveis, divulgou que pretende ter duas unidades piloto, incluindo agora uma situada no sudeste além da planta nordestina^{33;34}. A planta-piloto que irá ser construída utilizando instalações da usina fotovoltaica Alto Rodrigues, da própria empresa no estado do Rio Grande do Norte, terá como objetivo a avaliação da produção e uso deste hidrogênio associando a eletrólise da água com o uso da energia solar. Com o aumento do consumo energético para este fim, a usina que inicialmente opera para fins de estudo com 1 MWp (megawatt-pico), terá produção ampliada para 2.5 MWp.

Um dos fortes aliados para o andamento de projetos e planejamentos acerca da transição do hidrogênio cinza para o hidrogênio verde pela Petrobras, é o benefício frente ao fundo de US\$ 1 bilhão para o período de 2024 a 2028 que permite que a tecnologia empregada para a produção do hidrogênio verde possa ser mais custosa que a tecnologia atual sendo a diferença coberta por este fundo, ou seja, a tecnologia mais cara sustentável, pode apresentar a diferença de US\$ 1 bilhão, que a solução mais barata poluente³².

4.6 Legislação e Programas Governamentais do Brasil

Apesar da tendência promissora deste novo mercado de energia e diante do grande potencial do país, o Brasil ainda não há regulamentação específica na esfera nacional, sendo atualmente o licenciamento de plantas de hidrogênio realizado apenas na esfera estadual conforme previsto na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) 237/1997⁷.

Dentre todos os estados do Brasil, o Ceará é o único que conta com uma resolução específica para projetos de hidrogênio verde. Conforme a Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente Nº 3 DE 10/02/2022, entende-se como hidrogênio verde, todo aquele que é produzido por fontes renováveis, particularmente, energias eólica e solar a partir da eletrólise da água. Essa resolução também limita o porte e potencial poluidor degradador que estes empreendimentos voltados para a produção de hidrogênio verde. Portanto, é definido que o processo de licenciamento para plantas de hidrogênio deve ser em três fases: licença prévia, licença de instalação e licença de operação²⁵.

4.6.1 Projetos de Lei

Este cenário nacional pode passar por uma eventual mudança com os projetos de lei que estão em tramitação no Senado Federal e na Câmara de Deputados. Na Câmara dos Deputados foi aprovado o Projeto de Lei nº 2.308/2023 no dia 28 de Novembro de 2023¹⁰, este projeto enuncia a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde, instituindo incentivos fiscais para indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono, instituindo também o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de

Carbono (Rehidro), além de criar o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Após a aprovação na Câmara dos Deputados, este projeto de lei vai ser encaminhado para aprovação do Senado Federal⁹.

No Senado Federal já estão em tramitação outros dois projetos de lei, o primeiro de nº 725/2022¹¹, que visa regulamentar a incorporação do hidrogênio verde como uma fonte viável de energia no cenário brasileiro, estabelecendo critérios e incentivos para a promoção do uso do mesmo. Este projeto portanto estabelece o hidrogênio como um vetor energético para transição para uma economia de baixo carbono, considerando que a ANP (Associação Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) deve regular, autorizar e fiscalizar a atividade da cadeia de hidrogênio, incluindo as etapas de importação, exportação, armazenagem e uso. Um dos incentivos preconizados nesse projeto é a inserção do transporte de hidrogênio em gasodutos até 2050. Todos os passos dados por esse projeto são baseados na alteração de duas leis vigentes: a Lei nº 9.478/1997 e a Lei nº 9.847/1999¹¹.

O segundo projeto de lei, de nº 1.878/2022, busca apresentar a definição mais clara do que é hidrogênio verde, tendo como base a definição “corresponde ao Hidrogênio que permanece em estado gasoso em condições normais de temperatura e pressão, gerado a partir da eletrólise da água, a qual se utiliza, para sua produção, da energia elétrica gerada por fontes de energia renováveis, sem emissão direta de dióxido de carbono na atmosfera no seu ciclo de produção”⁹.

Em ambos os casos, a Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal (CMA) aprovou a resolução, portanto dando margem para a aprovação dos projetos supracitados^{11;12}.

4.6.2 Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2)

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) criou o Conselho Gestor do Programa Nacional de Hidrogênio (Coges-PNH2) a partir da Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, sendo composto por diversos ministérios e instituições visando a aprovação do plano trienal para a fonte energética baseada em hidrogênio. Essa criação e foco do governo provém do contexto do mercado de hidrogênio ter se

tornado prioridade estratégica no âmbito da energia de diversos países. O hidrogênio vem como uma fonte alternativa para o alcance da redução de emissões de carbono, sendo visto como uma possibilidade de aplicação nos setores industriais e de transporte, mesmo os transportes leves, onde levanta mais uma nova alternativa para o processo de eletrificação automotiva. Dado o Brasil possuir grande potencial, como já observado nos 80% de sua matriz elétrica ser proveniente de fontes renováveis (sendo a principal fonte a hidráulica) e da ampla gama de recursos energéticos para produção do hidrogênio por diversas rotas, tornou-se necessário diante dos desafios propostos para a concretização do uso do hidrogênio como vetor energético, a criação de um programa voltado para o estudo e o planejamento para o desenvolvimento deste setor.

