



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

LARA MARIA SALES DOS SANTOS SOUSA

**POTENCIAL DO CEARÁ PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE VIA
ELETRÓLISE DA ÁGUA RESIDUAL ATRAVÉS DA ENERGIA EÓLICA**

FORTALEZA

2022

LARA MARIA SALES DOS SANTOS SOUSA

POTENCIAL DO CEARÁ PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE VIA
ELETRÓLISE DA ÁGUA RESIDUAL ATRAVÉS DA ENERGIA EÓLICA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Fernanda Leite Lobo

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S697p Sousa, Lara Maria Sales dos Santos.
Potencial do ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica / Lara Maria Sales dos Santos Sousa. – 2022.
75 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Fernanda Leite Lobo.

1. Hidrogênio verde. 2. Energia eólica. 3. Água residual. 4. Eletrólise. I. Título.

CDD 621.042

LARA MARIA SALES DOS SANTOS SOUSA

POTENCIAL DO CEARÁ PARA OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE VIA
ELETRÓLISE DA ÁGUA RESIDUAL ATRAVÉS DA ENERGIA EÓLICA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Aprovada em: 18/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Fernanda Leite Lobo (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Enga. Daniela Telles
Utilitas Pecém

Aos meus pais, por serem um exemplo constante de força, persistência e resiliência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais e a minha irmã, por serem a base da construção dos meus sonhos. Ao meu pai sou grata por me ensinar sobre humildade, isso permitiu que eu fizesse laços de amizade incríveis, a minha mãe por me ensinar a ter força de vontade e a não desistir frente as adversidades e a minha irmã por me ensinar sobre dedicação e esforço. Vocês são minha linguagem de amor favorita.

Aos professores da EEEP Alan Pinho Tabosa, que me mostraram que era possível ingressar na Universidade Federal do Ceará e acreditarem no meu potencial. Obrigada por todos os ensinamentos multidisciplinares.

Ao PRECE e em especial às pessoas que compunham o projeto Letras Solidárias, vocês foram meu primeiro lar em Fortaleza e me fizeram sentir parte de algo maior.

A RETEC Jr. e aos membros que com quem pude trabalhar, dividir experiências e compartilhar conhecimento. O Movimento Empresa Júnior me formou para além do profissional.

Aos meus amigos, em especial a aqueles compõem o grupo "Engenharia de Apoio", vocês de fato foram um apoio, principalmente nos semestres finais onde foi árduo conciliar a vida acadêmica com a profissional. Obrigada por tornarem possível.

Aos meus amigos de trabalho em especial àqueles que me ouviram e colaboraram no período de escrita desta pesquisa: Bruna, David, Lindinês, Laryssa e Micael, vocês fazem os dias serem mais coloridos e divertidos, obrigada pelo apoio emocional e profissional. E também a aqueles que seguraram as demandas quando precisei me ausentar, em especial a Larissa, por ser uma líder admirável.

Às pessoas que me ajudaram em vários momentos desta pesquisa e contribuíram da melhor forma possível, muito obrigada, Amanda Ingrid, Mirella, Catarina, Pamela e Ivo, em especial agradeço ao Hariel pelo direcionamento e ajuda, foi essencial para conclusão deste trabalho.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, sou grata do fundo do meu coração por ter dividido a caminhada com pessoas como vocês ao meu lado em especial aqueles que estavam presentes desde o início: Jessyane e Amanda, vocês fazem parte da minha história.

Em especial, agradeço a duas grades amigas: Catarina por ser tão presente em vários momentos ao longo da graduação, por me fazer enxergar que era possível e me acalmar em vários trabalhos e provas, sem você teria sido bem difícil. E, a minha amiga Pamela, com quem possuo uma conexão que vai além das palavras, obrigada por despertar um sentimento de pertencimento e de acolhimento quando cheguei em Fortaleza, você foi e é parte da minha família. Agradeço por serem absolutamente tudo aquilo que a amizade verdadeira significa e serem um ombro amigo para vida inteira, a jornada é mais leve com vocês.

Ao Ivo por ser a pessoa mais compreensível e entusiasmada que conheço. Obrigada por vibrar pelas minhas conquistas e, principalmente, por acreditar em mim mais que eu mesma. Você me inspira e desperta o melhor de mim.

A Maria Amanda, pelos anos de amizade, pela torcida, pelas palavras gentis e por ser uma amiga para todos os momentos.

Por fim, aos docentes da Universidade Federal do Ceará, em especial a minha orientadora, Fernanda Leite, por ter aceitado o convite, suas contribuições elevaram este trabalho a outro patamar. E, a professora Fabíola Almeida e a engenheira Daniela Telles, por terem aceitado compor a banca desta pesquisa. Ter mulheres como vocês, compondo a minha banca, me faz enxergar que podemos ir muito além.

“O conhecimento deve ser usado para contribuir não para impressionar.”

(Max Gehringer)

RESUMO

Grande parte da energia mundial é produzida através de combustíveis fósseis, o que acarreta a liberação de gases de efeito estufa, e por sua vez, no aquecimento global que o foco de iniciativas para redução do aumento da temperatura na Terra. O hidrogênio verde surge como um elemento importante para redução dos impactos ambientais, uma vez que sua produção pode ocorrer através de processos eletrolíticos da água alimentados por fontes renováveis de energia. Neste trabalho, foi realizada uma análise do potencial de geração do hidrogênio verde através de uma fonte de eletricidade renovável: a energia eólica que funcionará como propulsora de um sistema de eletrólise alcalina utilizando água proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto no estado do Ceará. Em sequência, foi estimado a quantidade de água residual tratada no estado que foi de 11.629.440 L/h e o potencial eólico, de acordo com o Atlas Eólico e Solar do Ceará, que foi de 362.162 GWh gerados anualmente. Admitiu-se que toda a água residual disponível no Ceará será dividida em: água de resfriamento e água de processo para produção deste elemento químico, foi estimada a capacidade de produção de 11.618.370 Nm³ de hidrogênio por hora. Por fim, foi realizada uma análise econômica, de modo a avaliar os custos que envolvem a produção do hidrogênio verde a partir da água residual e da energia eólica e foi obtido um valor entre US\$ 2,44/kg e US\$ 2,701/kg. Concluiu-se que, os custos têm capacidade de serem reduzidos com um fornecimento de energia elétrica menos custoso e taxas de juros mais baixas, além da possibilidade de a água residual ser ofertada de forma gratuita pela concessionária. Dessa forma, o propósito deste estudo foi concluído que é a avaliação do potencial do Ceará para geração de hidrogênio verde através de dois parâmetros (água residual e energia eólica) e, de acordo com a análise realizada, há recursos suficientes para implementação desta tecnologia, uma vez que, possivelmente, não será instalada uma planta eletrolisadora visando a utilização de todo o recurso eólico e de água residual disponível no estado.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; energia eólica; água residual; eletrólise.

ABSTRACT

Much of the world's energy produced through fossil fuels, which is the temperature, the measurement of greenhouse gases and in turn, does not refer to that the focus of global initiative to increase the Earth's rise. Green hydrogen appears as an important element for environmental impacts, since its economy can occur through the electrolytic processes in water using renewable energy sources. In this work, an analysis of the potential for generating green hydrogen was carried out through a source of electricity: a wind energy that will work as a propellant for an alkaline electrolysis water system using Sewage Treatment Stations in the state of Ceará. In sequence, the amount of treated wastewater in the state was estimated, which was 11,629.40 L/h and the potential wind state, with the Ceará Wind and Solar Atlas, which was 362,162 GWh generated annually. The wastewater available in Ceará was assumed to have all processing capacity: cooling water and water for the production of this chemical element, an estimated production of hydrogen per hour. Finally, an analysis was carried out in order to evaluate the production of green hydrogen from energy and economic wastewater and a value between US\$ and US\$ 2.01/kg was analyzed. It was concluded that the costs have the ability to be reduced with a lower cost of electricity supply and lower interest rates, in addition to the possibility of residual water being offered free of charge by the energy concessionaire. In this way, the purpose of this study was concluded that it is the evaluation of the hydrogen potential of Ceará for the generation of green hydrogen through two parameters (wastewater and wind energy) and, according to the analysis carried out, there are sufficient resources for the implementation of this technology, since, possibly, an electrolyser plant will not be installed to use all the residual water resource available in the state.

Keywords: Green hydrogen; wind energy; waste water; electrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Energia específica de diferentes combustíveis.	20
Figura 2: Processo de eletrólise da água.....	26
Figura 3: Funcionamento de um eletrolisador alcalino.	28
Figura 4:Diagrama dos eletrolisadores em paralelo (a) e em série (b).....	29
Figura 5: Funcionamento de um eletrolisador do tipo PEM.	30
Figura 6: Esquema de funcionamento de um eletrolisador SOE.....	32
Figura 7: Parâmetros de transporte e tratamento da água antes da entrada no eletrolisador.	33
Figura 8: Ciclo do tratamento de esgoto e água.	34
Figura 9: Fluxo da produção de hidrogênio: produtos e aplicações.	37
Figura 10: Processo de osmose reversa para tratamento de água para eletrólise.	38
Figura 11: Processo de troca iônica para tratamento de água para eletrólise.	39
Figura 12: Componentes da <i>nacele</i>	42
Figura 13: Potencial eólico anual do Ceará a 150 m de altura.	44
Figura 14: Produção de hidrogênio através da energia eólica.	46
Figura 15: Eletrolisador Alcalino.	51
Figura 16: Mapa das mesorregiões do Estado do Ceará.....	54
Figura 17: Resumo dos resultados da pesquisa.	61
Figura 18: Custo do hidrogênio 2020-2050.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do hidrogênio.	24
Tabela 2: Classificação dos tipos de água segundo a ASTM.	33
Tabela 3: ETEs do Ceará por tipo de processo.	36
Tabela 4: Especificação do consumo de água de três fornecedores de eletrolisadores alcalinos.	48
Tabela 5: Especificações do eletrolisador alcalino da Thyssenkrupp.	51
Tabela 6: Parâmetros de engenharia e custo de alto nível para resfriamento e tratamento de água para produção de hidrogênio através da eletrólise.	59
Tabela 7: Análise econômica.	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Métodos de produção de hidrogênio a partir das três principais matérias-primas utilizadas: combustíveis fósseis, água e biomassa.....	25
Quadro 2: Produção de energia anual esperada em GWh à 150 m de altura por Microrregião Cearense.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Custo da produção de hidrogênio a partir de plantas eólicas.	65
Gráfico 2: Custo da produção de hidrogênio x Custo da água.	67
Gráfico 3: Custo da água em um dia de produção.....	67
Gráfico 4: Custo da produção do hidrogênio em função do payback - parâmetro taxa.	68
Gráfico 5: Custo da produção do hidrogênio em função do payback - parâmetro período de .	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CNI	Confederação Nacional da Indústria
COELCE	Companhia de Eletricidade do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EMAs	Estações Meteorológicas Automáticas
EPC	Estação de Pré-Condicionamento
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FSA	Filtro Submerso Aerado
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GTZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Iplanfor	Instituto de Planejamento de Fortaleza
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
Semace	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
SOE	<i>Solid Oxid Electrolyzers</i>
UASB	Reatores Anaeróbicos de Fluxo Ascendente
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivo Geral	23
2.2	Objetivos Específicos	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	Tecnologia do Hidrogênio	24
3.2	Eletrólise da água	25
3.3	Tecnologia dos eletrolisadores de água	27
3.3.1	<i>Eletrolisadores Alcalinos</i>	27
3.3.2	<i>Eletrolisadores PEM</i>	29
3.3.3	<i>Eletrolisadores Óxido Sólido</i>	31
3.4	Recurso hídrico no Ceará para eletrólise	32
3.4.1	<i>Parâmetros da água de alimentação do eletrolisador</i>	32
3.4.2	<i>Disponibilidade da água residual no Ceará</i>	34
3.5	Tecnologias de tratamento para água de alimentação da eletrólise	37
3.5.1	<i>Osmose Reversa</i>	38
3.5.2	<i>Deionização</i>	39
3.6	Tecnologias de resfriamento para produção de hidrogênio verde	40
3.7	Energia eólica	41
3.7.1	<i>Aspectos Técnicos</i>	41
3.7.2	<i>Potencial do Ceará na geração de energia eólica</i>	43
3.7.3	<i>Produção de hidrogênio verde integrada a energia eólica</i>	45
4	METODOLOGIA	47
4.1	Classificação da Pesquisa	47
4.2	Análise da água residual para produção de hidrogênio verde	47
4.2.1	<i>Estimativa do consumo de água para produção de hidrogênio verde</i>	47
4.2.2	<i>Potencial da água residual no Ceará para geração do hidrogênio</i>	49
4.3	Análise Energética da Produção de Hidrogênio Verde via Energia Eólica	50
4.3.1	<i>Eletrólise Da Água: Consumo de Energia e Eficiência</i>	50
4.3.2	<i>Potencial Eólico para geração de Hidrogênio Verde no Ceará</i>	52

4.4	Análise da Quantidade de Hidrogênio Produzido.....	54
4.5	Análise Econômica	55
4.5.1	<i>Custo da Produção do Hidrogênio</i>	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Análise do Consumo de Energia Elétrica e Eficiência do Eletrolisador	61
5.2	Análise do Potencial Eólico no Ceará	62
5.3	Análise Quantitativa de Hidrogênio no Ceará.....	62
5.3.1.	<i>Análise Quantitativa de Hidrogênio em Fortaleza.....</i>	63
5.4	Análise Econômica	64
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis, desde a Revolução Industrial, são as principais fontes de geração de energia, no entanto, nos últimos anos eles vêm sofrendo um declínio. Devido às mudanças climáticas, vários países estão desenvolvendo estratégias de mitigação dos gases de efeito estufa e roteiros de descarbonização para revisão de seus sistemas e infraestruturas de energia. Segundo a *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, (2022) à medida que esses programas são desenvolvidos espera-se que o hidrogênio verde produzido faça parte do processo de transição energética mundial,

A produção de hidrogênio, na maioria dos casos, está sendo realizada através da utilização de combustíveis fósseis, ou seja, ocorre a emissão de CO₂. Segundo Suleman *et al.*(2015), 48% do hidrogênio é obtido através do gás natural, 30% na indústria petrolífera, 18% através da gaseificação do carvão, 3,9% através da eletrólise e 0,1% através de outros processos. No entanto, apenas a produção de hidrogênio através de fontes renováveis pode ser considerada verde, ou seja, de modo que não haja a emissão de gás carbônico no processo.

A eletrólise da água é considerada um dos métodos mais limpos para obtenção de hidrogênio, uma vez que consiste na dissociação das moléculas da água e seus elementos hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), através da utilização de energia elétrica. Dessa forma, a eletrólise da água combinada com fontes de energias renováveis como solar fotovoltaica, eólica, hidráulica e entre outras, é considerada uma forma limpa e sustentável de obtenção de hidrogênio (ZENG; ZHANG, 2010).

Nessa perspectiva, segundo a IRENA (2022), será necessário um aumento na capacidade de fabricação e implantação de eletrolisadores, visto que a demanda por hidrogênio verde será crescente. Logo, a capacidade instalada de eletrolisadores de água precisa crescer para aproximadamente 350 GW até 2030, acima da capacidade de eletrólise de aproximadamente 0,5 GW atualmente disponível.

Além disso, como o recurso hídrico é o principal fator para a produção do hidrogênio verde a partir de eletrolisadores, a água de processo deve ser de uma fonte que não comprometa o fornecimento de outras fontes, logo uma alternativa bastante viável é a utilização da água residual ou da água do mar dessalinizada.

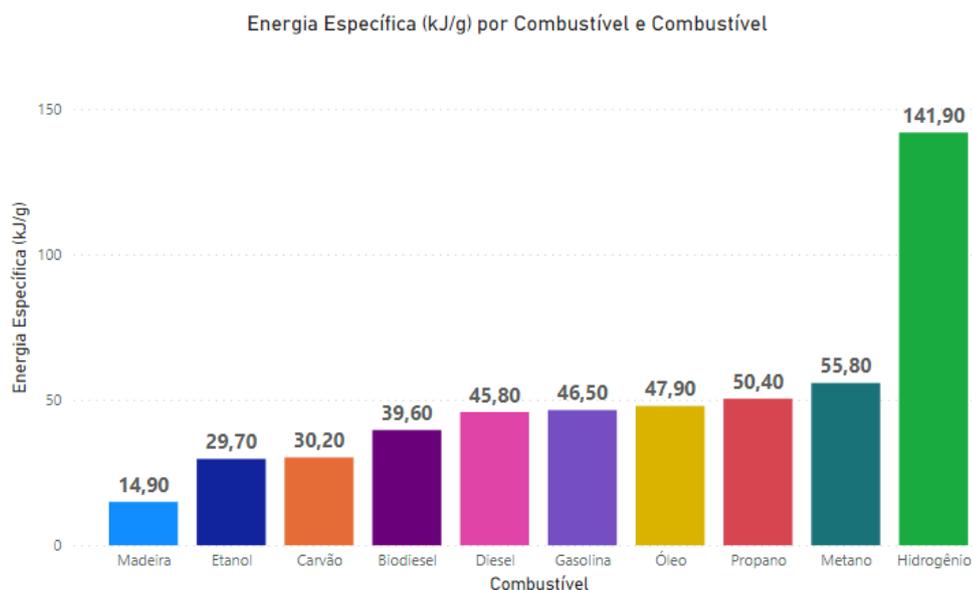
As fontes renováveis de energia como solar e a eólica, são abundantes no estado do Ceará, dessa forma a fonte eólica será objeto de estudo neste trabalho. Segundo Granovskii *et al.*(2007), é mais atraente a produção de hidrogênio de forma limpa por meio da eletrólise da

água através de uma fonte de elétrica renovável do que através de combustíveis fósseis, uma vez que seu estudo demonstrou que o declínio no custo das emissões de gases de efeito estufa é cerca de quatro vezes menor se o hidrogênio gerado a partir de fontes renováveis substituísse o hidrogênio produzido a partir do gás natural.

