



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LUIZA CAVALCANTI CARVALHO

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ASPECTOS QUALITATIVOS E
QUANTITATIVOS DE FONTES DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
VERDE**

FORTALEZA

2022

LUIZA CAVALCANTI CARVALHO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ASPECTOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS
DE FONTES DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.

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)

C325a Carvalho, Luiza Cavalcanti.

Avaliação comparativa de aspectos qualitativos e quantitativos de fontes de água para produção de hidrogênio verde / Luiza Cavalcanti Carvalho. – 2022.

111 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. João José Hiluy Filho .

1. Hidrogênio Verde. 2. Transição Energética. 3. Tratamento de Água. 4. Água Salina. 5. Água Superficial. I. Título.

CDD 660

LUIZA CAVALCANTI CARVALHO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ASPECTOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS
DE FONTES DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Química.

Aprovado em: 08/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a Dr^a Maria Valderez Ponte Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Socorro e Edivam, pelo apoio e dedicação incondicionais ao longo da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Acredito que vitória boa é vitória compartilhada. Gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para mais essa conquista na minha vida. Primeiramente, muito obrigada a Deus e a minha família, em especial aos meus pais, Socorro e Edivam, que sempre me inspiraram com sua dedicação, esforço e amor. Que correm comigo atrás dos meus sonhos, na mesma velocidade que eu. Que fazem e sempre fizeram, o possível e o impossível para proporcionar as melhores experiências na vida para mim. Como sempre digo, vocês são minhas maiores inspirações e sinto que, se estou com vocês, eu sou capaz de tudo. Obrigada por mostrarem, por meio do exemplo, que a humildade e o estudo nos fazem ser melhores. Vocês são e sempre serão a razão do meu viver. Obrigada por tudo, hoje e sempre!

Priscila, minha irmã, você é um exemplo para mim. Obrigada pelas palavras constantes de força e de otimismo. Aprendo diariamente com sua resiliência, bondade e amor. Meus irmãos Liliane, Rodrigo e Júnior, obrigada por sempre acreditarem em mim, celebrarem minhas conquistas e chorarem meu choro comigo. Vocês são incríveis, e eu sou muito completa em ter vocês por perto. Além disso, muito obrigada aos meus tios – em especial tia Lulu e tio Olavo -, sobrinhos, primos e toda a família que sempre esteve ao meu lado. Vocês são parte de mim e levo, com orgulho, nossa história para onde quer que eu vá.

Meu amor, Jadir, obrigada por todo o apoio, por acreditar tanto em mim e por lembrar todo dia que sou forte e capaz. Que bom que nos conhecemos, naquele 1º dia na UFC, e trilhamos juntos esse caminho tão lindo e que tenho tanto orgulho. Estar ao seu lado e compartilhar essa vida contigo é meu presente diário. Obrigada pelo conforto, pelo carinho, pelas palavras certas em qualquer hora e por toda a ajuda prestada durante esses anos de faculdade e durante esse trabalho. Sou muito grata por ter você comigo, e tenho certeza que esse é apenas o começo de tudo que ainda iremos viver juntos.

Agradeço, também, ao Jaryson Allan, pela amizade e pelo amor que construímos durante esse tempo. Você é amigo que virou irmão e é alguém que quero para o resto da vida. Obrigada pela dupla nos trabalhos, pelas madrugadas de choro, pelos estudos na biblioteca, pelas comemorações nas aprovações e, acima

de tudo, pela amizade e pela torcida em todos os aspectos na minha vida. Vencemos juntos!

Muito obrigada também aos meus amigos Maria Luiza, Larissa e Vitor que se tornaram família durante todos esses anos juntos. Choramos e rimos juntos, aprendemos muito e vivemos momentos que iremos levar para o resto da vida. Com certeza, vocês contribuíram significativamente para a minha formação pessoal e profissional ao longo desse tempo.

Para minhas melhores amigas, Sophia e Gabriela, um agradecimento especial por todo o companheirismo e apoio de sempre. Com vocês, aprendi que distância e rotina não significam nada perto de tudo que já construímos e vivemos juntas. Obrigada pelos conselhos, pelas palavras de força e de apoio e pelo amor sempre. Que sorte a minha ter vocês, irmãs!

Muito obrigada ao Laboratório de Pesquisa em Adsorção e Captura de CO₂ (LPACO₂) e ao professor Moisés pelo aprendizado e pelos anos de experiência na iniciação científica, que foram essenciais para a construção do que sou hoje.

Obrigada, também, ao meu time da EDP Brasil, de Operação e Utilidades, que acreditam em mim e reconhecem meu trabalho. Obrigada pelo acolhimento, ensinamentos, trabalhos juntos e todos os momentos que compartilhamos. Tenho muito orgulho de fazer parte desse lugar tão maravilhoso!

Por último, agradeço ao meu professor orientador, João José Hiluy Filho, por todo o apoio e toda a força prestada durante esse trabalho, e aos professores da banca, Maria Valderez e Murilo Luna pela contribuição com o meu trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone de Beavoir