A formulação do plano trienal a ser aprovada pelo Coges-PNH2 é centrada por cinco câmaras temáticas: a primeira coordenada pelo MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações) busca o fortalecimento das bases científico-tecnológicas do programa, a segunda coordenada pelo MEC (Ministério da Educação) a capacitação de recursos humanos, a terceira e a quarta coordenada pelo MME (Ministério de Minas e Energia) visando o planejamento energético e o arcabouço legal e regulatório-normativo, e a última sob a coordenação do Ministério da Economia, voltada para a abertura e crescimento do mercado. As cinco câmaras temáticas somadas à cooperação internacional completam os seis eixos do Programa Nacional de Hidrogênio^{14;15}.

Figura 9 - Representação dos eixos do PNH2.



Fonte: Figura extraída de (EPE,2024)⁴³

4.6.3 Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro)

O Projeto de Lei nº 2.308/2023 aprovado na Câmara de Deputados e encaminhado para o Senado Federal, tem como uma de suas propostas a instituição do Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixo Carbono (Rehidro), estando incluso no marco legal do hidrogênio^{8;10}. A ideia deste regime é que os incentivos para a produção sejam proporcionais a quantidade de emissões a serem evitadas. O apoio fiscal previsto permeia desonerações com despesas de capital e operacionais (Capex e Opex), desoneração de Cide-Remessas, incentivos de imposto de renda e contribuição sobre o lucro líquido, emissão de debêntures incentivadas e poderá também ser usado por empresas e zonas de processamento de exportação (ZPEs). Portanto, empresas poderão ter suspensão de PIS, Cofins, PIS-Importação e Cofins-Importação na compra ou importação de máquinas e equipamentos novos e de materiais de construção destinados aos projetos de hidrogênio^{13;14}.

Toda essa rede de apoio fiscal é baseada na regulamentação a fim de dar segurança aos investimentos no setor e dar margem para o crescimento deste novo mercado potencial.

4.6.4 Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC)

Outra fonte de recursos para incentivar o setor de produção de hidrogênio verde é por meio do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, este programa tem como finalidade financiar a transição energética do país, sendo alguns destes recursos previstos como: dotações orçamentárias, empréstimos de instituições financeiras internacionais e nacionais, percentual de lucros excedentes das agências financeiras oficiais e recursos e doações de entidades internacionais e nacionais, públicas ou privadas.

O Projeto de Lei nº 2.308/2023 aprovado institui esse programa e o incorpora ao Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2). Com esse financiamento em mãos, o programa portanto vai poder transferir recursos financeiros para instituições públicas e privadas, com caráter assistencial, auxiliando nas despesas de custeios voltados

para a comercialização de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados. A política desses investimentos do PHBC visa garantir a rentabilidade, segurança e liquidez das aplicações e sustentabilidade econômica para garantir o cumprimento da política de hidrogênio verde na transição energética do país segundo o texto da lei¹⁴.

4.7 Estudo de Caso da Viabilidade Econômica de Uma Planta de Produção Hidrogênio Verde

Não é dúvida que o Hidrogênio é uma fonte de energia renovável bastante interessante no contexto atual, sobretudo em um país como o Brasil, que dispõe de uma capacidade de geração de energia sustentável variada e em grande escala. Contudo, para tomar proveito dessa vantagem, é necessário o endereçamento da viabilidade econômica dos projetos em andamento.

Os presentes estudos sobre o tema no mundo, buscam compreender as principais causas do alto custo de produção do Hidrogênio Verde, tendo como causa principal o custo da energia e do equipamento de eletrólise. Entretanto, é importante mencionar que o conteúdo disponível na comunidade científica acerca da produção do H₂V está em passos iniciais, sendo necessário um aprofundamento nos preços de produção e maturação dos projetos correntes para a obtenção de dados mais concretos acerca dos custos e avaliações financeiras. Dessa forma, faz-se necessário para a complementação desses estudos uma análise econômica de um projeto. Contudo

Para isso, o presente trabalho simulou um projeto de uma planta de produção de Hidrogênio Verde, simulou-se conjuntamente os custos atrelados a essa produção, bem como o investimento total (CAPEX) necessário para dar início a produção. Ao final da avaliação foi analisado o fluxo de caixa livre do projeto, que fornece informações importantes para a compreensão do Valor Presente Líquido e comparação da Taxa Interna de Retorno em comparação com investimentos mais conservadores.

4.7.1 Sistema de Produção (eletrolisador PEMs)

O sistema de produção analisado é o processo de eletrólise mais comum em tecnologias de larga escala, que são classificados como eletrolisadores alcalinos (EAs). Estes são os eletrolisadores mais estudados por aliar custo não tão alto com eficiência adequada. Os EAs utilizam materiais menos custosos e podem facilitar não só a barreira de entrada de aquisição do equipamento, como também a manutenção ao longo do tempo.

4.7.2 Produção de H₂

Foi escolhido como vazão de Hidrogênio de 999 toneladas por ano com base na produção de Hidrogênio por eletrolizador alcalino por ano.

4.7.3 Resumo dos demonstrativos financeiros

Para o presente trabalho, estudou-se a viabilidade econômica de uma planta de hidrogênio verde vinculada à ilhas de energia livre, ou seja, sem custos de compra de energia elétrica. Na qual, a planta adquire energia em excesso produzida pelas plantas de energia solar e eólica no Brasil, com foco de estudo no nordeste.

Dessa forma, para modelar o investimento necessário para a planta de hidrogênio iniciou-se pelo Capital Expenditures (CAPEX) que representa todo o investimento do projeto, incluindo compra de equipamentos de eletrólise, dessalinizador, purificação e armazenamento.