Há uma tendência mundial na utilização do hidrogênio como vetor alternativo para os combustíveis fósseis através do uso de sistemas conversores, como as células combustíveis, que são capazes de promover a transformação de energia química em outras formas de energia, associadas a motores elétricos em veículos automotores, por exemplo. No entanto, o uso do hidrogênio vai para além do campo dos meios de transporte, uma vez que esse elemento tem se mostrado bastante aplicável para geração distribuída de energia elétrica, principalmente associado às fontes eólica e solar, uma vez que o H₂ pode ser tido como um meio de armazenar a energia contida nessas fontes que são intermitentes (BERNARDI JUNIOR, 2009; SULEMAN; DINCER; AGELIN-CHAAB, 2015).

Além disso, segundo Suleman *et al.*(2015), o hidrogênio é um transportador de energia de alta qualidade, que tem capacidade de ser usado com alta eficiência e zero emissões ou quase zero emissões; ele exibe o maior valor de aquecimento por massa entre todos os combustíveis químicos, conforme Figura 1 e é ecologicamente correto, além de possuir propriedade eletroquímicas atrativas que podem ser utilizadas em uma célula a combustível. E, o hidrogênio pode ser armazenado de diversas formas, como na forma gasosa que é adequada para um armazenamento em larga escala, na forma líquida ou na forma de hidretos metálicos para ser conveniente ao armazenamento em pequena escala.

Figura 1 : Energia específica de diferentes combustíveis.



Fonte: Suleman *et al.*(2015) (Adaptada pela autora).

Através do Acordo de Paris, estabelecido em 2015, foi abordado uma série de ações que visam a redução na emissão dos Gases de Efeito Estufa de modo a limitar o aumento da temperatura média global a 2°C. As determinações estão presentes no artigo 2º, inciso I:

1. O presente Acordo, no reforço da implementação da Convenção, incluindo seu objetivo, visa a fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas, no contexto do desenvolvimento sustentável e os esforços para erradicar a pobreza, incluindo ao:

- (a) Manter o aumento da temperatura média global bem abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas;
- (b) Aumentar a capacidade de adaptar-se aos impactos adversos das mudanças climáticas e fomentar a resiliência ao clima e o desenvolvimento de baixas emissões de gases de efeito estufa, de uma forma que não ameace a produção de alimentos;
- (c) Promover fluxos financeiros consistentes com um caminho de baixas emissões de gases de efeito estufa e de desenvolvimento resiliente ao clima.

Além disso, o estado do Ceará apresentou o plano Ceará 2050 que através de uma plataforma possui uma área de resultados em que engloba o tópico intitulado de “Valor para a sociedade” que está em linha com a agenda 2030 da Organização das Nações Unidas de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Dessa forma, na área do plano de geração de valor para a sociedade existe a subárea de “Cadeias Produtivas”, na qual contempla a reinvenção setorial com o aproveitamento das vantagens competitivas dos setores mais

expressivos do estado e dentro desse está englobado energia limpa e renovável e recursos hídricos, de acordo com os objetivos 4 e 6 presentes no relatório de 2018:

Objetivo 4: Consolidar o Ceará como o maior produtor e distribuidor nacional de energia de fontes limpas e renováveis (solar, eólica, biocombustíveis), aproveitando a atuação na cadeia para o desenvolvendo de produtos e serviços de alto valor agregado na indústria e no campo a partir de processos inovadores e sustentáveis.

Objetivo 6: Elevar ao grau de excelência a gestão de recursos hídricos (uso, reuso e reaproveitamento econômico e racional da água) do Ceará e mitigação dos impactos das mudanças climáticas no território do semiárido (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2018).

Além disso, a capital do estado apresenta o Plano Fortaleza 2040 coordenado pelo Instituto de Planejamento de Fortaleza (Iplanfor), o qual apresenta em suas metas a redefinição da matriz energética em favor das fontes renováveis e também a universalização do esgotamento sanitário.

Até 2040, Fortaleza deve universalizar a oferta de esgotamento sanitário beneficiando 100% dos domicílios da cidade, demandando grande volume de investimento que leva a um aumento continuado no período 2017/2040. Parte de um patamar de 50,2%, estimado para 2015 e se eleva de forma lenta nos primeiros anos e se acelerando a partir de 2025 como resultado da implementação dos investimentos (IPLANFOR *et al.* 2019).

Em um cenário mundial em que o petróleo ainda é uma das principais fontes para obtenção de produtos químicos e combustíveis líquidos faz-se necessário uma mudança de panorama a fim de atender aos objetivos listados na agenda 2030 da ONU, que podem ser definidos como “um apelo à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade”.

A água residual será a fonte considerada neste trabalho para o processamento da eletrólise pelo fato de o Ceará ser um estado com baixa disponibilidade hídrica, que apresentou secas ao longo dos anos. A energia eólica será o meio provedor de eletricidade neste trabalho, pelo fato de que em 2021, segundo o *Renewable 2022 Global Status Report* da REN 21 (2022), o Brasil foi o terceiro país no ranking de capacidade recém-instalada de energia eólica, que representou aproximadamente 66% das novas instalações na América Latina e Caribe. O mercado cresceu mais de 60% em relação ao ano de 2020, com 3,8 GW instalados para um total de 21,6 GW. A energia eólica gerou mais de 72 terawatts-hora (TWh) de eletricidade (um

aumento de mais de 26%) e foi a segunda maior fonte de geração no Brasil em 2021. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o Nordeste é o maior gerador de energia eólica do país, representando 85,6% de todo o potencial do Brasil em 2020. O Ceará foi o terceiro com maior geração no período de 2020 com 5,95 TWh (ABEEÓLICA, 2020).

Nesse contexto, é perceptível que há o incentivo do Poder Público na produção de energias limpas e renováveis, além de ações voltadas para o aumento do volume de água residual tratada no estado. Cabe ressaltar que, o estudo para instalação do *hub* de produção de hidrogênio verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, conta com a possibilidade de a água de processo ser advinda de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) da Região Metropolitana de Fortaleza. Logo, esta pesquisa apresenta-se como uma forma de contribuir para a transição energética do estado através de fontes renováveis.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Analisar o potencial cearense de produção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual utilizando energia eólica.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantar os tipos de tecnologias utilizadas para eletrólise da água;
- Avaliar a disponibilidade de água residual para geração de hidrogênio no Ceará;
- Analisar os tipos de tratamento de água de alimentação para realização da eletrólise;
- Analisar a capacidade do potencial eólico cearense para atender a produção de hidrogênio verde no estado.
- Estimar a quantidade de hidrogênio verde que poderá ser gerado no Ceará a partir da água residual.
- Analisar economicamente a produção do hidrogênio verde a partir da água residual no Ceará.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tecnologia do Hidrogênio

O hidrogênio foi descoberto em 1766 por Henry Cavendish através de um experimento em que ele adicionou ácido em ferro e observou a formação de bolhas que queimavam e provocavam explosões com o ar. Lavoisier decidiu nomear esse elemento de hidrogênio, que significa, em grego, formação de água pelo fato de haver formação de água nas explosões (LAMEIRAS, 2019).

O hidrogênio é formado apenas por um próton e um elétron e é encontrado, mais comumente, na forma gasosa compondo o gás H_2 . Esse, é bastante leve quando comparado aos outros combustíveis, que é uma vantagem para utilização em foguetes e jatos, no entanto, atualmente, as pesquisas estão concentradas para formas de gerar energia elétrica e energia térmica através deste componente. Suas grandezas podem ser observadas na Tabela 1 (SILVA, 2016, apud GOMES NETO, 2005).

Tabela 1: Características do hidrogênio.

Características do hidrogênio	
Grandeza	Valor
Densidade (à 0°C e 0,1013Mpa)	0,0899 kg/Nm³
Ponto de Ebulição (à 0,1013Mpa)	-252,8°C
Concentração Inflamável	4% a 75% de H₂ por volume

Fonte: Gomes Neto, 2005 (Adaptado pela autora).

Atualmente, a utilização deste elemento como vetor energético vem sendo avaliada como uma das formas mais promissoras, principalmente se associada a células de combustível, para geração de energia elétrica. O hidrogênio pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas como a água, biomassa e combustíveis fósseis, através de processos como: reforma do gás natural, processos termoquímicos, reforma em fase líquida da biomassa, processos biológicos da biomassa e eletrólise da água. No Quadro 1 é possível identificar os métodos de obtenção do hidrogênio e a matéria-prima utilizada nesses processos (Sá *et al.*, 2014).

Quadro 1: Métodos de produção de hidrogênio a partir das três principais matérias-primas utilizadas: combustíveis fósseis, água e biomassa.

Matérias-primas	Métodos
Combustíveis fósseis	Reforma a vapor do gás natural; Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados; Gaseificação do carvão.
Água	Eletrólise da água; Processos foto-eletróquímicos; Processos termoquímicos.
Biomassa	Processos biológicos (biofotólise da água, foto-fermentação e fermentação anaeróbica); Gaseificação da biomassa; Reforma a vapor do etanol; Reforma em fase líquida.

Fonte: Sá *et al.*, 2014.

A energia liberada pela combustão do hidrogênio é de 141,9 kJ/g considerando o máximo de calor que pode ser liberado. Dessa forma, a quantidade disposta por unidade de massa pela combustão do hidrogênio é maior que a de outros combustíveis. Portanto, o hidrogênio é tido como um dos elementos mais eficientes, pois quanto maior for a quantidade de energia que um combustível consegue liberar, mais eficiente ele pode ser considerado, uma vez que resultará em uma maior conversão de energia mecânica e elétrica (SILVA, 2016).

Sabendo disso, o hidrogênio verde pode ser obtido de diversas formas, no entanto, o teor de carbono gerado nesse processo produtivo permite sua caracterização em: hidrogênio preto, marrom, cinza, azul, branco, turquesa, musgo e por fim verde. Uma vez que, esse último é produzido a partir de fontes renováveis de energia, como a energia eólica, solar, biomassa e entre outras fontes, que possibilitam a não emissão de gás carbônico no processo de produção do hidrogênio.

3.2 Eletrólise da água

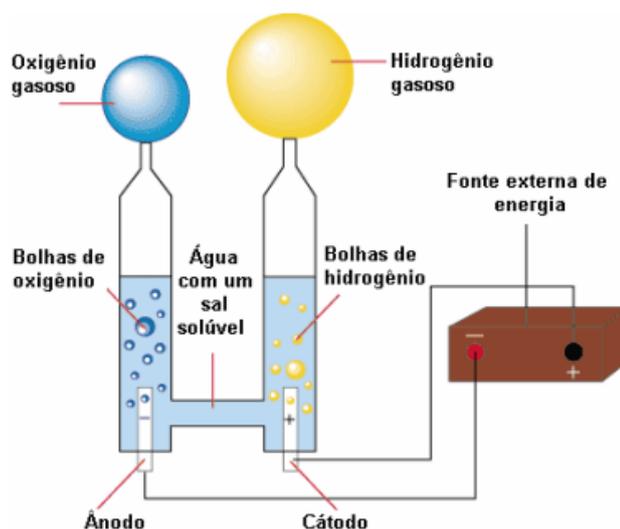
O começo da história da eletrólise da água se deu no ano de 1800, quando Anthony Carlisle e William Nicholson descobriram a capacidade da água de se decompor em hidrogênio e oxigênio através da eletricidade. Nesse contexto, em 1902 havia em funcionamento 400 unidades de eletrólise de água, em 1939 entrou em operação a primeira planta eletrolisadora de água com capacidade de 10.000 Nm³ H₂/h e em 1948 houve a construção do primeiro

eletrolisador industrial pressurizado por Zdansky e Lonza. Essas importantes descobertas possibilitam o início dos estudos em relação às formas de eletrolisar a água conhecidas nos dias de hoje. (KREUTER; HOFMANN, 1998)

A eletrólise da água é um processo que possibilita a produção de hidrogênio e oxigênio gasoso, que é obtido através da molécula de água que, com a ação da eletricidade, transforma-se em um cátion e um ânion em seus estados elementares, conforme mostrado na Equação 1 e na Figura 2.



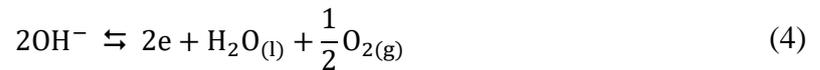
Figura 2: Processo de eletrólise da água.



Fonte: Longo *et al.* (2008).

Os íons H^+ e OH^- são formados a partir da quebra das ligações covalentes de hidrogênio e oxigênio da molécula de água, mostrado na Equação 2. Dessa forma, o cátion H^+ é descarregado no polo negativo (cátodo) produzindo H_2 através de uma reação de redução, apresentado na Equação 3, e o ânion OH^- é descarregado no polo positivo (ânodo) através de uma reação de oxidação produzindo O_2 , conforme Equação 4. Assim, o H_2 se concentra no cátodo e o O_2 no ânodo (SILVA, 2016) A reação global da eletrólise da água pode ser vista na Equação 5.





A produção do hidrogênio através da decomposição da água é uma das formas mais limpas de produção do hidrogênio verde, uma vez que, a eletricidade necessária advém de uma fonte renovável de energia como solar, eólica, maremotriz, geotérmica e entre outras. Além disso, o processo de eletrólise da água ocorre nos chamados eletrolisadores que são classificados de acordo com o eletrólito que podem ser eletrolisadores alcalinos, eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM) e eletrolisadores de óxidos sólidos (SOE).

3.3 Tecnologia dos eletrolisadores de água

3.3.1 *Eletrolisadores Alcalinos*

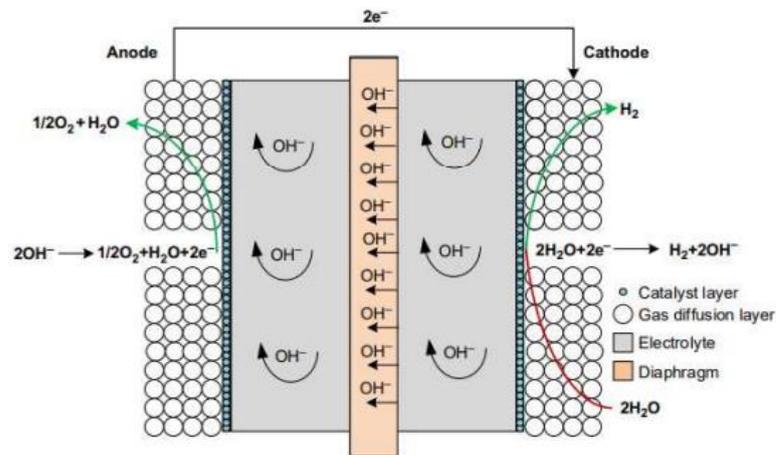
O eletrolisador do tipo alcalino (AEL) tem seu princípio de funcionamento baseado em eletrólitos de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH). Além disso, as temperaturas de operação podem variar de 60° C a 100°C, e a pressão costuma estar entre uma faixa de 1 bar a 30 bar, no entanto há modelos que funcionam à pressão atmosférica e outros que chegam até 448 bar (GAMBETTA, 2010; SOUTO; NOGUEIRA, 2022). A densidade de corrente dos AEL industriais encontra-se entre 1000 A/m² e 3000 A/m², e, com o aumento dessa, há uma redução na eficiência da eletrólise devido à conversão da energia elétrica em calor (ZENG; ZHANG, 2010).

O ânodo e o cátodo, imersos no eletrólito líquido que geralmente é uma solução concentrada de KOH (também podem ser, soluções de NaOH ou NaCl), são separados por um diafragma à prova de gás no qual ocorre a passagem de íons hidróxido OH⁻. Dessa forma, o processo se inicia no cátodo, no qual duas moléculas da solução alcalina de água são reduzidas em uma molécula de Hidrogênio e são formados dois íons OH⁻. O hidrogênio produzido permanece na superfície do cátodo na forma gasosa, enquanto os íons hidróxidos são transferidos através do diafragma, que contém poros que permitem a passagem desses para o ânodo devido a ação do potencial elétrico. A formação do oxigênio ocorre através da oxidação,

duas moléculas de água são oxidadas, uma molécula de oxigênio é formada e quatro átomos de hidrogênio são gerados (URSUA *et al.*, 2012; VIDAS; CASTRO, 2021). Este processo é ilustrado na Figura 3.

Em eletrolisadores alcalinos, o cátodo, comumente é de níquel com um revestimento catalítico, como a platina. No ânodo, são utilizados metais de níquel ou cobre e são revestidos com óxidos metálicos, como manganês, tungstênio ou rutênio. Além disso, o eletrólito não é consumido na reação, no entanto ele precisa de reabastecimento ao longo da reação em decorrência da existência de perdas durante a recuperação de hidrogênio (HOLLADAY *et al.*, 2009).