Similarmente, existe o Operating Expenses (OPEX), que representa os custos operacionais da planta, ou seja, todo o custo periódico que a planta exigirá para funcionar, como custos com trabalhadores, manutenção dos equipamentos, pesquisa e desenvolvimento, somados às despesas gerais e administrativas.

O CAPEX e o OPEX são investimentos e custos que agem negativamente no financeiro do projeto. Do lado positivo financeiramente, a receita foi modelada como função do produto do preço do Hidrogênio Verde pela quantidade estipulada de 999 toneladas.

Como resultado da subtração na receita líquida pelo OPEX, temos o lucro do projeto, este ao ser subtraído de depreciação (admitiu-se uma depreciação linear

igual a 5% ao ano para um projeto de 10 anos) e impostos (admitiu-se uma alíquota de 18%) fornecendo por fim o lucro líquido do projeto.

Em seguida, projeta-se o fluxo de caixa iniciando com o lucro líquido do período somado à depreciação novamente (por esta ser agir com caráter negativo na DRE, sendo apenas um mecanismo de abatimento de impostos), e subtraindo o CAPEX no período. Com isso, temos o Fluxo de Caixa Livre do projeto, e podemos trazer esses fluxos de caixa a valor presente pela seguinte fórmula:

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{Fci}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Onde N representa a duração do projeto em anos, os períodos do projeto, i é o custo de capital (WACC) e Fci são os fluxos de caixa no período em reais. O Valor Presente Líquido do projeto inicialmente é negativo de modo a evidenciar os altos custos de investimento e manutenção da planta. Para contornar isto, é feita a manipulação de determinar o preço do Hidrogênio Verde que torne este projeto viável.

Dessa forma, foi admitido um custo de capital (WACC) para a planta de 7% por ano, que é o custo de capital mais comum para projetos de energia renovável no Brasil.

4.7.4 Investimento do Eletrolisador Alcalino

O custo principal do projeto é o equipamento de eletrólise, portanto, todos os outros custos e investimentos são baseados no investimento mais representativo como uma forma de estimar os custos de capital na planta. Incidem no equipamento diversos custos como laborais, manutenção e custos gerais. Além disso foi estimado o custo de um eletrolisador alcalino com custo de aproximadamente R\$1350 kW⁻¹ (IRENA, 2020). O custo total do eletrolisador foi determinado em R\$31,86 milhões, sendo o investimento mais relevante da planta.

O custo atrelado a esse equipamento (OPEX) foram manutenção com 6% do custo fixo do eletrolisador, custos laborais (considerando uma planta com 50 trabalhadores com salário médio de R\$ 65 h⁻¹, e despesas gerais, que incluem facilidades, limpezas entre outros com 5% do OPEX total. Para se tornar um custo tão relevante, estudos projetam que o custo do eletrolisador pode reduzir mais de

60% com o avanço em pesquisa e desenvolvimento até 2050. Isso tornaria o preço do H₂V mais viável para investimento e compra em larga escala.

Figura 9 - Representação dos eixos do PNH2

	2020				2050			
	Alkaline	PEM	AEM	SOEC	Alkaline	PEM	AEM	SOEC
Cell pressure [bara]	< 30	< 70	< 35	< 10	> 70	> 70	> 70	> 20
Efficiency (system) [kWh/KgH ₂]	50-78	50-83	57-69	45-55	< 45	< 45	< 45	< 40
Lifetime [thousand hours]	60	50-80	> 5	< 20	100	100-120	100	80
Capital costs estimate for large stacks (stack-only > 1 MW) [USD/kW _{el}]	270	400	-	> 2 000	< 100	< 100	< 100	< 200
Capital cost range estimate for the entire system > 10 MW [USD/kW _{el}]	500-1000	700-1400	-	-	< 200	< 200	< 200	< 300

Note: PEM = Polymer Electrolyte Membrane (commercial technology); AEM = Anion Exchange Membrane (lab-scale today); SOEC = Solid Oxide Electrolysers (lab-scale today).

Fonte: Figura extraída de (IRINA,2020)³³.

4.7.5 Sistema de dessalinização da água de alimentação do processo

Utilizou-se na simulação a planta de osmose reversa para a dessalinização da água, esta tecnologia se apresenta como um investimento (CAPEX). Para o cálculo considerou-se o custo de R\$ 3,5 por metro cúbico de água m³. dia⁻¹

4.7.6 Custo da energia elétrica para a indústria de H₂V no Brasil

Não foi modelado o custo de energia elétrica no presente projeto devido a disponibilidade abundante de ilhas de energia no país, ou seja, como explicitado anteriormente, há disponibilidade em abundância de energia sobre eólica no Brasil. O Estado do Rio Grande do Norte está na liderança da produção de energia eólica no Brasil, com uma capacidade operacional próxima a 10 GW, equivalente a mais de 30% da produção nacional. Dessa forma, projetos de sustentabilidade que necessitam de cargas energéticas altas tem como localização adequada os postos

de produção de energia eólica e solar, sobretudo do nordeste Brasileiro, que é a região com mais potencial energético sustentável.

4.7.7 Investimentos e custos operacionais totais

Os custos de investimentos (CAPEX) somaram R\$ 56,394,067, somando o eletrizador, sistema dessalinizador, setor de purificação e armazenamento, e custos indiretos. Já os custos de operação (OPEX) somam os custos laborais, de manutenção, P&D e despesas gerais e foram estimados em R\$ 5,228,044 e são explicitados a seguir:

Tabela 3 - Levantamento dos investimentos nos equipamentos.

Item	Valor	Unidade
Capex (R\$)	56.394.067	R\$
Água desalinizada	11.189	USD
<i>Custo por m3</i>	0,7	USD/m3
<i>Flow rate</i>	48	m³/d
Purificação e armazenamento	637.200	USD
Eletrolizador	6.372.000	USD
Custo por MWh	270	USD
Conversão euro/real	6	
Custos indiretos	3.186.000	USD
Eletricidade	28.469	USD
<i>Preço MWh</i>	237	R\$/MWh

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Levantamento dos custos operacionais do processo

Item	Valor	Unidade
OPEX total(R\$)	5.228.044	R\$
Laboral	208.125	USD
<i>USD/hora</i>	13	
<i># trabalhadores</i>	50	
Manutenção (6% do custo fixo)	382.320	USD
P&D	31.219	USD
Despesas gerais	423.945	USD

Fonte: Autoria própria.

4.7.8 Análise de sensibilidade

Caso base, o preço do H₂V no patamar de USD 3.7/kg, o projeto não é viável economicamente, por conta dos custos, que ainda são muito altos, sobretudo por conta do alto investimento no eletrolisador. Dessa forma, para um projeto inviável com o H₂V no preço de 3,7/kg, tem-se um VPL negativo em R\$16,601,515 conforme a tabela abaixo.

Tabela 5 - Levantamento dos custos operacionais do processo

VPL	(\$16,601,515)
WACC	7%
TIR	0%
Preço H2 (USD/kg)	3.70
Preço do Eletrolisador (USD)	6,372,000

Fonte: Autoria própria.

O maior investimento do projeto é o eletrolisador, e supondo o preço atual do H₂V 3,7/kg ainda temos um projeto viável variando o preço do eletrolisador. Ou seja, uma redução de aproximadamente 18% no preço do equipamento tornaria o projeto viável mesmo supondo a manutenção do preço do H₂V.

Tabela 6 - Preço do Eletrolisador que zera o VPL no preço de mercado

VPL	(\$0)
WACC	7%
TIR	7%
Preço H2 (USD/kg)	3.70
Preço do Eletrolisador (USD)	5,207,296

Fonte: Autoria própria.

Por fim, pode-se também achar que o valor ideal do H₂V que torna o projeto viável, foi definido em R\$ 4,05/kg de H₂V. Dessa forma, esse valor é o valor ideal para a comercialização do produto neste projeto.

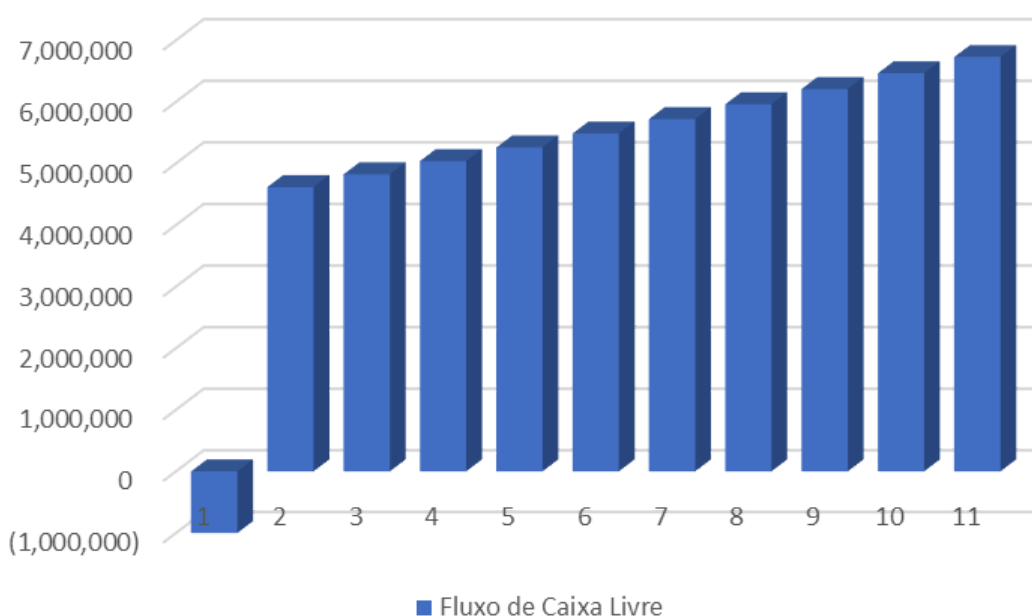
Tabela 7 - Preço do H2V que zera o VPL

VPL	(\$0)
WACC	7%
TIR	7%
Preço H2 (USD/kg)	04.05
Preço do Eletrolisador (USD)	6,372,000

Fonte: Autoria própria.

A seguir temos o preço gráfico do fluxo de caixa gerado pelo projeto. O primeiro período inclui o CAPEX negativo em R\$56,394,607. A partir desse período de construção da planta, os fluxos de caixa são positivos devido a receita superar os custos operacionais do projeto.

Figura 10 - Fluxo de caixa livre por ano



Fonte: Autoria própria.