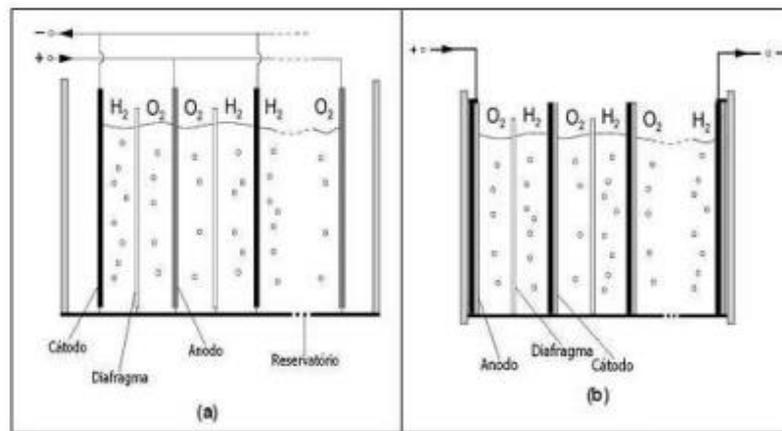
Figura 3: Funcionamento de um eletrolisador alcalino.



Fonte: Souto; Nogueira, 2022.

Os eletrolisadores alcalinos podem receber duas classificações em relação à forma em que suas células individuais são ligadas; podem ser unipolares, no qual as ligações estão em paralelo, e bipolares com as ligações em série, como pode ser visualizado na Figura 4 (GAMBETTA, 2010).

Figura 4: Diagrama dos eletrolisadores em paralelo (a) e em série (b).



Fonte: Gambetta, 2010.

Devido à diferença nas formas de ligação dos eletrodos, as reações e os potenciais de funcionamento também são distintos. Na configuração unipolar, a reação de redução ou oxidação acontece em ambos os lados do eletrodo. Na configuração bipolar, por sua vez, as semirreações de oxidação e redução ocorrem nas faces opostas dos mesmos eletrodos que não são conectados diretamente à fonte de energia, formando uma face do eletrodo que atua como cátodo e a outra como ânodo. Além disso, em processos industriais, a tensão encontrada nos eletrolisadores unipolares é de 2,2 V e esses são mais simples de serem fabricados, porém é necessária uma corrente elevada e baixas tensões, o que pode gerar uma perda ôhmica considerável. Nos eletrolisadores bipolares a tensão é de $2,2 \times (n-1)$ V, no qual “n” é o número de eletrodos, esse possui uma perda ôhmica menor, no entanto sua fabricação é mais detalhista, pois é necessário prevenir vazamentos dos gases gerados e de eletrólito entre as células. (ZENG; ZHANG, 2010).

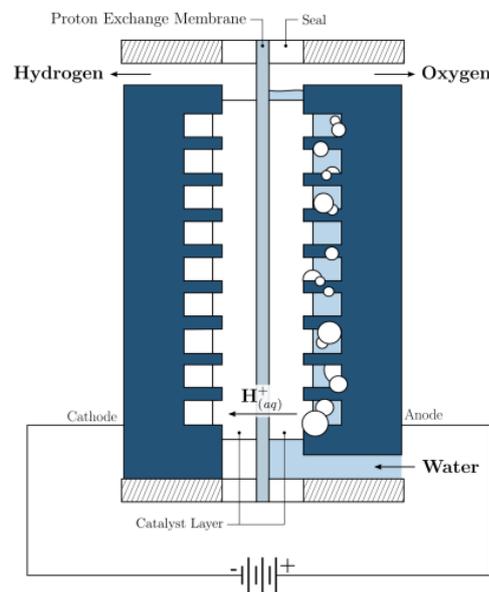
3.3.2 Eletrolisadores PEM

Segundo Palhares (2016), o eletrolisador do tipo PEM pode ser chamado de três formas: membrana polimérica de próton (*Proton Exchange Membrane*), membrana de troca de prótons e polímero de eletrólito sólido (*Solid Polymer Electrolyte*). Esse modelo de eletrolisador possui um eletrólito sólido, que é uma membrana polimérica podendo ser feita de Nafion, um polímero sulfonado. Essa membrana precisa estar hidratada para que o líquido seja absorvido e os prótons, acompanhado pelo transporte eletrosmótico de água, consigam se

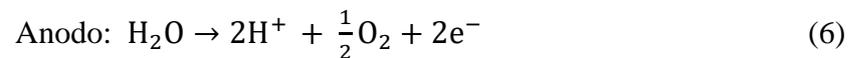
movimentar através da membrana, onde elétrons ficam fixos à sua estrutura química (BARBIR, 2005).

No eletrolisador PEM, a água é alimentada no ânodo, e é decomposta em íons hidrogênio e oxigênio através do processo eletroquímico. Dessa forma, os cátions de hidrogênio são transportados através da membrana polimérica, no qual no cátodo esses serão recombinados com os elétrons para geração do gás hidrogênio (MARSHALL *et al.*, 2007). A Figura 5 mostra esse processo e as semirreações que ocorrem no ânodo e no cátodo são descritas pelas Equações 6 e 7 respectivamente.

Figura 5: Funcionamento de um eletrolisador do tipo PEM.



Fonte: Vidas; Castro, 2021.



O eletrolisador do tipo PEM apresenta algumas vantagens, como uma maior eficiência energética que pode estar entre 55% e 70%. Os parâmetros de funcionamento do eletrolisador do tipo PEM estão entre 80°C e 100°C de temperatura e na faixa de 1 bar a 70 bar de pressão (ARNEMANN, 2019).

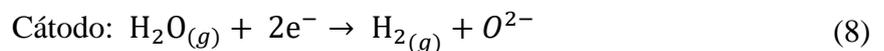
Além disso, como a membrana polimérica possui uma característica de responder rapidamente às flutuações de potência, o eletrolisador do tipo PEM consegue operar sob

regimes de energia variável. Essa é uma das diferenças ao se comparar com os eletrolisadores alcalinos, pois o transporte dos íons neste modelo apresenta uma maior inércia. (URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012).

3.3.3 Eletrolisadores Óxido Sólido

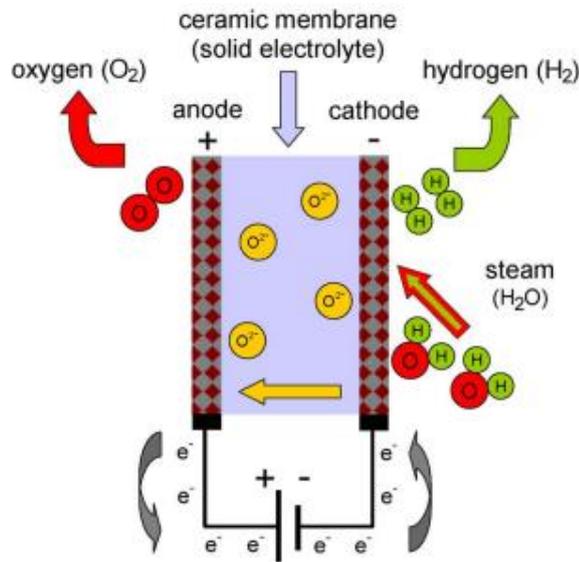
O eletrolisador do tipo óxido sólido ou SOE (*Solid Oxid Electrolyzers*) tem a característica de eletrolisar a água em altas temperaturas, ou seja, em seu estado gasoso (600° C – 900° C), em comparação aos outros dois tipos de eletrolisadores mencionados neste trabalho, o SOE possui a maior eficiência. O seu desenvolvimento está datado para a década de 1960 pioneiramente nos Estados Unidos e na Alemanha. Nessa perspectiva, o desenvolvimento do SOE pode ser entendido como o processo inverso ao funcionamento de uma célula a combustível de óxido sólido (Ursúa *et al.* 2012).

O princípio de funcionamento é através da alimentação de vapor no cátodo, no qual ocorre a produção do gás hidrogênio. Os íons de óxido gerados no cátodo passam através do eletrólito sólido até o ânodo para a formação do gás oxigênio, o circuito é fechado com os elétrons que são liberados. O processo é apresentado na Figura 6 e as semirreações podem ser observadas nas Equações 8 e 9 (Ursúa *et al.* 2012).



A utilização de um eletrolisador à base de óxido sólido, tem como uma de suas vantagens, se comparado ao eletrolisador alcalino, não possuir um eletrólito corrosivo, que normalmente é de zircônia estabilizado com ítria, que apresenta boa condutividade iônica, principalmente quando usado em altas temperaturas de operação (HOLLADAY *et al.*, 2009; Ursúa *et al.* 2012).

Figura 6: Esquema de funcionamento de um eletrolisador SOE.



Fonte: Ursúa *et al.*, 2012

A eficiência do eletrolisador de óxido sólido pode ser analisada de duas formas: em função do processo elétrico que pode ser em torno de 85% a 90% ou contabilizando as perdas térmicas do processo que pode atingir até 60% de eficiência (HOLLADAY *et al.*, 2009).

3.4 Recurso hídrico no Ceará para eletrólise

3.4.1 Parâmetros da água de alimentação do eletrolisador

Para garantir a estequiometria da reação de eletrólise da água é necessário para alimentação do processo um valor de aproximadamente 9 litros de água por quilograma de hidrogênio até no máximo 22,4 litros/kg H₂. No entanto, esse volume pode sofrer variação, por exemplo, mediante ao tipo de tecnologia usada e fonte de água (SIMÕES *et al.*, 2021).

Além disso, a qualidade da água para alimentação do processo de eletrólise é um fator determinante, uma vez que impurezas podem afetar o processo por se depositarem nos eletrolisadores, nas superfícies do eletrodo ou na membrana. Nessa perspectiva, os fabricantes têm como requisito, normalmente, uma água desmineralizada, como tipo I ou II conforme definido pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) ou com uma condutividade <5μS/cm, que é um parâmetro menos exigente (SIMÕES *et al.*, 2021). Na Tabela 2 pode-se verificar as características dos diferentes tipos de água.

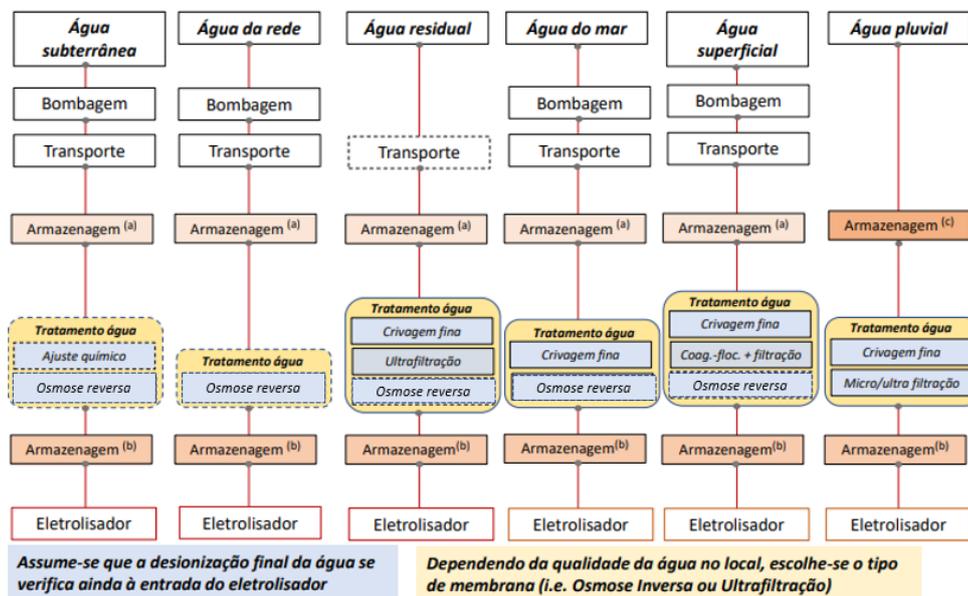
Tabela 2: Classificação dos tipos de água segundo a ASTM.

Classificação ASTM dos tipos de água				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Máxima condutividade elétrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 298K (25°C)	0,056	1,0	0,25	5,0
Mínima resistividade elétrica $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ a 298K (25°C)	18	1,0	4,0	0,2
Máximo carbono orgânico oxidável total $\mu\text{g}/\text{L}$	100	50	200	Sem limite
PH a 298K (25°C)	Não	Não	Não	5,0 a 8,0

Fonte: ASTM, 2018

Nessa perspectiva para garantir a alimentação adequada da água para a realização da eletrólise há parâmetros que devem ser atendidos em relação ao transporte e tratamento das diferentes fontes de água visando garantir um nível de qualidade prévio e posterior a eletrólise. A Figura 7 retrata essas necessidades.

Figura 7: Parâmetros de transporte e tratamento da água antes da entrada no eletrolisador.



Tanque pequeno 100 m³; b) Tanque 1000 m³; c) Lagoa 90.000 m³ cerca de 3-5 metros de altura (6 meses de armazenamento)

Fonte: Simões *et al.*, 2021.

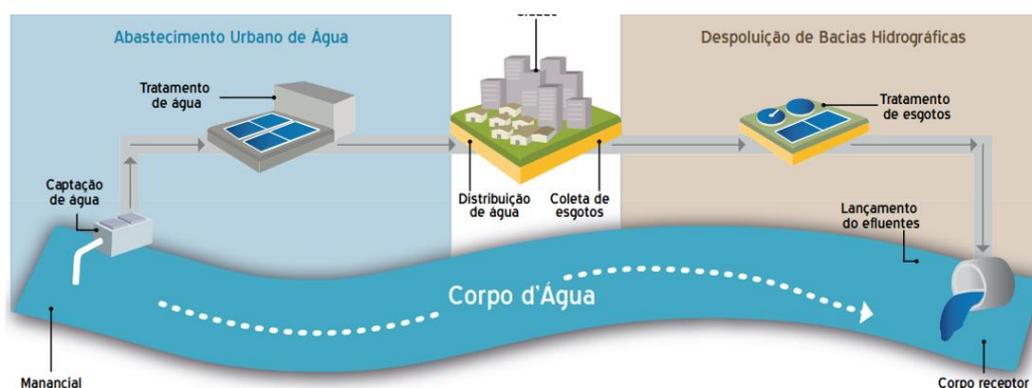
O cenário cearense tem como característica a baixa disponibilidade hídrica, principalmente devido aos grandes períodos de seca, baixos índices de chuva (inferior a 900 mm), taxas elevadas de evaporação (superiores a 2.000 mm) além de um contexto hidrogeológico desvantajoso, onde 80% do território é composto por rocha cristalina, com camada de solo raso e poucos recursos hídricos subterrâneos (FILHO, 2018).

A terminologia “hidrogênio verde” tem como ênfase na questão energética de zero emissão de poluentes, no entanto essa não leva em consideração como a água para o processo de eletrólise é obtida (JACOBS, 2020).

3.4.2 Disponibilidade da água residual no Ceará

Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Ceará tem um índice de atendimento ao tratamento de esgoto de 39,76%. Dessa forma, o esgotamento sanitário é um dos serviços que mais necessitam de análises e propostas para que melhorias sejam atingidas. Uma vez que, a carência de coleta e tratamento de esgotos nas cidades brasileiras resulta em uma parcela significativa de carga poluidora atingindo os corpos de água, causando implicações negativas aos usos múltiplos dos recursos hídricos. A Figura 8 ilustra o processo de coleta, tratamento de esgoto e lançamento dos efluentes desde a captação da água em um manancial (ANA, 2017).

Figura 8: Ciclo do tratamento de esgoto e água.



Fonte: ANA, 2017.

Dessa forma, a água residual presente no esgoto possui um grande potencial de geração de energia. Uma vez que, o hidrogênio produzido a partir da água residual, pode ser obtido através de processos biológicos, elétricos, fotônicos e térmicos, no entanto muitos outros

métodos de produção ainda estão em desenvolvimento. A obtenção do elemento através da água residual é abordada como algo promissor, devido a abundância e facilidade de acesso (AYDIN *et al.*, 2021).

No Ceará, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) está trabalhando no desenvolvimento de reutilização da água residual coletada e tratada. Além disso, o Plano de Fortaleza 2040 propõe estratégias de reutilização da água cinza em residências e condomínios (FILHO, 2018).

O Governo do Estado do Ceará publicou legislações que dispõem sobre o reuso da água. Uma delas é a Lei nº 16.033, de 20 de junho de 2016, que tem como objetivo estimular a reutilização da água no estado. A legislação abrange o reuso para fins agrícolas, florestais, ambientais, industriais e reuso na aquicultura, e outros usos não previstos devem passar por aprovação prévia da Superintendência Estadual do Meio Ambiente (Semace). Ademais, esta legislação exige que equipamentos e tubulações que contiverem água de reuso devem ser identificados (CNI, 2019).

Para utilizar a água de reuso para geração de hidrogênio verde, são exigidos alguns parâmetros que possibilitem seu processamento em um eletrolisador. É necessária a realização de um tratamento prévio que pode incluir: crivagem fina, ultrafiltração e osmose reversa, além da deionização final da água antes de entrar no eletrolisador (SIMÕES *et al.*, 2021).

Em um cenário de disponibilidade da água residual no Ceará, o estado possui Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) que são compostas por Decanto-Digestor, dentre as quais 102 possuem tratamento através de Lagoas de Estabilização, 36 tratam seus efluentes por meio de Reatores Anaeróbicos de Fluxo Ascendente (UASB) e 24 apresentam sistemas compostos por Reatores Anaeróbicos de Fluxo Ascendente seguido de Filtro Submerso Aerado (UASB + FSA). Além disso, considerando todas as ETEs e a Estação de Pré-Condicionamento (EPC) tem-se uma vazão de referência (Q_r) de aproximadamente 5.384 l/s. A Tabela 3 apresenta as Estações de Tratamento de Esgoto do estado do Ceará divididas por processo e quantidade, onde a informação “outros” é um indicativo de que se tratam de estações de pequeno porte (CNI, 2019).