4.7.9 Discussões e Resultados

O projeto apresentou um com o preço atual do Hidrogênio Verde de USD 3,7/kg um VPL negativo de R\$16,601,515. Para o projeto se tornar viável o valor encontrado foi de USD 4,05/kg. Isso evidencia que os custos de produção são um fator importante na análise. Sendo assim, é necessário cada vez mais a pesquisa e o desenvolvimento no sentido do barateamento do equipamento de eletrólise (o maior custo do investimento). Ainda sim, o projeto com o VPL viável apresentou

uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 7%, em linha com o patamar de projetos sustentáveis.

Além disso, fez-se uma análise de sensibilidade que variou os diversos Valores Presente Líquidos em função do preço do eletrolisador (maior investimento) e do preço do Hidrogênio Verde. Percebe-se que para preços de eletrolisadores mais altos o retorno do projeto é cada vez menor, enquanto para preços menores o inverso. Da mesma forma, o preço do H₂V traz mais resultado financeiro para valores maiores. Este é o principal desafio do combustível - trazer retorno com preços mais acessíveis. Nesse sentido, mesmo que os preços do H₂V (que são indiretamente influenciados pelo preço do eletrolisador) não diminuam de patamar como o projetado, os projetos de energia podem ser viáveis.

Figura 11 - Sensibilidade do Preço do H₂V vs. Investimento no Eletrolisador

		Preço do Eletrolisador						
		0	5,372,000	5,872,000	6,372,000	6,872,000	7,372,000	7,872,000
Preço do H2V	0.9	-88,957,137	-96,744,198	-104,531,259	-112,318,320	-120,105,381	-127,892,442	
	1.4	-80,799,614	-88,586,675	-96,373,736	-104,160,797	-111,947,858	-119,734,919	
	1.9	-68,944,611	-76,731,672	-84,518,734	-92,305,795	-100,092,856	-107,879,917	
	2.4	-53,392,130	-61,179,191	-68,966,252	-76,753,313	-84,540,374	-92,327,435	
	2.9	-36,000,365	-43,127,288	-50,254,211	-57,580,795	-65,290,413	-73,077,474	
	3.4	-17,183,464	-24,310,387	-31,437,309	-38,564,232	-45,691,155	-52,818,078	
	3.9	4,665,370	-2,461,552	-9,588,475	-16,715,398	-23,842,321	-30,969,243	
	4.1	14,253,846	7,126,923	0	-7,126,923	-14,253,846	-21,380,768	
	4.3	24,327,430	17,200,507	10,073,584	2,946,662	-4,180,261	-11,307,184	
	4.5	34,886,124	27,759,201	20,632,278	13,505,355	6,378,432	-748,490	
	4.7	45,929,926	38,803,004	31,676,081	24,549,158	17,422,235	10,295,313	
	4.9	57,458,839	50,331,916	43,204,993	36,078,070	28,951,148	21,824,225	
	5.1	69,472,860	62,345,937	55,219,015	48,092,092	40,965,169	33,838,246	
	5.3	81,971,991	74,845,068	67,718,146	60,591,223	53,464,300	46,337,377	
	5.5	94,956,231	87,829,308	80,702,386	73,575,463	66,448,540	59,321,617	

Fonte: Autoria própria.

Portanto, infere-se que a inserção do Hidrogênio Verde no Brasil é viável, porém necessita de investimentos Governamentais para acontecer, uma vez que ainda é necessário investimento nos projetos, sobretudo nos equipamentos de eletrólise. É interessante a análise da viabilidade em locais como o nordeste brasileiro possuem alta capacidade eólica e solar, e são os locais geográficos mais propícios para a instalação e produção de parque fabril de Hidrogênio Verde.

Ademais, o país tem feito esforços na direção de viabilizar mais projetos na área, com projeto de regulamentação do setor no país, permissão de investimento privado como os da Petrobras e Unigel³³, e o Programa Nacional de Energia (PNE). Além disso, o Governo Brasileiro tem tornado a atenção para Energias Renováveis, o que pode abrir caminho para desalavancar a capacidade energética do país.

4.8 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU

Desenvolvidos pela Organização das Nações Unidas durante a Cúpula sobre o desenvolvimento sustentável de 2015, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável versam sobre 4 principais tópicos: ambiental, onde aborda a preservação e conservação do meio ambiente; social, onde aborda sobre as necessidades humanas, incluindo saúde, educação, qualidade de vida e justiça; econômica, onde aborda sobre o uso e esgotamento dos recursos naturais, a produção de resíduos e o consumo de energia; e institucional, onde se diz respeito às capacidades de colocar estes objetivos em prática.

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, se subdivide em 17 objetivos e 169 metas a serem atingidas até 2030, e sendo o Brasil um país signatário e participante central das discussões acerca da elaboração dessas metas, esses objetivos foram incluídos na Agenda 2030 do país⁴⁴.



Fonte: Figura extraída de (ONU,2024)⁴⁴

Neste contexto, observa-se que a transição energética do Brasil, a partir da inserção do hidrogênio verde como fonte de energia, versa sobre 4 ODSs. O primeiro se refere ao objetivo 7 (Energia Limpa e Acessível), onde o H₂V vem como forma de mitigar o uso do hidrogênio cinza amplamente utilizado no país, fazendo uma transição para a economia de baixo carbono. O segundo se refere ao objetivo 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), onde é possível observar que a produção do mesmo tange sob a perspectiva de inovação, ligada a melhoramento de processos, visando uma economia ligada à sustentabilidade. O terceiro objetivo contemplado se refere ao objetivo 12, onde, não só a redução no uso do hidrogênio cinza, como a transição para o H₂V também afeta outras produções, como a de amônia verde principalmente utilizada para produção de fertilizantes, repensando toda uma cadeia de produção de diversos setores, inovando para uma produção responsável. E por fim, o quarto objetivo que é objetivo 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), onde nesta transição, o recuo da utilização de combustíveis fósseis, bem como o incentivo a produção de energia por meio de fontes renováveis, acarreta na diminuição das emissões de gases do efeito estufa, estes sendo um dos principais responsáveis pela mudança global do clima.