Tabela 3: ETEs do Ceará por tipo de processo.

Processo	Quantidade de ETEs	Q_r (l/s)	% em quantidade	% em Q_r
Lagoas	102	2313	26,7	43,0
Preliminar/Primário	1	2300	0,3	42,7
Fossa + filtro anaeróbico	128	227,3	33,5	4,2
UASB + polímero	24	198,9	6,3	3,7
UASB	36	189,0	9,4	3,5
Outros	90	153,9	23,6	2,9
Lodos ativados	1	2,3	0,26	0,04
Total geral	382	5384	100	100

Fonte: CNI, 2019.

Nessa perspectiva, o processo de tratamento através de lagoas de estabilização, prevalece no estado do Ceará, representando 27% das ETEs e 43% em vazão. O segundo tratamento mais comum é constituído de processo preliminar (gradeado e cloração) na EPC de Fortaleza, que lança o efluente através de emissário submarino. A capital do estado, concentra 54% da vazão de tratamento de esgotos do estado, com $Q_r = 2906$ L/s (CNI, 2019).

Para produção de hidrogênio o tratamento de águas residuais poderá incluir: ultrafiltração com perdas de água de aproximadamente 10% e osmose reversa com perdas de água entre 15% e 40%. A deposição dos resíduos gerados a partir desses processos precisam passar por avaliação dos impactos ambientais causados (SIMÕES *et al.*, 2021).

A utilização da água de reuso reciclada para geração de hidrogênio verde é uma realidade para a Austrália. Nessa perspectiva, no Brasil, mais especificamente no Ceará, também existe uma grande possibilidade de utilização desse montante de água tratada, visto que o Estado possui a Lei 16.033/2016, que tem como objetivo estimular a reutilização da água no estado.

Além disso, muitas ETEs poderiam utilizar os produtos da eletrólise da água, principalmente o oxigênio puro, no processo de tratamento de efluentes, uma vez que estequiometricamente a quantidade de oxigênio gerado é metade do total produzido de hidrogênio. Com essa prática, é possível verificar a criação de uma economia circular, onde o tratamento de água residual seria parcialmente subsidiado pela produção de hidrogênio conforme mostra a Figura 9 (JACOBS, 2020).

Figura 9: Fluxo da produção de hidrogênio: produtos e aplicações.



Fonte: JACOBS, 2020. (Adaptado pela autora)

3.5 Tecnologias de tratamento para água de alimentação da eletrólise

Na produção do hidrogênio basicamente dois tipos de água são utilizados: água de processo e água de resfriamento. A água de processo é usada como insumo direto para os processos de eletrólise e a água de resfriamento, que é um fator importante para garantir plantas de geração de hidrogênio mais eficientes e confiáveis, é usada indiretamente para resfriar fluídos ou equipamentos (SIMON; DAILY; WHITE, 2010).

Dessa forma, para que a água de alimentação do eletrolisador seja considerada adequada é necessário um processo de purificação. A água de resfriamento, não precisa dos tratamentos que a água de alimentação do eletrolisador necessita, justamente por ela não ser utilizada de forma direta.

Os métodos comumente utilizados para o tratamento da água são: Osmose Reversa e Troca Iônica.

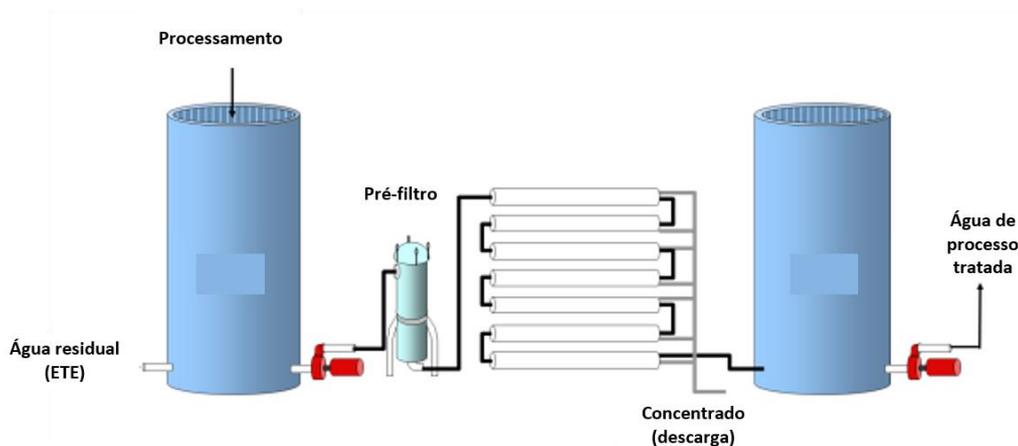
3.5.1 Osmose Reversa

A osmose natural é o movimento da água, através de uma membrana semipermeável, saindo de uma região de menor concentração de impurezas para a região de maior concentração de impurezas, esse movimento permanece até que as concentrações atinjam o equilíbrio ou que a pressão no lado de maior concentração se torne alta o suficiente para impedir o fluxo (MEIRA BRENDA, 2001).

O tratamento da água a partir da osmose reversa significa que a água será purificada através do movimento da água por uma membrana semipermeável, saindo do lado de maior concentração de impurezas devido a aplicação de uma pressão maior que a pressão osmótica para o lado de menor concentração de impurezas, ou seja, mais puro (MEIRA BRENDA, 2001).

No tratamento por osmose reversa o sistema ilustrado na Figura 10 é de fluxo contínuo, dessa forma, os contaminantes não ficam acumulados no sistema, logo esses são rejeitados, são chamados de concentrado. No entanto, existe outros tipos de arranjos, como o processo contínuo com recirculação de concentrado.

Figura 10: Processo de osmose reversa para tratamento de água para eletrólise.



Fonte: Simon *et al.*, 2010. (Adaptada pela autora).

O processo de osmose reversa permite remover a maior parte dos contaminantes orgânicos e até 99% de todos os íons. A membrana osmótica, atualmente, apresenta-se de diversos tipos devido aos avanços tecnológicos no tratamento, tais como: acetato de celulose, poliamidas aromáticas-aramidas, poliamidas hidrazidas, poliamida de composição avançada e polisulfonas (JOSÉ; FERRARO, 2008).

Além disso, a Figura 10 ilustra o pré-filtro, que significa um pré-tratamento da água a ser processada pela unidade de osmose reversa que tem como principal objetivo melhorar a eficiência e o aumento da vida útil das membranas utilizadas.

3.5.2 Deionização

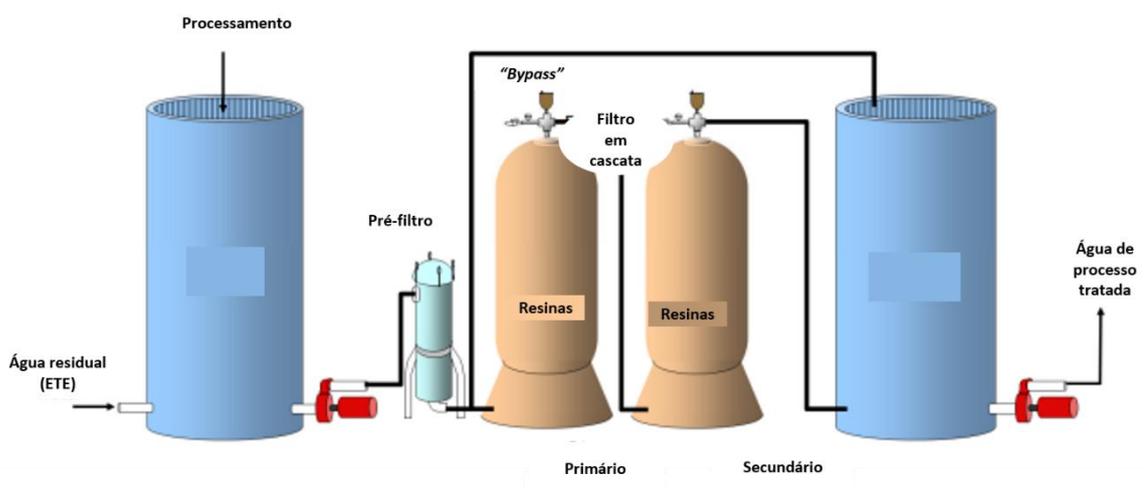
A deionização funciona através da adsorção das impurezas pelas resinas de troca iônica. De acordo com Meira Breda, 2001

As resinas catiônicas trocam seus íons hidrogênio (H^+) por contaminantes catiônicos (cálcio, magnésio, ferro, alumínio, manganês, cobre, zinco, cromo, níquel e outros metais e cátions diversos); as resinas aniônicas trocam seus íons hidroxila (OH^-) por contaminantes aniônicos (sulfato, sulfito, sulfeto, clorato, clorito, cloreto, nitrato, nitrito, fosfato, fluoreto e outros ânions, além da sílica).

Dessa forma, as resinas utilizadas na troca iônica são polímeros de origem orgânica, sulfonados e derivados do estireno e do divinilbenzeno, além disso possuem formato esférico da ordem de 0,5 mm de diâmetro (MEIRA BREDA, 2001).

O processo de troca iônica, Figura 11, consiste em passar a água através de um leito de cátions e ânions, no qual os íons H^+ e OH^- substituem os contaminantes, quando não houver mais esses íons a resina deve ser regenerada, ou seja, deve ser tratada quimicamente de modo a recuperar a capacidade de troca iônica.

Figura 11: Processo de troca iônica para tratamento de água para eletrólise.



Fonte: Simon, Daily, White, 2010. (Adaptado pela autora).

3.6 Tecnologias de resfriamento para produção de hidrogênio verde

Segundo Simon *et al*, 2010 todas as tecnologias de produção de hidrogênio produzem algum calor residual. Dessa forma, a água de resfriamento circula no equipamento de processo e, devido a absorção de energia, sua temperatura aumenta e para o equipamento de resfriamento há uma redução à medida que libera energia ao meio ambiente. As formas de resfriamento que comumente são usadas na produção de hidrogênio são as torres de resfriamento e o resfriamento a seco.

Além disso, os conceitos de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar são fundamentais para entender o princípio de funcionamento dos métodos de resfriamento. Dessa forma, a temperatura do bulbo seco do ar é a própria temperatura do gás e a temperatura de bulbo úmido é a temperatura que em regime permanente (não em equilíbrio termodinâmico) é atingida por uma pequena porção de água em contato com uma corrente de ar em condições adiabáticas, ou seja, a única troca térmica que haverá é entre o ar e o montante de água (FRANCINE CORTINOVIS; TAH WUN SONG, [s.d.]).

Nessa perspectiva, na torre de resfriamento, ocorre um processo de evaporação, uma vez que isso ocorre para o resfriamento de parte da água que recircula na torre. Ou seja, a evaporação da água causa uma redução na temperatura da água que escoar na torre de resfriamento, e esse processo é responsável por 80% do resfriamento e a diferença entre o ar e a água é responsável pelos 20% restantes (FRANCINE CORTINOVIS; TAH WUN SONG, [s.d.]).

Nos sistemas de refrigeração a seco, não há necessidade de reposição de água, uma vez que é necessário apenas uma carga inicial, e não geram águas residuais. É utilizado um trocador de calor para rejeitar o calor da água para o ar circundante.

Dessa forma, o sistema de resfriamento a seco consegue resfriar a água a vários graus da temperatura absoluta do ar circundante. As torres de resfriamento podem se aproximar da temperatura de bulbo úmido dependendo da umidade que é sempre inferior. Portanto, o sistema de resfriamento depende também da temperatura e umidade do ambiente em que será instalado.

3.7 Energia eólica

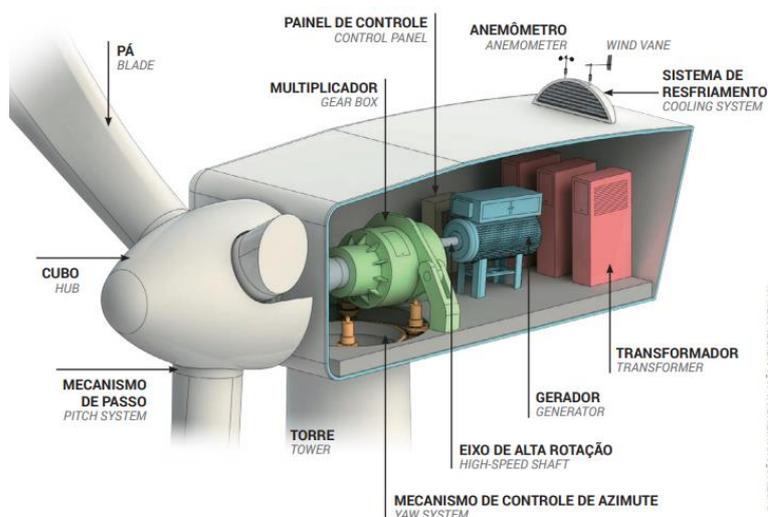
3.7.1 Aspectos Técnicos

As turbinas eólicas podem ser classificadas através da sua forma de realizar trabalho mecânico ou da conversão em energia elétrica. Essas, podem ser divididas em dois grupos: turbinas de arraste e turbinas de sustentação, além de existirem as turbinas eólicas de eixo vertical, que como o próprio nome indica, possuem eixo de rotação na vertical e as pás no entorno, onde o escoamento do fluido é paralelo ao eixo. Também existem as turbinas eólicas de eixo horizontal que necessitam de controle para que o rotor seja posicionado na direção do vento e tem seu eixo de rotação paralelo ao solo (MELO, 2012).

Nas turbinas de arraste, a velocidade das pás não pode ser superior à velocidade do vento. Dessa forma é comum a utilização de diversas pás de forma a aumentar a superfície de contato com o vento, uma vez que, com a incidência do fluido, as pás são empurradas e conseqüentemente o rotor é movimentado (MELO, 2012).

As turbinas de sustentação aplicam os conceitos dos aerofólios, visto que é gerado um diferencial de pressão entre a superfície superior e inferior da pá de forma que uma força de sustentação, responsável pela movimentação do rotor, é criada. Estas são as turbinas mais comuns ao redor do mundo para conversão de energia eólica em energia elétrica (MELO, 2012).

Os aerogeradores modernos são compostos por três pás que estão conectadas ao *hub* alojado à nacele. A nacele conecta-se à torre através de um sistema de controle azimute (*yaw*), que permite o alinhamento do rotor em relação à direção do vento, sendo composta por um multiplicador, gerador, transformador e entre outros componentes que podem ser observados na Figura 12 (ADECE, 2019).

Figura 12: Componentes da *nacele*.

Fonte: ADECE, 2019.

Para a instalação de uma usina eólica é necessário que haja a aquisição de dados do vento correspondentes ao local de operação das turbinas, uma vez que o recurso eólico é variável dependendo de fatores como complexidade da topografia e do clima da região que define sazonalidades anuais e diárias. Dessa forma, para análise da viabilidade do local de interesse, é realizada uma campanha de medição no sítio utilizando anemômetros e sensores de direção em alturas compatíveis com a do eixo do rotor a ser instalado (BURTON *et al.*, 2001).

A tendência mundial é de aumento das dimensões da turbina para elevar sua capacidade de conversão de energia e, com isso, o diâmetro dos rotores também é aumentado. Esse acréscimo no diâmetro dos rotores permite a instalação de aerogeradores em locais que possuem a velocidade do vento mais amena, uma vez que, seguindo a tendência de crescimento da energia eólica no estado, essa é uma característica relevante para novas regiões, onde os locais com as melhores condições de vento já tenham sido ocupados por outros projetos eólicos (ADECE, 2019).

O aumento do diâmetro influencia no aumento do peso das turbinas a uma razão quadrática ao raio das pás. Os principais desafios são: desenvolvimento de materiais mais leves para fabricação das pás eólicas, como por exemplo, fibra de carbono; utilização de menos aço nas torres e multiplicadores que suportem maiores cargas (ADECE, 2019).

3.7.2 Potencial do Ceará na geração de energia eólica

A energia eólica é uma fonte que está em uma curva ascendente no Brasil. A região nordeste, incluindo o estado do Ceará, oferece grande potencial de geração de energia elétrica a partir da energia dos ventos, possibilitando a venda dessa eletricidade a preços competitivos.

A maior parte da matriz elétrica brasileira é representada por energias renováveis, visto que aproximadamente 56,14% da geração de eletricidade advém de usinas hidroelétricas, no entanto, logo em seguida tem-se 24,62% de geração advinda de usinas termelétricas, sendo as fontes, principalmente, carvão mineral, gás natural e petróleo (ANEEL, 2022a).

A matriz elétrica cearense é composta, principalmente, por centrais geradoras de energia eólica representando 48,53%, seguida de usinas termelétricas que representam 41,8%. Em relação à energia eólica em fase de operação no estado, a potência outorgada é de 2.506.440 kW, significando um total de 99 centrais. Além disso, em fase de construção ou com a construção ainda não iniciada o estado possui 20 centrais que correspondem a uma potência outorgada de 668.900 kW (ANEEL, 2022b).

A energia eólica começou a ser explorada no Ceará na década de 90. Um estudo foi realizado para analisar a viabilidade da implementação e desenvolvimento de parques eólicos através do projeto “Mapeamento Eólico do Estado do Ceará”, que foi possível devido a um Protocolo de Intenções firmando entre a Companhia de Eletricidade do Ceará (COELCE) e a Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) (SILVEIRA FONTENELE; DALTRO, [s.d.]).

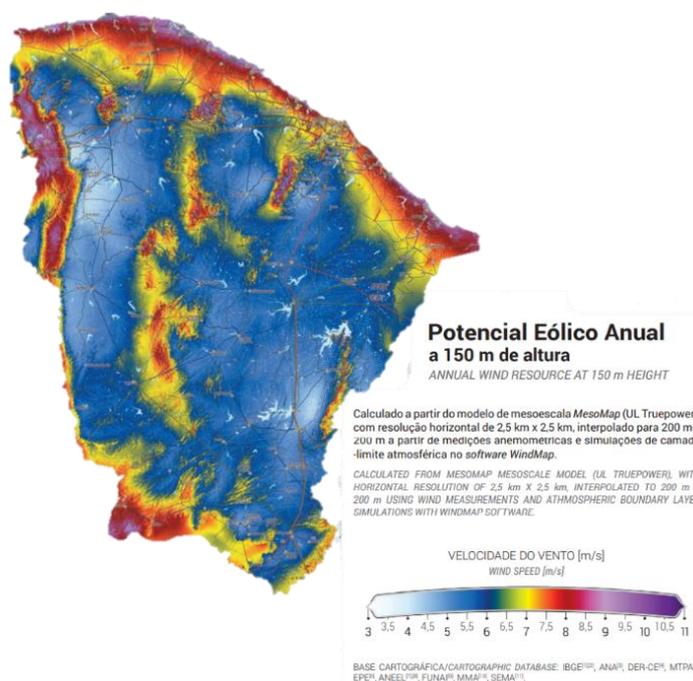
A primeira usina do estado foi inaugurada em janeiro de 1999 localizada no município de São Gonçalo do Amarante e está situada na Praia da Taíba, com capacidade de 5MW com 10 aerogeradores de 44 metros de altura e 500kW instalados. Uma segunda usina foi inaugurada em abril de 1999 no município de Aquiraz, na Prainha, com capacidade de 10MW com 20 aerogeradores de 44 metros de altura e 500kW instalados (SILVEIRA FONTENELE; DALTRO, [s.d.]).

O Ceará, por estar localizado em uma região Tropical e próximo à Linha do Equador, tem influência em seu clima, principalmente, da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em escala global e da proximidade do Oceano Atlântico, ao longo dos 573 km litorâneos, em escala regional (ADECE, 2019).

A ZCIT é um importante sistema meteorológico que atua na geração de precipitações da região equatorial e é responsável pela modulação dos ventos alísios e caracterização da estação chuvosa do estado. Além disso, a migração da ZCIT é responsável pelo enfraquecimento ou fortalecimento dos ventos alísios do Ceará, uma vez que o estado é conhecido como uma zona de ventos calmos, tendo em vista que a velocidade do vento tende a reduzir ao se aproximar do estado e intensificar-se ao se afastar (ADECE, 2019).

A Figura 13 ilustra o potencial eólico cearense, cuja estimativa foi obtida através de um sistema de modelagem em mesoescala denominado *MesoMap* (UL Truepower), além da realização de medições anemométricas validadas, organizadas e filtradas com o objetivo de eliminar distorções causadas por lacunas nas séries temporais (ADECE, 2019).

Figura 13: Potencial eólico anual do Ceará a 150 m de altura.



Fonte: ADECE, 2019.

O Ceará apresenta um potencial eólico, considerando uma altura de 150 m e uma velocidade do vento maior que 7,0 m/s, capaz de gerar 362 TWh/ano. Para fins de comparação, o desenvolvimento de 10% do potencial eólico do Ceará representa mais de três vezes da capacidade atualmente instalada no estado de 2,5 GW. Nessa perspectiva, o estado possui grande potencial de crescimento em relação a geração de energia através da fonte eólica.

Atrelando essa capacidade ao crescimento da produção de hidrogênio verde no mundo, o Ceará possui uma grande vantagem na transição energética do brasileira (ADECE, 2019).

3.7.3 *Produção de hidrogênio verde integrada a energia eólica*

No cenário atual, pode-se observar que há uma espécie de “corrida” pela liderança na produção de hidrogênio verde. Isso se deve ao fato de ser um combustível sustentável devido à sua forma de obtenção, a partir da eletrólise da água, utilizar fontes renováveis de energia, como a eólica (RODRIGUES *et al.*, [s.d.]).

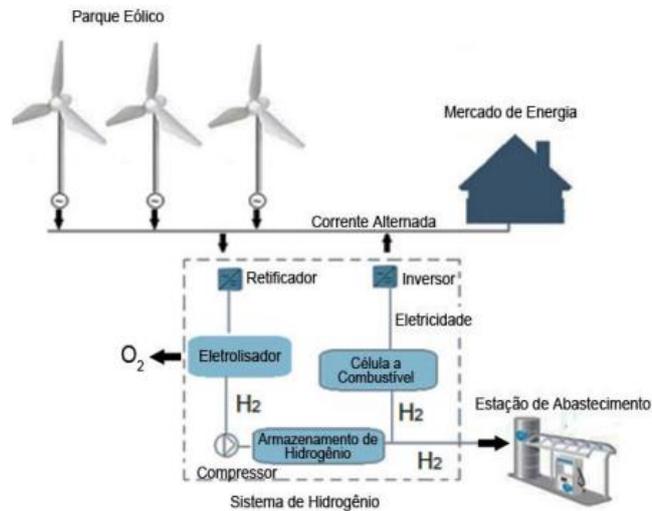
No Brasil encontram-se em fase de desenvolvimento projetos para implementação de usinas de produção de hidrogênio através da eletrólise da água, como é o caso da Usina do Porto do Pecém no Ceará, na qual é estimada a produção de 600 mil toneladas de hidrogênio por ano através da potência gerada de projetos eólicos e solares (RODRIGUES *et al.*, [s.d.]).

O Ceará é um estado privilegiado em relação a bons ventos para geração de energia eólica. Dessa forma utilizar essa energia para gerar hidrogênio verde para ser usado como combustível ou para geração de energia elétrica, coloca o estado em uma posição de destaque. Além disso, a produção do hidrogênio verde a partir da energia eólica possui um papel importante no que diz respeito ao armazenamento para um consumo posterior, uma vez que as fontes de energias renováveis, incluído a eólica, são fontes intermitentes.

Nesse cenário, a energia necessária para o processo de eletrólise deve ser aplicada quando houver ventos constantes com uma velocidade média de 6 m/s e uma velocidade mínima de 4 m/s (SILVEIRA; ZANZI, 2013). Nessa perspectiva, pode-se afirmar que o nordeste brasileiro dispõe de valores de velocidades do vento compatíveis com os valores necessários para produção de hidrogênio verde através do acionamento eólico (BRAGA, 2015).

A cadeia de valor do hidrogênio inclui três etapas: produção, armazenamento e distribuição e uso final. Ao ser produzido no eletrolisador o hidrogênio é armazenado e pode ser utilizado em uma célula combustível que possibilita a produção de energia elétrica estacionária para a rede ou destiná-lo para postos de abastecimento de veículos motores. A Figura 14 mostra um sistema eólico que produz energia para a rede elétrica e alimenta o eletrolisador para geração de hidrogênio verde (BRAGA, 2014).

Figura 14: Produção de hidrogênio através da energia eólica.



Fonte: Braga, 2014.

No Brasil, está em planejamento a utilização do hidrogênio verde em aplicações nas estacionárias de pequeno porte, beneficiando principalmente fontes alternativas de energia de micro hidrelétricas, painéis fotovoltaicos e geradores eólicos. Dessa forma, o hidrogênio funcionará como um meio armazenador. Além disso, a utilização também é prevista como fonte de abastecimento veicular (RODRIGUES *et al.*, [s.d.]).

4 METODOLOGIA

4.1 Classificação da Pesquisa

A natureza da pesquisa realizada neste trabalho é do tipo aplicada, uma vez que ao discorrer sobre o potencial da geração de hidrogênio verde através da água residual via energia eólica no Ceará objetiva, de acordo com os conceitos de Silva e Menezes (2005) gerar conhecimentos para aplicações práticas visando a solução de problemas sociais e ambientais.

Do ponto de vista da abordagem do problema, este trabalho é de caráter quantitativo e qualitativo uma vez que as informações dispostas foram classificadas e analisadas por intermédio de fontes bibliográficas, além da interpretação dos resultados de modo descritivo.

Em relação aos objetivos desta pesquisa, essa pode ser classificada como exploratória e descritiva, uma vez que segundo Silva e Menezes (2005) uma pesquisa exploratória visa proporcionar familiaridade com o problema de modo a torna-lo explícito, além da descrição de fenômenos e estabelecimento de relações entre variáveis como a determinada entre o potencial de geração de hidrogênio verde e a quantidade de água residual disponível no estado do Ceará.

No que se refere aos procedimentos técnicos esta pesquisa é do tipo bibliográfica, uma vez que foi elaborada por intermédio de materiais publicados como: artigos de periódicos, teses, monografias, livros e notícias. Além de poder ser classificada também como um estudo de caso do potencial de geração do hidrogênio verde do estado do Ceará a partir da água residual.

4.2 Análise da água residual para produção de hidrogênio verde

4.2.1 Estimativa do consumo de água para produção de hidrogênio verde

Fontes bibliográficas foram consultadas para estimar o consumo de água durante o processo de eletrólise, considerando que para obtenção do hidrogênio o processo apresenta algumas perdas.

Assume-se neste trabalho, devido a maturidade desta tecnologia estar em escala comercial, o eletrolisador do tipo alcalino. Para o qual exige água do tipo I e tipo II, segundo critérios da ASTM. Nessa perspectiva a água necessária para realização da eletrólise deve conter baixa concentração de sólidos dissolvidos, necessitando de um tratamento.

Comumente é realizada a desmineralização da água através do processo de osmose reversa, que inclui perdas de água, segundo Simões, Sofia (2021) em torno de 20% à 30%. Além disso, perdas em torno de 10% referente a vazamentos, evaporação e entre outras precisam ser consideradas. Além disso, essa água precisa ser polida por um sistema deionizador, que é um processo de troca iônica na qual os íons hidrogênio e hidroxila são substituídos completamente.

Através de uma perspectiva estequiométrica é possível afirmar que para gerar 1kg de hidrogênio são necessários 9 kg de água de alimentação. No entanto, devido aos processos de desmineralização e purificação da água, segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) (2020), o consumo pode variar entre 18 kg e 24 kg de água por quilograma de hidrogênio.

Nessa perspectiva, foi realizado um levantamento dos principais fornecedores de eletrolisadores alcalinos para produção de hidrogênio para estimar a quantidade de água necessária, os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Especificação do consumo de água de três fornecedores de eletrolisadores alcalinos.

Especificação/Fornecedor	Hydrogenics	Green Hydrogen.dk	Thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers GmbH
Consumo de água (L/Nm ³)	1,2	0,9	<1

Fonte: Elaborado pela autora com dados de (CUMMINS INC (HYDROGENICS), [s.d.]; GREEN HYDROGEN.DK, [s.d.]; THYSSENKRUPP UHDE CHLORINE ENGINEERS GMBH, [s.d.]).

Para os propósitos deste estudo, será considerado que 30% será perdido ao longo do tratamento e 10% será perdido por evaporação, vazamentos e entre outras perdas. Além disso, os eletrolisadores precisam de uma carga de resfriamento que pode atingir, segundo análises realizadas pela empresa GHD, 30L de H₂O/kg de H₂, no entanto, diferentemente da água de alimentação do eletrolisador, essa quantidade não precisa ser purificada.

4.2.2 *Potencial da água residual no Ceará para geração do hidrogênio*

Os dados de quantidade de água residual tratada no Ceará, foram obtidos por meio de pesquisas disponibilizadas na literatura referenciada. Nessa perspectiva, o cálculo da vazão de referência (Q_r) do estado foi realizado de acordo com estudo de autoria da Confederação Nacional da Indústria (2019), que seguiu os seguintes critérios para determinação da Q_r :

- 1) Os dados de vazão de projeto fornecidos pela concessionária foram priorizados.
- 2) Para ETEs que estão apenas no banco de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) foram utilizadas as vazões de projetos.
- 3) Para ETEs do banco de dados da ANA em que a vazão do projeto é nula e a afluyente é diferente de zero, considerou-se que a Q_r seria igual a $Q_{\text{afluyente}}$.
- 4) Para as ETEs que estivessem presentes nos dois bancos de dados, foram usados prioritariamente os dados da concessionária, de acordo com o critério 1. Caso não houvesse informação no banco de dados da concessionária, foram utilizados os valores do banco de dados da ANA, conforme critério 3.

Ademais, segundo a referência utilizada, o uso da vazão de projeto sobressaiu-se em relação ao da afluyente pelo fato de a vazão de projeto representar as capacidades máximas de tratamento das ETEs.

Nessa perspectiva pode-se verificar que o maior percentual de perda está relacionado ao tratamento, uma vez que, o tratamento realizado atualmente no Ceará prevê o atendimento da resolução 430/2011 de acordo com o art.16º do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que deve atender:

I - Condições de lançamento de efluentes:

- a) pH entre 5 a 9;
- b) temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 ml/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- d) regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;
- e) óleos e graxas:
 1. óleos minerais: até 20 mg/L;

2. óleos vegetais e gorduras animais: até 50 mg/L;
- f) ausência de materiais flutuantes; e
- g) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

Nessa perspectiva, os efluentes de qualquer fonte poluidora só poderão ser lançados no corpo receptor se for obedecido a resolução do CONAMA 430/2011, dessa forma, devido ao não atendimento aos parâmetros de água tipo I e tipo II para eletrólise, é necessário incluir no cálculo de consumo o tratamento de água de forma a atender os padrões do eletrolisador.

Através de um cálculo simples de porcentagem foi obtido o potencial do Ceará de utilização de água residual do Ceará. Uma vez que, partindo da vazão de referência de 5.384 L/s de água residual tratada no estado, tem-se que aproximadamente 60% desse valor pode ser convertido na geração de hidrogênio verde, visto que 40% está relacionado a perdas.

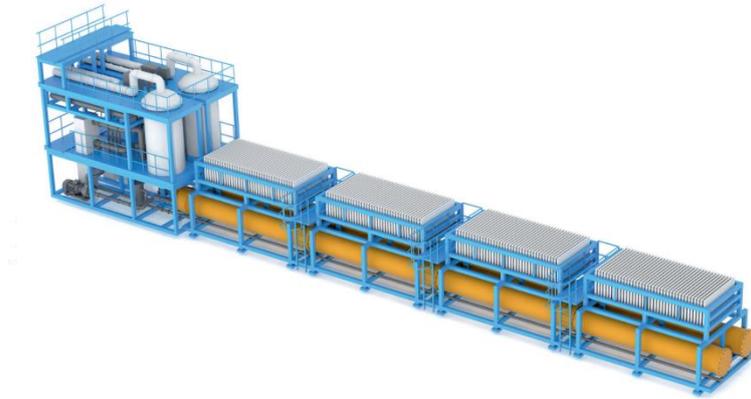
4.3 Análise Energética da Produção de Hidrogênio Verde via Energia Eólica

4.3.1 Eletrólise Da Água: Consumo de Energia e Eficiência

Um importante fator deste trabalho é estimar o consumo de energia elétrica durante a eletrólise de modo que seja possível avaliar a disponibilidade do recurso eólico. Nessa perspectiva, foi selecionado o eletrolisador da marca Thyssenkrupp por ser um dos modelos que apresentam maior potência destinada a geração do hidrogênio verde.

Objetivando a visualização e a geração de uma base de cálculo para este trabalho, a Figura 15, mostra o eletrolisador alcalino da Thyssenkrupp que possui as especificações listadas na Tabela 5.

Figura 15: Eletrolisador Alcalino.



Fonte: Thyssenkrupp, 2021.

Tabela 5: Especificações do eletrolisador alcalino da Thyssenkrupp.

Especificação	Valores
Capacidade de produção de H ₂	4000 Nm ³ /h
Potência	20 MW
Consumo de energia (CC)	4,3 kWh/Nm ³
Consumo de água (L/Nm ³)	<1L/Nm ³ H ₂
Faixa de operação	10%-100%
Qualidade do H ₂ na saída	>99,9% puro
Pressão de saída do H ₂	≈300mbar
Temperatura de operação	Acima de 90°C

Fonte: Thyssenkrupp, 2021.

Em posse dos dados disponibilizados pela fabricante Thyssenkrupp, é possível calcular a eficiência do eletrolisador da marca. De acordo com Ursúa *et al* (2012), a eficiência do eletrolisador pode ser encontrada, através da Equação 10, onde HHV representa a quantidade energia contida no hidrogênio (3,54 kWh/Nm³) e C_E representa o consumo de energia do processo de eletrólise em kWh/Nm³.

$$\eta_{Elet.} = \frac{HHV \text{ do } H_2}{C_E} \times 100 \quad (10)$$

Ademais, o consumo de energia elétrica será considerado com base no *datasheet* do fabricante considerando 4,3 kWh/Nm³ de hidrogênio produzido. Neste trabalho, também

será considerado o consumo elétrico estimado para o tratamento da água para o atender aos requisitos do eletrolisador.