5 CONCLUSÕES

Inicialmente, abordou-se o hidrogênio como elemento químico versátil e aplicável em diversas atividades da sociedade, especialmente como fonte de energia limpa, segura e abundante. A mesma, é capaz de zerar as emissões de dióxido de carbono caso usada em exclusividade, contudo ainda vem sendo utilizada como fonte complementar de energia, ou altamente concentrada em aplicações que não descarboniza tanto a sociedade, restante então, à pesquisa e desenvolvimento, maneiras de baratear os custos para viabilizar aplicações como em indústrias de base e de longa distância.

A análise do consumo global de hidrogênio revela um aumento significativo da demanda, impulsionado pela busca global de alternativas limpas em meio à crise climática. Conclui-se nesse sentido que o Hidrogênio Verde emerge como um dos principais e mais disruptivos projetos de descarbonização e energia renovável da atualidade, com planos de investimentos e desenvolvimentos robustos pelas maiores nações do mundo. Com isso, diversos estudos estão sendo feitos simultaneamente ao redor do mundo buscando aprofundar os conhecimentos sobretudo no barateamento do custo de produção na eletrólise.

Destaca-se o papel do hidrogênio como uma peça chave para a transição da matriz energética, salientando os desafios econômicos necessários para torná-lo uma fonte de energia viável para a sociedade. Ademais, estudou-se as leis que regulamentam o setor de energia renovável no Brasil, e, sendo um tema bastante atual, torna-se necessário o acompanhamento do tema para que seja refletido no presente trabalho as consequências, uma vez que qualquer decisão neste ponto irá ditar se o Hidrogênio Verde irá se viabilizar ou não.

A viabilidade econômica do projeto indica a possibilidade de produção de H_2V no Brasil, especialmente na costa nordeste do país, onde se combina capacidade energética com uma localização favorável. As análises de sensibilidade mostraram que o projeto é viável e depende de duas variáveis principais: o preço do H_2V e o investimento necessário no equipamento de eletrólise. Foram realizadas diversas simulações para determinar o ponto ótimo de equilíbrio entre o investimento e o preço do combustível. É possível inferir, ao final da análise, que podem ocorrer reduções de custos com investimentos nos equipamentos, assim como a redução do preço do H_2V em um futuro próximo.

É importante mencionar que o desenvolvimento de estudos na área dos combustíveis renováveis é de extrema importância, uma vez que grande parte dos esforços e resultados na diminuição dos custos de investimento advém de inovações tecnológicas. Com base nisso, os países e associações de estudos de energia têm se apoiado para fazer projeções de redução de investimentos e preços do H2V.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 PALMER, David (13 de setembro de 1997). [«Hydrogen in the Universe»](#). NASA. Consultado em 1 de dezembro de 2023. Acesso em 09 dez. 2023

- 2 RIGDEN, John S. (2002). **Hydrogen: The Essential Element**. Cambridge, MA: Harvard University Press. ISBN [0-531-12501-7](#). Acesso em 13 dez. 2023

- 3 THYMOS ENERGIA (São Paulo) et al. **HIDROGÊNIO VERDE: A nova fronteira dos mercados de energia**. 13 out. 2023. Disponível em: https://storage.epbr.com.br/2023/10/THYMOS_ENERGIA_HIDROGE%CC%82NIO_WHITE_PAPER_vf_PT-1.pdf. Acesso em: 9 dez. 2023.

- 4 IEA (2021), **Global Hydrogen Review 2021**, IEA, Paris [Global Hydrogen Review 2021 – Analysis - IEA](#), License: CC BY 4.0. Acesso em 09 dez. 2023

- 5 IRENA (2022), [Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor](#). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Acesso em 12 dez. 2023

- 6 Hannah Ritchie and Max Roser (2020) - “**Energy**”. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: ‘<https://ourworldindata.org/energy>’ [Online Resource]. Acesso em: 10 dez. 2023.

- 7 CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 237**, de 19 de dezembro de 1997: LICENCIAMENTO AMBIENTAL – Normas e procedimentos,, 22 dez. 1997. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237. Acesso em: 15 nov. 2023.

- 8 COSTA, Elisa. Plenário da Câmara aprova marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono. **Agência Infra**, 29 nov. 2023. Disponível em: <https://www.agenciainfra.com/blog/plenario-da-camara-aprova-marco-legal-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono/>. Acesso em: 1 dez. 2023.

- 9 FRANCO, Ana Claudia La Plata de Mello. A importância de um marco regulatório para o hidrogênio verde: O hidrogênio verde se destaca como uma opção sustentável obtida por meio da eletrólise da água, utilizando energia de fontes renováveis, como solar, eólica ou

hídrica. **Exame**, 3 set. 2023. Disponível em: <https://exame.com/esg/a-importancia-de-um-marco-regulatorio-para-o-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 11 out. 2023.

10 CÂMARA DOS DEPUTADOS. Projeto de Lei nº 2308, de 3 de maio de 2023. Dispõe sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde. **PL 2308/2023**, 1 dez. 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2359608>. Acesso em: 4 dez. 2023

11 SENADO FEDERAL. Projeto de Lei nº 725, de 28 de março de 2022. Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável. **Projeto de Lei nº 725, de 2022**, 19 out. 2023. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413>. Acesso em: 5 dez. 2023.

12 ANICETO, Laren. Comissão de Meio Ambiente do Senado aprova regras para uso de H2V como fonte de energia: PL 725/22, do ex-senador Jean Paul Prates, trata da integração das operações de produção e distribuição de hidrogênio verde ao setor de abastecimento de combustíveis. **Energia Hoje**, 19 out. 2023. Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/comissao-de-meio-ambiente-do-senado-aprova-regras-para-uso-de-h2v-como-fonte-de-energia/>. Acesso em: 1 nov. 2023.

13 MACHADO, Nayara. Rehidro: Política para hidrogênio propõe regime especial de incentivos: Comissão Especial da Câmara pretende votar proposta de marco legal para hidrogênio de baixo carbono no dia 24/10. **Agência epbr**, 13 out. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/rehidro-politica-para-hidrogenio-propoe-regime-especial-de-incentivos/>. Acesso em: 31 out. 2023.

14 PIOVESAN, Eduardo. Câmara aprova certificação e incentivos para hidrogênio com baixa emissão de carbono: Padrão terá intensidade de gases do efeito estufa reduzida a partir de 2030. **Agência Câmara de Notícias**, 28 nov. 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1020557-camara-aprova-certificacao-e-incentivos-para-hidrogenio-com-baixa-emissao-de-carbono>. Acesso em: 6 dez. 2023.

15 MME. Programa Nacional de Hidrogênio – PNH2. **Ministério de Minas e Energia**, 13 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 28 nov. 2023.

16 SAFARI, Farid; DINCER, Ibrahim. A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. **Energy Conversion and Management**, v. 205, p. 112-182, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419311884>. Acesso em:

17 WANG, Shan; LU, Aolin; ZHONG, Chuan-Jian. Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. **Nano Convergence**, v. 8, p. 1-23, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40580-021-00254-x>. Acesso em: 7 jan. 2024

18 SEBBAHI, Seddiq et al. Assessment of the three most developed water electrolysis technologies: Alkaline water electrolysis, proton exchange membrane and solid-oxide electrolysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 140-145, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322024063>. Acesso em: 27. jan. 2024

19 KRISHNAN, Subramani et al. Power to gas (H₂): alkaline electrolysis. In: **Technological learning in the transition to a low-carbon energy system**. Academic Press, 2020. p. 165-187. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S01968904203000108>. Acesso em: 5 fev. 2024

20 VASSAL, N.; SALMON, E.; FAUVARQUE, J.-F. Electrochemical properties of an alkaline solid polymer electrolyte based on P (ECH-co-EO). **Electrochimica Acta**, v. 45, n. 8-9, p. 1527-1532, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468699003692>. Acesso em: 1 fev. 2024

21 SABA, Sayed M. et al. The investment costs of electrolysis—A comparison of cost studies from the past 30 years. **International journal of hydrogen energy**, v. 43, n. 3, p. 1209-1223, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917344956>. Acesso em: 13 fev. 2024

22 LETTENMEIER, Philipp et al. Durable membrane electrode assemblies for proton exchange membrane electrolyzer systems operating at high current densities.

Electrochimica Acta, v. 210, p. 502-511, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468616310167>. Acesso em: 13 jan. 2024

23 PEIGHAMBARDOUST, S. Jamai; ROWSHANZAMIR, Soosan; AMJADI, Mehdi. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. **International journal of hydrogen energy**, v. 35, n. 17, p. 9349-9384, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319910009523>. Acesso em: 12 jan. 2024

24 VIDAS, Leonardo; CASTRO, Rui. Recent developments on hydrogen production technologies: state-of-the-art review with a focus on green-electrolysis. **Applied Sciences**, v. 11, n. 23, p. 11363, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11363>. Acesso em: 15 fev. 2024

25 CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - CEARÁ. **Resolução COEMA nº N°03**, de 14 de fevereiro de 2022. DISPÕE SOBRE OS PROCEDIMENTOS, CRITÉRIOS E PARÂMETROS APLICÁVEIS AO LICENCIAMENTO AMBIENTAL NO ÂMBITO DA SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – SEMACE PARA EMPREENDIMENTOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO ESTADO DO CEARÁ, 14 fev. 2022. Disponível em: https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2022/02/Resolucao-COEMA-N_-03_2022.pdf. Acesso em: 2 out. 2023.

26 URSUA, Alfredo; GANDIA, Luis M.; SANCHIS, Pablo. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5898382>. Acesso em: 1 abr. 2024

27 ALZHRANI, Abdullah A.; DINCER, Ibrahim. Modeling and performance optimization of a solid oxide electrolysis system for hydrogen production. **Applied Energy**, v. 225, p. 471-485, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191830686X>. Acesso em: 17 fev. 2024

28 PANIGRAHY, Bharati; NARAYAN, K.; RAO, B. Ramachandra. Green hydrogen production by water electrolysis: A renewable energy perspective. **Materials today**:

proceedings, v. 67, p. 1310-1314, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322060709>. Acesso em: 19 fev. 2024

29 FANTÁSTICO. Hidrogênio verde: Brasil avança na produção do novo combustível, mas ainda enfrenta desafios: O mundo em transição busca um substituto para o petróleo. O segundo episódio da "Série O Futuro da Energia" mostra como o hidrogênio destaca-se como uma alternativa viável nesse cenário.. **Jornal O Globo**, 29 out. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/fantastico/noticia/2023/10/29/hidrogenio-verde-brasil-avanca-na-producao-do-novo-combustivel-mas-ainda-enfrenta-desafios.ghtml>. Acesso em: 5 dez. 2023.