4.3.2 Potencial Eólico para geração de Hidrogênio Verde no Ceará

Para avaliar o potencial do Ceará na obtenção de energia através do recurso eólico foram utilizados os dados disponibilizados pelo Atlas Eólico e Solar do Ceará, 2019. Esses dados foram obtidos através de simulação de mesoescala pela *UL TruePower* com modelagens tratadas e validadas por dados anemométricos processados pela empresa Camargo Schubert. Uma vez que, para o mapeamento eólico do estado foi utilizado um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica e dados meteorológicos e geográficos chamado de *MesoMap*. Os dados foram obtidos por meio de 52 estações meteorológicas da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), 14 Estações Meteorológicas Automáticas (EMAs) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 35 torres anemométricas.

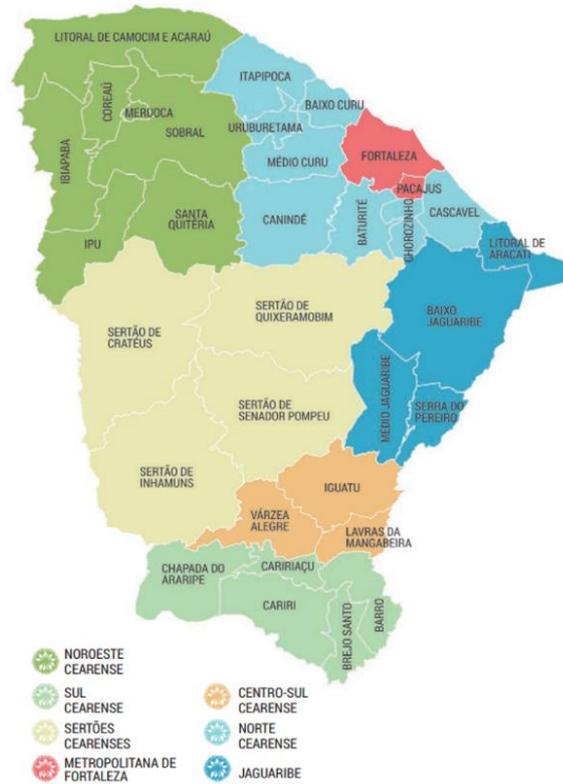
Com o intuito de descrever de forma detalhada o potencial cearense para geração eólica, pode-se observar no Quadro 2 a produção de energia anual esperada em GWh à 150 m de altura por Microrregião Cearense. Essa altura foi filtrada devido ao desenvolvimento de novas tecnologias de geração eólica estar aumentando constantemente em relação à altura das torres. Os dados que compõem essa Tabela foram obtidos através do Atlas Eólico e Solar do Ceará, 2019. As mesorregiões listadas na Tabela são apresentadas na Figura 16, que são definidas segundo critérios do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Quadro 2: Produção de energia anual esperada em GWh à 150 m de altura por Microrregião Cearense.

Mesorregião	Microrregião	Produção de Energia Anual Esperada [GWh]		
		Altura do Aproveitamento Eólico		
		150 m de altura		
		> 7,0 m/s	>7,5 m/s	> 8,0 m/s
Centro-Sul Cearense	Iguatu	1010	257	24
	Lavras da Mangabeira	5	1	0
	Várzea Alegre	145	15	2
	TOTAL	1160	273	26
Jaguaribe	Baixo Jaguaribe	12001	3931	44
	Litoral de Aracati	27998	25695	17084
	Médio Jaguaribe	10	3	0
	Serra do Pereiro	1329	544	198
	TOTAL	41338	30173	17326
Metropolitana de Fortaleza	Fortaleza	6258	1855	809
	Pacajus	108	0	0
	TOTAL	6366	1855	809
Noroeste Cearense	Coreaú	65	7	3
	Ipu	45388	38583	27246
	Ibiapaba	14706	11358	6844
	Litoral de Camocim e Acaraú	76813	49901	24414
	Meruoca	778	646	426
	Santa Quitéria	882	472	132
	Sobral	8343	2159	129
	TOTAL	146975	103126	59194
Norte Cearense	Baixo Curu	9526	5492	1538
	Baturité	402	131	73
	Canindé	2971	1446	360
	Cascavel	22070	10097	3350
	Chorozinho	0	0	0
	Itapipoca	35709	23939	8593
	Médio Curu	66	4	1
	Uruburetama	391	142	91
	TOTAL	71135	41251	14006
Sertões Cearenses	Sertão de Crateús	14219	4896	1477
	Sertão de Inhamuns	21253	4576	500
	Sertão de Quixeramobim	978	190	14
	Sertão de Senador Pompeu	3710	682	74
	TOTAL	40160	10344	2065
Sul Cearense	Barro	2121	293	16
	Brejo Santo	1053	44	9
	Cariri	11021	1481	131
	Caririáçu	161	0	0
	Chapada do Araripe	40672	31510	14485
	TOTAL	55028	33328	14641

Fonte: ADECE, 2019.

Figura 16: Mapa das mesorregiões do Estado do Ceará.



Fonte: ADECE, 2019.

4.4 Análise da Quantidade de Hidrogênio Produzido

A eficiência de uma planta de geração de hidrogênio verde está diretamente ligada a quantidade de hidrogênio que a mesma pode gerar. Nessa perspectiva, de modo a estimar o potencial de geração de hidrogênio verde a partir de águas residuais via energia eólica, foi calculada a quantidade de água residual tratada no Ceará considerando 40% de perdas, conforme citado e o montante necessário para o resfriamento do eletrolisador.

Além disso, em posse das especificações do eletrolisador da Thyssenkrupp foi possível visualizar a quantidade de hidrogênio a ser gerado e a quantidade de energia a ser consumida de maneira geral no Estado. Perdas mecânicas e térmicas do eletrolisador e das turbinas eólicas não foram consideradas.

A partir do *datasheet* do eletrolisador obteve-se a informação de que o consumo de água é de menos que 1L de água/Nm³ de H₂ e 4000 Nm³/h de produção de H₂. Nessa

perspectiva, foi considerado que é consumido exatamente 1 litro, logo serão necessários 4.000 litros de água.

Dessa forma, de acordo com o estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), 2019 o Ceará possui uma vazão de água residual tratada de aproximadamente 5.384 L/s, no entanto, a qualidade da água ao final do processo deve atender aos requisitos listados na resolução 430/2011 de acordo com o art.16º do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Porém, o processo de eletrólise alcalina solicita água tipo I ou tipo II conforme padrão ASTM, dessa forma é necessário um tratamento que atenda a esses parâmetros, além da deionização. Nesse cenário, foi considerado que esses processos e perdas secundárias representam 40% do total de água a ser consumida pelo eletrolisador, além da contabilização da água necessária para o resfriamento do eletrolisador.

Por fim, no intuito de estabelecer uma base de cálculo, foi utilizado o consumo de energia do eletrolisador referenciado de 4,3 kWh/Nm³ de hidrogênio para obter o consumo total de eletricidade para geração de hidrogênio verde somado com o consumo necessário para o tratamento da água antes de entrar no eletrolisador.

4.5 Análise Econômica

Para viabilização da análise econômica da produção de hidrogênio através da água residual foram utilizadas fontes bibliográficas para definição das equações, bem como estimativa do custo da água residual no Brasil, além da simulação de cenários com diferentes taxas de juros. O estudo da viabilidade econômica foi baseado na metodologia desenvolvida por Silveira e Gomes (1999) e por Braga (2014).

4.5.1 Custo da Produção do Hidrogênio

Para calcular o custo de produção do hidrogênio, Equação 11, é necessário considerar o investimento relacionado aos equipamentos como reformadores, eletrolisadores e reatores, custo de operação e custo de manutenção. Braga (2014), em sua metodologia, desconsiderou os custos de acessórios tais como bombas e válvulas. E, o período equivalente a utilização do eletrolisador foi de 7 horas por dia, ou seja, uma produção em 3 turnos.

$$C_{H_2} = \frac{Inv.f}{H.E_{H_2}} + C_{op} + C_{man} \quad (11)$$

Onde:

C_{H_2} : Custo de produção do hidrogênio [US\$/kWh];

Inv : Investimento no sistema de produção de hidrogênio [US\$];

H : Período equivalente a utilização [h/ano];

f : Fator de anuidade [1/ano];

C_{op} : Custo de operação [US\$/kWh];

C_{man} : Custo de manutenção [US\$/kWh].

Para obtenção do custo de hidrogênio na unidade de [US\$/kg] utilizou-se a Equação 11 para ser multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio de 33,29 kWh/h, conforme Equação 12.

$$C_{H_2} = \left(\frac{Inv.f}{H.E_{H_2}} + C_{op} + C_{man} \right) PCI \quad (12)$$

O fator de anuidade pode ser definido de acordo com as Equações 13 e 14, no qual a taxa de juros anual (%) é representado por “r” e o período de amortização em anos é representado por “k”.

$$f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1} \quad (13)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (14)$$

De acordo com o Banco Central do Brasil, a média anual de juros para o Brasil em 2021/2022 variou de 2% para 12,75%. O Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) está com a meta de 13,25% ao ano, estabelecida em julho de 2022.

Além disso, o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) lançou um programa de incentivo ao hidrogênio verde. Os recursos serão providos do Fundo do Clima destinado à cadeia de energias renováveis. Nessa perspectiva, nas operações indiretas, a taxa de juros é composta pelo custo financeiro de 1,0% ao ano, pela taxa do BNDES, a partir de 0,9% (beneficiários com receita bruta de até R\$ 90 milhões) ou 1,4% ao ano (beneficiários com receita operacional bruta acima de R\$ 90 milhões) e pela taxa do agente financeiro de até 3,0% ao ano. A taxa pode ser calculada de acordo com o Equação 15, disponibilizada pelo BNDES.

$$\text{Taxa de Juros} = \text{Fator de Custo} \times \text{Fator Taxa do BNDES} \times \text{Fator Taxa do Agente} - 1 \quad (15)$$

Dessa forma, a taxa de juros proveniente do programa de fomento do hidrogênio verde do BNDES, foi considerada de aproximadamente 1%, uma vez que a taxa do BNDES utilizada no cálculo foi de 0,9% e a taxa do agente financeiro de 3,0%. Assim, para contemplar as variações nos cálculos e para fins de comparação e visualização do impacto do incentivo do banco serão consideradas as taxas de 1%, 8% e 13,25%.

A taxa de amortização foi calculada através de estimativas considerando um terço da vida total do eletrolisador alcalino, 10 anos, uma vez que o tempo de vida total reportado é de 30 anos com necessidade de manutenções a cada 7-15 anos para substituição de componentes como eletrodos e diafragmas, segundo Bhandari, Trudewind e Zapp (2014).

A energia disponível no hidrogênio produzido poderá ser calculada através da Equação 16. Onde \dot{m}_{H_2} representa a vazão mássica em [kg/h] e PCI representa o poder calorífico inferior do hidrogênio [kWh/kg].

$$E_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI \quad (16)$$

Para fins de garantia de uma base de cálculo, será realizada a análise de viabilidade econômica considerando as especificações do eletrolisador da Thyssenkrupp citado anteriormente, dessa forma a vazão mássica total de hidrogênio é de 359,6 kg/h e poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio pode ser estimado em 33,29 kJ/kg, a partir dessas informações pode-se calcular a energia contida no hidrogênio (E_{H_2}).

O custo de investimento (Inv) depende da tecnologia escolhida do eletrolisador. Braga (2014), utiliza a metodologia do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) que

estima os custos de investimento para eletrolisadores alcalinos e PEM, sabe-se que essa metodologia, que utiliza a Equação 17 é precisa para faixa de 0,1 kg/h até 100 kg/h, no entanto, para os propósitos deste trabalho o resultado será satisfatório.

$$\text{Inv} = 224,49 \times (\dot{m}_{\text{H}_2})^{0,6156} \quad (17)$$

O custo de operação (C_{op}) depende do tipo de energia que será utilizado que, no caso da eletrólise da água serão utilizadas: água e energia elétrica, o C_{op} é dado pela Equação 18.

$$C_{op} = \frac{P_{Elet} \cdot C_{Elet}}{E_{\text{H}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}}{E_{\text{H}_2}} \quad (18)$$

Onde,

P_{Elet} : Potência elétrica consumida [kW];

C_{Elet} : Custo da eletricidade [US\$/kWh];

$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$: Quantidade de água consumida pelo eletrolisador [m³/h];

$C_{\text{H}_2\text{O}}$: Custo da água [US\$/(m³/h)].

O eletrolisador alcalino selecionado possui uma potência elétrica de 20 MW e consome menos que 1L de água/Nm³ de hidrogênio, como o eletrolisador produz 4000 Nm³/h, é necessário 4m³/h.

A tarifa de água e esgoto no Ceará, segundo revisão tarifária de 2022 realizada pela Cagece, tem média de R\$ 4,92/m³, visto que em julho de 2022 um dólar americano vale 5,33 reais brasileiro, esse valor representa US\$ 0,92/m³. Dessa forma, além da tarifa, será considerado que essa água será disponibilizada a custo zero pela concessionária, uma vez que seu destino seria o despejo em um corpo hídrico.

Além disso, sabe-se que o tratamento para atender a alimentação do eletrolisador precisa ser do tipo troca iônica ou osmose reversa. Simon, *et al* (2010), realizaram um estudo para o custo da produção de hidrogênio eletrólito com base no tratamento de água e método de

resfriamento da mesma, uma vez que a eletrólise opera em temperatura mais baixas. O estudo propôs uma planta de 1.500 kg de hidrogênio por dia, que exige cerca de 40 m³/h de água de resfriamento. A Tabela 6 evidencia os resultados obtidos.

Tabela 6: Parâmetros de engenharia e custo de alto nível para resfriamento e tratamento de água para produção de hidrogênio através da eletrólise

Tratamento e resfriamento de água para produção de 1500 kg de hidrogênio por dia				
Método de resfriamento	Torre de refrigeração	Torre de refrigeração	Resfriamento a seco	Resfriamento a seco
Tratamento da água de processo	Troca de íons	Osmose Reversa	Troca de íons	Osmose Reversa
Descarga zero?	Não	Não	Sim	Não
Retirada de água [m ³ /h]	1,81	1,99	0,47	0,65
Descarga de água [m ³ /h]	0,2	0,39	0	0,19
Consumo de energia kW	7	8,6	18,8	20,4
Custo capital (US\$)	162.000	58.000	328.000	224.000
Fixo de Operação e Manutenção (US\$/ano)	22.000	22.000	111.000	111.000
Tratamento (variável) O+M (US\$/kg H ₂)	0,22	0,02	0,21	0,01

Fonte: Simon, Daily e White (2010)

Neste estudo, o custo do tratamento (C_{trat}) será incluído no custo de operação (C_{op}), para isso será considerado o método de resfriamento torre de refrigeração e tratamento por osmose reversa, por ser um processo de baixo custo, comparado aos outros, e possuir uma boa eficiência, dessa forma, será acrescido US\$ 0,02 por kg de hidrogênio como uma forma de estimativa do custo de tratamento necessário para a água residual advinda da ETE. Além disso, será incluído também o custo da energia elétrica de acordo com o consumo de eletricidade para o tratamento que é de aproximadamente 8,6 kW. Nessa perspectiva, a Equação 19 mostra a inclusão destas variáveis partindo da Equação 18. Para o cálculo foi considerado que o eletrolisador escolhido produz 359,6 kg de hidrogênio a cada hora.

$$C_{op} = \frac{P_{Elet} \cdot C_{Elet}}{E_{H_2}} + \frac{P_{El.trat} \cdot C_{Elet}}{E_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}}{E_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot C_{trat}}{E_{H_2}} \quad (19)$$

O Custo da energia eólica foi obtido através da Empresa de Pesquisa Energética (2021), considerando os parques vencedores do Leilão de Reserva, instalados no Brasil entre

os anos 2011 e 2020 com preço de contratação média inferior a R\$ 200/MWh, isto é, US\$ 37,52/MWh ou US\$ 0,03752/kWh.

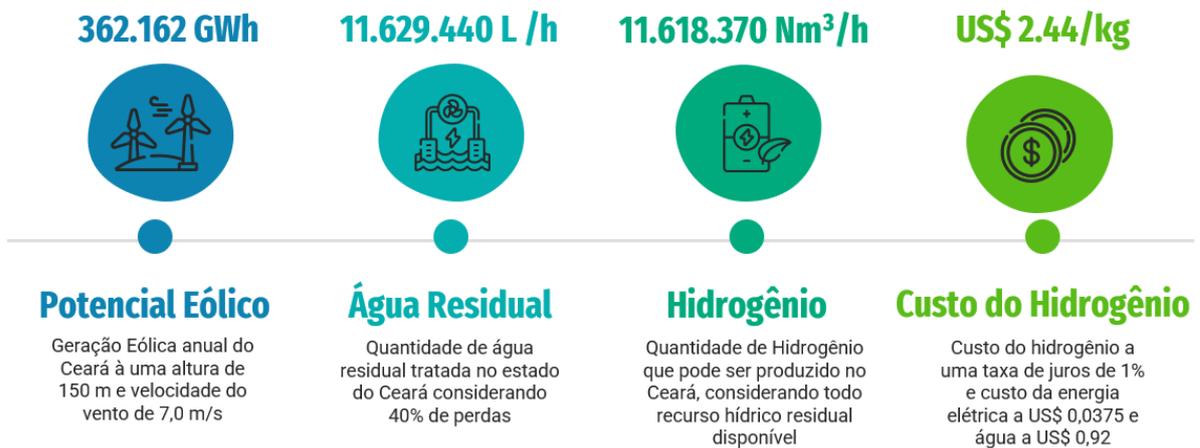
Por fim, o custo de manutenção será considerado 3% do valor do custo de investimento de acordo com Braga (2014) e é dado pela Equação 20.

$$C_{man} = \frac{Inv.f}{H.E_{H_2}} \times 0,03 \quad (20)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 17 apresenta de forma resumida os principais resultados obtidos com esta pesquisa.

Figura 17: Resumo dos resultados da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1 Análise do Consumo de Energia Elétrica e Eficiência do Eletrolisador

De acordo com as equações descritas na metodologia foi obtido o resultado do consumo de energia necessário para eletrólise e a eficiência do eletrolisador em discussão deste trabalho, da fabricante Thyssenkrupp.

Por fim, ao ser selecionado o eletrolisador, de modo a obter uma base de cálculo, a eficiência dele foi calculada através da Equação 10. Dessa forma, o eletrolisador de 20MW de potência, possui eficiência de 82,32% e capacidade de produzir 359,6 kg de H₂ /h, uma vez que 1Nm³/h é equivalente à 0,0899 kg/h de hidrogênio. Isso representaria um consumo de aproximadamente 4.000 L de água, visto que o eletrolisador necessita de menos que 1L de água para cada 1Nm³ de hidrogênio.

5.2 Análise do Potencial Eólico no Ceará

Através dos dados obtidos do Atlas Eólico e Solar do Ceará se destacam para o aproveitamento do potencial eólico a região litorânea e as regiões de serra no interior do Ceará. O Noroeste Cearense apresenta o maior potencial eólico do Estado, visto que a microrregião do Litoral do Camocim e Acaraú tem potencial, segundo dados do Atlas Eólico e Solar do Ceará, de 19,5 GW a 150m de altura, seguida da Ibiapaba com 11,1 GW, ao todo a mesorregião apresenta cerca de 37 GW de capacidade instalável eólica a 150 m de altura.

Ainda segundo dados do Atlas Eólico e Solar do Ceará, 2019, a microrregião de Itapipoca apresenta o maior potencial a 150 m de altura, de aproximadamente 9,1 GW, seguida pela microrregião de Cascavel com 5,8 GW. Somadas, as mesorregiões Norte Cearense e Metropolitana de Fortaleza compreendem um potencial de 20,2 GW para exploração eólica. Nos Sertões Cearenses, a microrregião com maior potencial eólico é do Sertão de Inhamuns com 6 GW, seguido pelo Sertão de Crateús, com 4 GW. No litoral, é observado o maior potencial eólico da mesorregião do Jaguaribe com 6,6 GW, a 150 m de altura. Por fim, nas mesorregiões Centro Sul e Sul Cearense somadas o potencial dos ventos é de 15,1 GW a 150 m. A região

Dessa forma, através dos dados disponibilizados pelo Atlas Eólico e Solar do Ceará, o estado possui capacidade de gerar anualmente aproximadamente 362.162 GWh à uma altura de 150 m e velocidade do vento de 7,0 m/s.

5.3 Análise Quantitativa de Hidrogênio no Ceará

Para a análise quantitativa da produção de hidrogênio foi considerado os valores disponibilizados pelo *datasheet* do eletrolisador ao invés da estequiometria da dissociação da água.

Dessa forma, considerando que o processo de purificação e as perdas secundárias representam 40% do total de água a ser consumida pelo eletrolisador na geração do hidrogênio verde, o Ceará apresenta um potencial de 3.230,4 L/s, de água tratada que poderiam ser utilizados na eletrólise.

A quantidade de água estimada, através de fontes bibliográficas, para o resfriamento é de 30L de H₂O/kg de H₂, nessa perspectiva, considerando que o eletrolisador da Thyssenkrupp produz 359,6 kg H₂/h, 11.070 litros de água serão necessários para o resfriamento do eletrolisador a cada hora.

Nesse sentido, 3.230,4 L/s representam 11.629.440 L de H₂O /h, no qual desse montante, 11.070 L/h serão destinados para o resfriamento, dessa forma 11.618.370 L de H₂O /h poderão ser utilizados para geração de hidrogênio . Portanto, o Ceará através da água residual apresenta uma capacidade de produzir, 11.618.370 Nm³ de hidrogênio por hora que é o total gerado por aproximadamente 2.904 eletrolisadores do modelo da Thyssenkrupp de 20 MW de potência.

Dessa forma, isso significa que, com base neste eletrolisador, para produzir 11.618.370 Nm³ de hidrogênio é necessário um consumo de energia elétrica de aproximadamente 49,95 GWh. Além disso, a energia elétrica necessária para o tratamento da água é de 8kW, dessa forma, a cada hora serão necessários 8 kWh de energia elétrica para purificação da água residual.

5.3.1. *Análise Quantitativa de Hidrogênio em Fortaleza*

Além disso, a análise também pode ser realizada de forma mais específica, apenas para a capital do estado, uma vez que mais da metade da vazão de água residual tratada no Ceará está concentrada em Fortaleza. Dessa forma, a vazão de referência é de 2.906 L/s, no entanto, apenas 60% tem capacidade de ser utilizada para a produção de hidrogênio verde, devido às perdas citadas neste trabalho, logo a disponibilidade, apenas de Fortaleza, de água residual tratada é de 1.743,6 L/s ou 6.276.960 L/h.

Nesse contexto, 6.265.890 L de água a cada hora poderão ser utilizados para eletrólise, uma vez que 11.070 L/h serão destinados para o resfriamento da planta eletrolisadora, assim a quantidade de hidrogênio que a cidade de Fortaleza tem capacidade de produzir é de 6.265.890 Nm³ que representa um total de 1.566 eletrolisadores de 20 MW de potência da fabricante Thyssenkrupp e um consumo de eletricidade de 26,94 GWh e 8 kWh para tratamento da água residual.

5.4 Análise Econômica

A análise econômica foi realizada de acordo com as equações mencionadas neste trabalho, além disso, todos os parâmetros foram definidos como constantes, exceto a taxa de juros que é suscetível à flutuação do mercado, dessa forma, foram considerados dois valores 8% e 13,25% de modo a prevenir variações e também foi calculado com a taxa a 1% advindo do incentivo do BNDES.

Os valores encontrados estão dispostos na Tabela 7, considerando a produção de hidrogênio verde a partir da água residual via energia eólica.

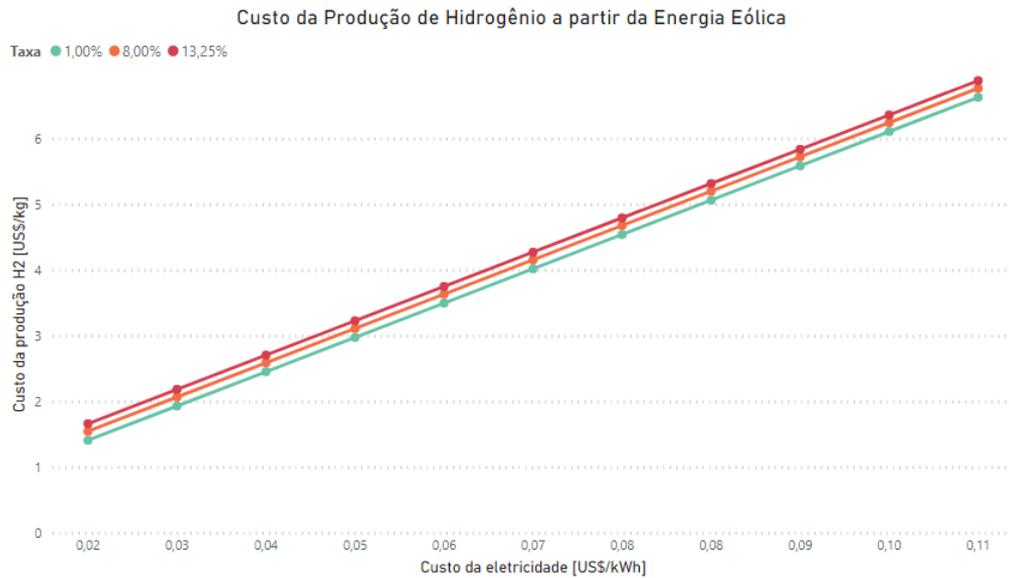
Tabela 7: Análise econômica.

Resumo dos valores utilizados na análise econômica			
Fonte de energia	Potencial Eólico	Potencial Eólico	Potencial Eólico
Investimento [US\$]	8.405.423,44	8.405.423,44	8.405.423,44
Taxa de juros [%]	1%	8%	13,25%
Amortização [anos]	10	10	10
Período de utilização [h/ano]	7665	7665	7665
Energia disponível do hidrogênio [kW]	1188	1188	1188
Potência do eletrolisador [kW]	20000	20000	20000
Custo da eletricidade [US\$/kWh]	0,0375	0,0375	0,0375
Custo da água [US\$/(m ³ /h)]	0,92	0,92	0,92
Custo de Operação [US\$/kWh]	0,0636	0,0636	0,0636
Custo do hidrogênio [US\$/kWh]	0,0736	0,0777	0,0811
Custo do hidrogênio [US\$/kg]	2,445	2,586	2,701

Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 1 mostra o custo de produção do hidrogênio levando em consideração as taxas de juros de 1%, 8% e 13,25% e o custo da energia eólica. Referente ao custo de eletricidade foram considerados valores entre R\$ 100/MWh e R\$ 600/MWh.

Gráfico 1: Custo da produção de hidrogênio a partir de plantas eólicas.

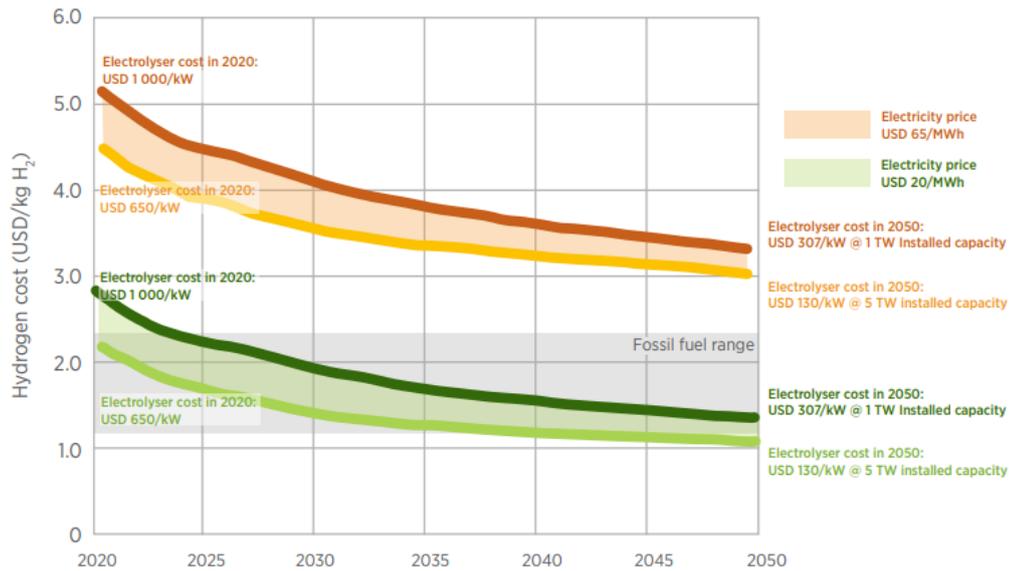


Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos pelo Gráfico 1, é notável que o custo da eletricidade impacta bastante no custo de produção do hidrogênio verde, uma vez que o aumento entre R\$ 100/MWh e R\$ 600/MWh representa no custo do hidrogênio um aumento de aproximadamente 471%, 438% e 415% para cada uma das taxas de 1%, 8% e 13,25% respectivamente.

Valores similares são apresentados pela IRENA (2020), na qual foi realizado um estudo do custo da produção de hidrogênio verde em função da implantação de um eletrolisador, usando um preço de eletricidade médio de US\$ 65/MWh e baixo de 20/MWh durante o período de 2020-2050, de acordo com a Figura 18.

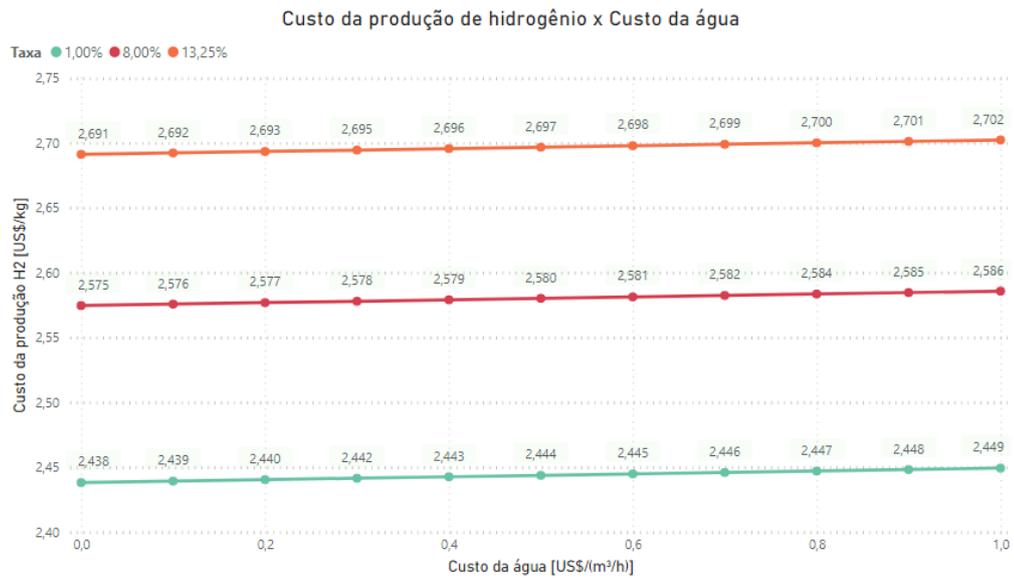
Figura 18: Custo do hidrogênio 2020-2050.



Fonte: IRENA, 2020.

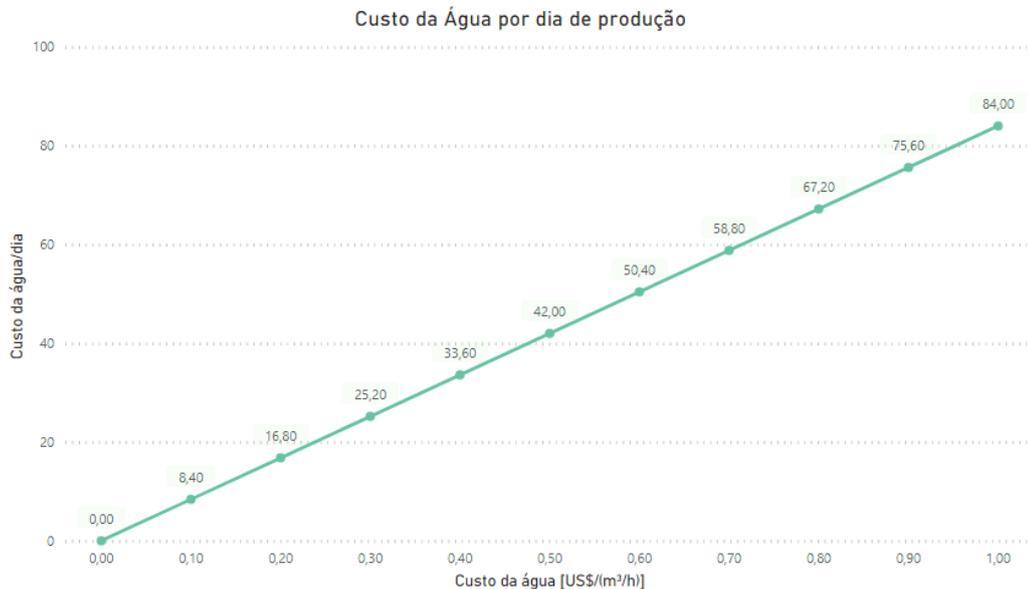
Para a análise do impacto do custo da água no processo de fabricação do hidrogênio, em que a quantidade necessária para geração do eletrolisador da Thyssenkrup é de 4.000L/h, ou seja, 4m³/h, foi analisado considerando o custo nulo até US\$ 1,00 m³/h. A partir do Gráfico 2, é perceptível que a taxa de juros em conjunto com o custo da água impacta diretamente no custo final do hidrogênio. Além disso considerando que haverá uma produção de hidrogênio de 21 horas por dia e que o consumo total de água seria de 84.000 litros/dia ou 84 m³/h, o custo da água passa a representar um valor ainda mais significante por produção diária, conforme Gráfico 3.

Gráfico 2: Custo da produção de hidrogênio x Custo da água.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 3: Custo da água em um dia de produção.



Fonte: Elaborado pela autora.