30 BADE, S. O; TOMOMEWO, O. S.; MEENAKSHISUNDARAM, A.; FERRON, P.; ONI, B. A. Economic, social, and regulatory challenges of green hydrogen production and utilization in the US: a Review. **Science Direct.**, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923041587?casa_token=5ZazxYXQsY4AAAAA:BRuq75cB4QrOI8epH2WTpZWNDdPh3R97cAbm1pNLOrSPCa8m3qeLKN6b2-SBYOWQ5Is3yLWf8uc. Acesso em: 25 jan. 2024

31 TARKOWSKI, R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. **Science Direct.**, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119300528>. Acesso em: 15 fev. 2024

32 MACHADO, Maria Clara. Petrobras planeja US\$ 5,5 bilhões em renováveis, hidrogênio e captura de carbono entre 2024 e 2028. **MegaWhat**. 24.Nov.2023. Disponível em: <https://megawhat.energy/noticias/empresas/151868/petrobras-planeja-us-55-bilhoes-em-renovaveis-hidrogenio-e-captura-de-carbono-entre-2024-e-2028>. Acesso em: 03 abr. 2024.

33 REUTERS. Petrobras planeja ter 2 unidades piloto de hidrogênio verde, no Nordeste e no Sudeste. **TERRA**. 11 abr. 2024 . Disponível em: <https://www.terra.com.br/economia/petrobras-planeja-ter-2-unidades-piloto-de-hidrogenio-verde-no-nordeste-e-no-sudeste.35adcd06952dea884a722b42844d0c10czqsdf4x.html>. Acesso em: 19 abr. 2024.

34 REUTERS. Petrobras vai investir R\$ 90 mi em planta para hidrogênio de baixo carbono. **CNN**. 07. fev. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/negocios/petrobras-vai-investir-r-90-mi-em-planta-para-hidrogenio-de-baixo-carbono/>. Acesso em: 01. abr. 2024.

35 IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal. Disponível em: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024

36 GIZ – GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro. **GIZ**, Oct. 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 01 mai. 2024.

37 OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. Panorama do Hidrogênio no Brasil. **Repositório IPEA**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 02 mai. 2024.

38 IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The future of hydrogen. Paris: **IEA**, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3OMZx0M>. Acesso em: 02 mai. 2024

39 METRÓPOLES. Primeiro projeto-piloto de energia eólica offshore é anunciado no RJ. **METRÓPOLES BRASIL**. 24 jul. 2024. Disponível em: <https://www.metropoles.com/brasil/primeiro-projeto-piloto-de-energia-eolica-offshore-e-anunciado-no-rj>. Acesso em: 15 jan. 2024.

40 PORTAL DO AÇU. Fortescue Future Industries e Porto do Açu unem forças para desenvolver planta de hidrogênio verde no Brasil. **Portal do Açu**. 2021. Disponível em: <https://portodoacu.com.br/fortescue-future-industries-e-porto-do-acu-unem-forcas-para-desenvolver-planta-de-hidrogenio-verde-no-brasil>. Acesso em: 03 abr. 2024

41 DIÁRIO DO PERNAMBUCO. Cop 28 em Dubai: Pernambuco lança estratégia estadual de hidrogênio verde e anuncia investimento de R\$20 milhões na planta de Suape. **Diário do Pernambuco**. 2023. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/economia/2023/12/cop-28-pernambuco-lanca-estrategia-estadual-de-hidrogenio-verde.html>. Acesso em: 7 abr. 2024

42 EPBR. Voltalia planeja produção de hidrogênio e metanol verde no Porto de Suape. **Agência epbr**. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/voltalia-planeja-producao-de-hidrogenio-e-metanol-verde-no-porto-de-suape/>. Acesso em: 7 abr. 2024

43 EPE. MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2). 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2>. Acesso em: 18 fev. 2024

44 ONU. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. **Organização das Nações Unidas Brasil**. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15. mai. 2024.

45 Gondal, I. A. (2019). Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas. **Sustainable Energy & Fuels**, 3(6), 1468-1489.

46 Rodríguez, J.; Amores, E. CFD Modeling and Experimental Validation of an Alkaline Water Electrolysis Cell for Hydrogen Production. **Processes** 2020, 8, 1634.

47 DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen Production: Electrolysis. **Energy.gov**. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>. Acesso em: 15 jan. 2024

48 NIEKERK, R.; MANITA, R. Thermal management in green hydrogen production: design considerations. **Hydrogen Tech World**. Disponível em: <https://hydrogentechworld.com/thermal-management-in-green-hydrogen-production-design-considerations>. Acesso em: 08 fev. 2024.

49 Gaikwad, P. S.; Mondal, K.; Shin, Y. K.; van Duin, A. C. T.; Pawar, G. Enhancing the Faradaic efficiency of solid oxide electrolysis cells: progress and perspective. **Materials Science for Energy Technologies**. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-Solid-Oxide-electrolysis_fig3_354158680. Acesso em: 20 jan. 2024.