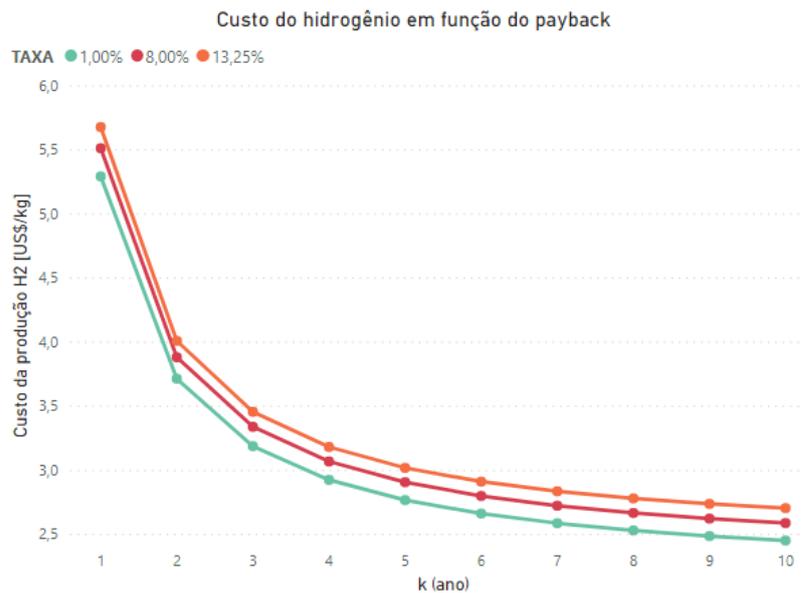
Nessa perspectiva, a partir do gráfico 3, pode-se perceber que a água a US\$ 0,92/m³ representa, em um dia de geração de 7.551,6 kg de hidrogênio, um custo de US\$ 77,28 por dia, considerando 21 horas de produção. No entanto, esse custo apresenta possibilidade de ser

reduzido a zero ou bem próximo de zero, apenas para custear operação e manutenção da ETE, uma vez que essa água não possui um destino comercial no estado do Ceará.

Além disso, é possível perceber, no Gráfico 1 e Gráfico 2 que incentivos nos investimentos do hidrogênio verde, como o proposto pelo BNDES, representa um fator de redução no custo de produção do hidrogênio na ordem de 9,4% considerando valor nulo em relação ao custo da água a taxa de 1% e 13,25%. Em relação a eletricidade, admitindo-se um custo de R\$ 100/MWh e comparando-se nas mesmas taxas o percentual de aumento no custo do hidrogênio é de aproximadamente 18%.

Por fim, ao realizar a análise do *payback* de custo do hidrogênio, admitindo-se um período de operação de 7665 horas por ano, iniciou-se em US\$ 5,29/kg, US\$ 5,51/kg e US\$ 5,67/kg para as taxas de juros de 1%, 8% e 13,25% respectivamente e no nono ano os valores para essas mesmas taxas eram de US\$ 2,48/kg, US\$ 2,62/kg e US\$ 2,73/kg, conforme apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4: Custo da produção do hidrogênio em função do *payback* - parâmetro taxa.

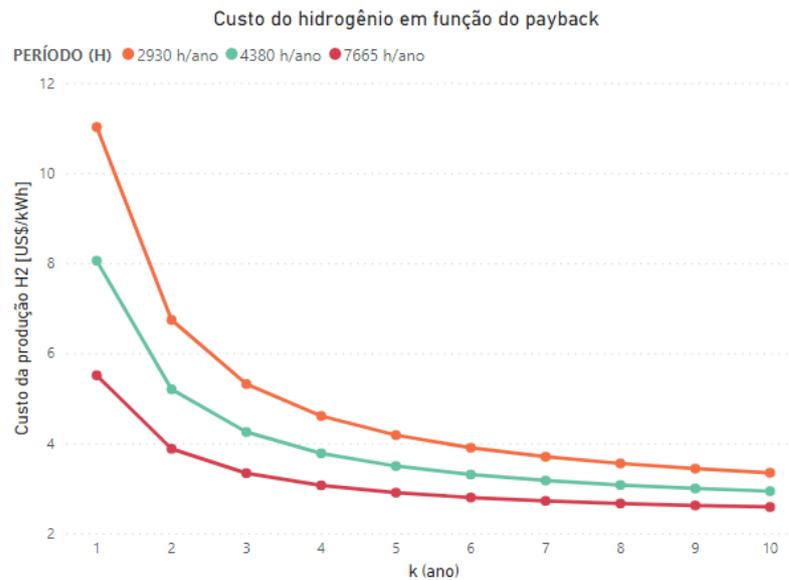


Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse contexto, de acordo o Gráfico 5, fixando-se uma taxa de juros de 8% e variando o período de operação em 2920 h/ano (8 h/dias), 4380 h/ano (12 h/dia) e 7665 (21 h/dia), é possível observar que quanto menor for o período de operação maior será o custo de

produção do hidrogênio. Uma vez que, para 2930 h/ano de produção o valor iniciou em US\$ 11,02/kg e no décimo ano foi de US\$ 3,35/kg. Para um período de 4380 h/ano o valor inicial foi de US\$ 8,05/kg e no décimo ano de US\$ 2,94/kg. Por fim, para 7665 h/ano o valor do primeiro ano foi de US\$ 5,51/kg e no décimo ano foi de 2,58/kg.

Gráfico 5: Custo da produção do hidrogênio em função do *payback* - parâmetro período de operação (H).



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, com o aumento do período de amortização e com o aumento do período de produção do hidrogênio os custos são reduzidos. Além disso, os custos de investimento influenciam diretamente no valor do hidrogênio, conforme Equação 12. Ademais, o custo de operação neste trabalho se refere a compra de eletricidade, ao custo da água e ao custo de tratamento da água.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa almejou identificar o potencial cearense na geração de hidrogênio verde através da água residual a partir da energia eólica, dessa forma, por meio de análises técnicas e econômicas na qual foi utilizada fontes bibliográficas para identificar a disponibilidade de água residual e o montante de energia eólica que pode ser gerado no estado.

Nessa perspectiva, o acervo bibliográfico disponível foi revisado de modo que viabilizasse a compreensão da situação atual do Ceará, além de definições técnicas importantes para o completo entendimento dos resultados encontrados neste trabalho.

Dessa forma, de modo a avaliar a disponibilidade de água residual no estado para geração de hidrogênio foi encontrado um volume disponível de aproximadamente 11.629.440 L H₂O/h e a capacidade total de produção do hidrogênio no estado, através da água residual disponível, foi de aproximadamente 11.618.370 Nm³, admitindo-se, também, a necessidade de resfriamento da planta eletrolisadora. Além disso, o consumo de energia elétrica encontrado foi de aproximadamente 49,95 GW, devido ao modelo do eletrolisador selecionado, além de 8kWh destinados ao tratamento da água.

Para a capital do estado, o volume de água residual é de aproximadamente 6.276.960 L/h, logo a capacidade de produção de hidrogênio é de 6.265.890 Nm³, devido a necessidade de resfriamento da planta eletrolisadora. O consumo de energia elétrica calculado foi de 26,94 GWh mais 8kWh referentes a adequação da água residual para alimentação do eletrolisador.

Através da revisão do Atlas Solar e Eólico do Ceará foi possível obter a capacidade do potencial eólico cearense que foi de 362.162 GWh/ano. Isto significa que há energia eólica disponível para atender plantas eletrolisadoras no estado, logo conclui-se que a energia elétrica e a água disponível não serão fatores limitantes para a produção de hidrogênio verde no estado.

Por fim foi realizada uma análise econômica considerando uma tarifa de água de US\$ 0,92/m³ e uma tarifa de energia elétrica de US\$ 0,03752/kWh, foi obtido um custo final (considerando custo de operação e manutenção) de US\$ 2,44/kg a uma taxa de juros de 1% e de US\$ 2,70/kg a uma taxa de 13,25%.

No entanto, é possível perceber que o valor da tarifa de água pode ser considerado como superestimado, visto que ela custar US\$ 0,92/m³ seria um valor equivalente ao da água

de abastecimento para população, logo essa água possui capacidade de ser fornecida de forma gratuita, uma vez que seu destino final é o descarte em emissários submarinos e efluentes do estado do Ceará.

Além disso, em relação ao custo da eletricidade há um potencial muito grande de redução de custos, visto que a fonte eólica está se tornando cada vez mais barata e difundida no Ceará. Ao realizar a análise admitindo-se uma taxa de juros de 1%, custo da água nulo e a eletricidade a US\$ 0,018/kWh o custo do hidrogênio é de US\$ 1,35/kg, ou seja, unindo baixa taxa de juros, valor nulo ou próximo de zero da água de alimentação e com um fornecimento barato de energia elétrica o hidrogênio se torna ainda mais viável.

Nesse cenário econômico os custos do hidrogênio podem ser reduzidos considerando plantas com potências menores, visto que uma central eletrolisadora que atenda a todo o potencial do estado possui um investimento bastante elevado que encarece o custo final do hidrogênio. No entanto, o propósito deste estudo é a avaliação do potencial do Ceará como um todo para geração de hidrogênio verde e percebe-se que há recursos suficientes para implementação desta tecnologia, uma vez que, possivelmente, não será instalada uma planta visando a utilização de todo o recurso eólico e de água residual disponível no estado.

Em vista disso, além da disponibilidade da água residual, a sua utilização contribuiria para incentivar o tratamento de 100% dos esgotos do estado. De modo que, dispor esse efluente sem um tratamento adequado compromete vários componentes do meio ambiente, como a água e o solo.

Além disso, os custos podem ser reduzidos ainda mais, ao instalar uma produção de hidrogênio verde de forma colocalizada com outras operações industriais ou próximas à ETEs, uma vez que a infraestrutura de água de processo e de resfriamento necessários já podem existir nesses locais, além disso um subproduto da produção de hidrogênio é o oxigênio, logo esse poderia ser utilizado como recurso para queima de gás natural em caldeiras, visto que oxigênio seria considerado puro e é mais eficiente do que o ar.

Dessa forma, como proposta para trabalhos futuros sugere-se a análise de plantas de hidrogênio verde colocalizadas com plantas industriais no estado do Ceará, análise da utilização do oxigênio proveniente da produção de hidrogênio verde ou até mesmo analisar o potencial de produção de hidrogênio verde em uma cidade do Ceará de modo a permitir uma análise menos abrangente e mais específica. Além disso, podem ser realizadas também, análises

de outros tipos de água disponíveis no Ceará, geração a partir da utilização do recurso solar disponível no estado e análise da utilização do recurso solar e eólico de forma híbrida, são estudos de caso pertinentes para utilização dos recursos renováveis do estado para geração de hidrogênio verde.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Boletim Anual**. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/?ano=2021>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

Acordo de Paris sobre o Clima. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>>. Acesso em: 9 jul. 2022

ADECE. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. Curitiba: [s.n.]. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/ebook/mobile/index.html>>. Acesso em: 4 abr. 2022.

ANA. **Atlas Esgotos: Despolição de Bacias Hidrográficas**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8-966d96c9eb01/attachments/ATLAS_Esgotos_Resumo_Executivo_FINAL.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ANEEL. **Matriz Elétrica Brasileira**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 6 jun. 2022a.

ANEEL. **Matriz Elétrica Cearense**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 6 jun. 2022b.

ARNEMANN, E. R. **DESENVOLVIMENTO DE COLETORES DE CORRENTE À BASE DE Ti/NbN PARA ELETRÓLISE PEM DA ÁGUA**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

ASTM. **Standard Specification for Reagent Water**. [s.l: s.n.]. v. 11.01

AYDIN, M. I. *et al.* **A comparative review on clean hydrogen production from wastewaters**. *Journal of Environmental Management*, v. 279, p. 111793, 1 fev. 2021.

BARBIR, F. **PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources**. *Solar Energy*, v. 78, n. 5, p. 661–669, 1 maio 2005.

BERNARDI JUNIOR, P. **Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões brasileiras visando à geração de energia elétrica distribuída**. 28 set. 2009.

BHANDARI, R.; TRUDEWIND, C. A.; ZAPP, P. **Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review**. Journal of Cleaner Production, v. 85, p. 151–163, 15 dez. 2014.

BNDES. **Fundo Clima - Subprograma Energias Renováveis**. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima-energias-renovaveis>>. Acesso em: 7 jul. 2022.

BRAGA, G. G. A. **Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 25 ago. 2015.

BRAGA, L. B. **Aspectos técnico, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 1 jul. 2014.

BURTON, T. *et al.* **Wind Energy Handbook, Second Edition**. [s.l.] John Wiley and Sons, 2001.

CNI. **Reúso de Efluentes para Abastecimento Industrial: Avaliação da Oferta e da Demanda no Estado do Ceará**. Portal de Indústria, mar. 2019.

CUMMINS INC (HYDROGENICS). **HySTAT Alkaline Electrolyzers**. [s.l.: s.n.]. Acesso em: 18 jun. 2022.

DA SILVA, E. L.; MUSZKAT MENEZES, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. v. 4^o, 2005.

EPE. **Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil**. 2021.

FILHO, F. DE A. **Ceará 2050 Estudo Setorial Especial Recursos Hídricos**. jul. 2018.

FRANCINE CORTINOVIS, G.; TAH WUN SONG. **Funcionamento de uma Torre de Resfriamento de Água**. [s.d.].

GAMBETTA, F. **Análise técnica e econômica de retificadores de corrente para produção de hidrogênio eletrolítico**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 23 fev. 2010.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Plataforma Ceará 2050**. Disponível em: <http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wp-content/uploads/2019/01/ceara-2050-produto-3-3-visao_objetivos_indicadores_metas_24-11.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2022.

GRANOVSKII, M.; DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Greenhouse gas emissions reduction by use of wind and solar energies for hydrogen and electricity production: Economic factors**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 8, p. 927–931, 1 jun. 2007.

GREEN HYDROGEN.DK. **HyProvide™ A-Series**. [s.l: s.n.]. . Acesso em: 18 jun. 2022.

HOLLADAY, J. D. *et al.* **An overview of hydrogen production technologies**. *Catalysis Today*, v. 139, n. 4, p. 244–260, 30 jan. 2009.

IPLANFOR; PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA. **Plano Fortaleza 2040**. Disponível em: <<https://acervo.fortaleza.ce.gov.br/pesquisa?nome=2%C2%AA+EDI%C3%87%C3%83O&autor=&categoria=PLANOS+SETORIAIS&tema=PLANEJAMENTO+URBANO&ano=2019&tipodocumento=DIVERSOS&fonte=IPLANFOR+%2F+PMF&local=FORTALEZA>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

IRENA. **Green hydrogen cost reduction**. Abu Dhabi: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

IRENA. Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production. maio 2022.

JACOBS. **Towards a zero carbon future: The role of wastewater treatment plants in accelerating the development of Australia’s hydrogen industry**. Disponível em: <<https://www.jacobs.com/sites/default/files/2022-03/jacobs-yarra-valley-water-towards-a-zero-carbon-future.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2022.

JOSÉ, R.; FERRARO, S. Sistema de Osmose Reversa. 2008.

KREUTER, W.; HOFMANN, H. Electrolysis: **The important energy transformer in a world of sustainable energy**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 23, n. 8, p. 661–666, 1 ago. 1998.

LAMEIRAS, F. **O HIDROGÊNIO COMO VETOR DE ENERGIA**. Rio de Janeiro: Escola Superior de Guerra, 2019.

MARSHALL, A. *et al.* **Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers—Reduced energy consumption by improved electrocatalysis**. *Energy*, v. 32, n. 4, p. 431–436, 1 abr. 2007.

MEIRA BREDA, E. **Água grau reagente para laboratórios e outros fins especiais**. set. 2001.

MELO, M. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, jul. 2012.

PALHARES, D. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 29 ago. 2016.

REN 21. **Renewable 2022 Global Status Report**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2022.

RODRIGUES, A. M. *et al.* **Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis**. [s.d.].

SÁ, L. R. V. DE; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITÃO, V. S. **Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros**. *Química Nova*, v. 37, n. 5, p. 857–867, 2014.

SILVA, I. **Hidrogênio: Combustível do Futuro**. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, v. 20, n. 2, p. 122–126, 5 ago. 2016.

SILVEIRA FONTENELE, R. E.; DALTRO, S. **A Energia Eólica do Ceará e o mecanismo de desenvolvimento limpo do Protocolo de Quioto**. [s.d.].

SILVEIRA, J. L.; GOMES, L. A. **Fuel cell cogeneration system: a case of techno-economic analysis**. *Renewable & sustainable energy reviews*, v. 3, n. 2, p. 233–242, 1999.

SILVEIRA, J.; ZANZI, R. **Aspectos técnico e econômicos de processos eletrolíticos para produção de hidrogênio: O caso brasileiro**. 2013.

SIMÕES, S. G. *et al.* **Água para a produção de hidrogénio verde (renovável) via eletrólise em Portugal.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.astm.org>.

SIMOES, S. G. *et al.* **Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production.** *Journal of Cleaner Production*, v. 315, 15 set. 2021.

SIMON, A. J.; DAILY, W.; WHITE, R. G. **Hydrogen and Water: An Engineering, Economic and Environmental Analysis.** 6 jan. 2010.

SOUTO, H. J.; NOGUEIRA, T. A. **O Hidrogénio Como Vetor Energético do Futuro.** *Neutro à Terra*, p. 47–53, 2022.

SULEMAN, F.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M. **Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options.** 2015.

THYSSENKRUPP. **Green Hydrogen.** Disponível em: <https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_binary/UCPthyssenkruppBAISCountryWebsiteIndia/en/products-and-services/electrolysis/link-Green-Hydrogen.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2022.

THYSSENKRUPP UHDE CHLORINE ENGINEERS GMBH. **Hydrogen from large-scale electrolysis** . , [s.d.] . . Acesso em: 18 jun. 2022

URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. **Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends.** *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012.

VIDAS, L.; CASTRO, R. **Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis.** *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 11363, v. 11, n. 23, p. 11363, 1 dez. 2021.

ZENG, K.; ZHANG, D. **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications.** *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 36, n. 3, p. 307–326, 1 jun. 2010.