RESUMO

O uso acentuado de combustíveis fósseis ao longo da história gerou uma série de efeitos ambientais, como emissão de gases poluentes que contribuem para o efeito estufa e para o aumento do aquecimento global. Atualmente, a tendência é a diminuição da utilização de combustíveis fósseis e sua substituição por fontes renováveis, que possuem baixa ou zero emissões de carbono. Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como uma forte oportunidade para descarbonização da economia, visto que possui uma vasta utilização, como em indústrias, mobilidade e energia. A produção do hidrogênio verde ocorre a partir da eletrólise da água e com fontes de energia renováveis, como eólica e solar. Tendo em vista os pontos apresentados e a importância do hidrogênio verde para o futuro, esse trabalho teve como objetivo uma avaliação qualitativa e quantitativa em relação a diferentes fontes de água – água superficial e água salina - para produção do insumo, baseado em fatores definidos no estudo. Foi definido o Ceará como localização da planta, por conta do atual avanço do estado em relação ao tema, com HUB de hidrogênio verde em formação no Porto do Pecém, localização geográfica privilegiada, mão de obra industrial eficiente. As plantas de tratamento das fontes de água foram simuladas, através do software *Wave*, com etapas de ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica em ambas as fontes de água. Foram discutidos fatores prós e contras para cada fonte de água. A água salina possui um favorecimento em relação à disponibilidade da água, concorrência com outros usos de água e na complexidade do licenciamento e da autorização de uso da água. A água superficial, por sua vez, é mais viável nos quesitos de facilidade da coleta de água, distância de transporte da fonte de água até a planta e custos de aquisição, operação e manutenção. Por conta dos altos custos relacionados à fonte salina, cerca de R\$ 950.000,00 para aquisição e R\$ 75.000,00 mensal para operação e manutenção da planta, comparado com valores de cerca de R\$ 170.000,00 e R\$ 40.000,00 para a água superficial, a fonte proveniente de bacias hidrográficas foi a definida como possuindo maior viabilidade. No entanto, o avanço das tecnologias para dessalinização da água do mar, assim como a perspectiva de aumento da seca em vários lugares do mundo apontam para um crescimento da utilização dessa fonte no futuro.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Transição Energética. Tratamento de Água. Água Salina. Água Superficial.

ABSTRACT

The accentuated use of fossil fuels throughout history has generated a series of environmental effects, such as the emission of polluting gases that have led to the greenhouse effect and to the increase in global warming. Today, the use of fossil fuels is being reduced and replaced by renewable sources that have low or zero carbon emissions. In this context, green hydrogen emerges as a strong opportunity for the decarbonization of the economy, since it has a wide use, such as industry, mobility and energy. The production of green hydrogen occurs from the electrolysis of water with renewable energy sources such as wind and solar. In view of the points presented and the importance of green hydrogen for the future, this work aimed to evaluate qualitatively and quantitatively in relation to different water sources - surface water and sea water - for the production of the input, based on factors defined in the study. The state of Ceará was defined as the location of the plant, due to the state's current progress in relation to the subject, with a green hydrogen HUB being formed in the Port of Pecém, privileged geographic location, efficient industrial workforce. Water source treatment plants were simulated using the *Wave* software, with ultrafiltration, reverse osmosis and ion exchange steps in both water sources. At this work, it was presented pros and cons factors for each water source. Sea water favors water availability, competition with other water uses and the complexity of licensing and water use authorization. Surface water, in turn, is more viable in terms of ease of water collection, transport distance from the water source to the plant and acquisition, operation and maintenance costs. Due to the high costs related to the saline source, approximately R\$ 950,000.00 for acquisition and R\$ 75,000.00 per month for operation and maintenance, compared with values of approximately R\$ 170,000.00 and R\$ 40,000.00, respectively, for the surface water, the source of hydrographic basins was defined as having greater viability. However, advances in technologies for seawater desalination, as well as the prospect of drought in various parts of the world, point to an increase in the use of this source in the future.

Keywords: Green Hydrogen. Energetic Transition. Water Treatment. Seawater. Superficial Water.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação das águas naturais em função da concentração de STD (sólidos totais disponíveis).....	42
Tabela 2 -	Capacidade x volume atual dos reservatórios do Ceará em 2021	43
Tabela 3 -	Parâmetros da água	52
Tabela 4 -	Número de usuários pelos principais usos da água	56
Tabela 5 -	Eletrolisador alcalino modelo A4000 – Nel Hydrogen.....	59
Tabela 6 -	Parâmetros de entrada – Água bruta.....	64
Tabela 7 -	Parâmetros de entrada – Água salina	69
Tabela 8 -	Contribuição de diversos componentes no custo de aquisição total na planta de tratamento de água superficial.....	96
Tabela 9 -	Custo de aquisição da planta de tratamento da água superficial	96
Tabela 10 -	Custo mensal com energia elétrica – Água superficial	98
Tabela 11 -	Custo mensal com produtos químicos – Água superficial	99
Tabela 12 -	Contribuição de diversos componentes no custo de aquisição total na planta de tratamento da água salina.....	101
Tabela 13 -	Custo de aquisição da planta de tratamento da água salina	101
Tabela 14 -	Custo mensal com energia elétrica – Água salina.....	102
Tabela 15 -	Custo mensal com produtos químicos – Água salina	103
Tabela 16 –	Resumo dos resultados qualitativos e quantitativos da fonte de água	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Matriz Elétrica No Mundo.....	18
Figura 2 -	Matriz elétrica no Brasil.....	18
Figura 3 -	Panorama de caminhos até uma sociedade carbono-neutra	22
Figura 4 -	Caminhos de produção de hidrogênio.	24
Figura 5 -	Países em que o hidrogênio verde possivelmente será mais barato que o hidrogênio azul por ano.....	25
Figura 6 -	Os 20 maiores projetos do mundo para produção de hidrogênio verde em larga escala já anunciados.....	26
Figura 7 -	Potencial técnico solar mundial.....	28
Figura 8 -	Potencial técnico eólico mundial.....	28
Figura 9-	Elementos principais para geração, compressão, transmissão e armazenamento do hidrogênio verde	29
Figura 10 -	Esquema representativo de um eletrolisador alcalino	31
Figura 11 -	Ilustração esquemática de um eletrolisador tipo PEM.....	32
Figura 12 -	Esquema do decantador de fluxo horizontal.....	36
Figura 13 -	Esquema detalhado do decantador de fluxo horizontal.....	36
Figura 14 -	Diferença das membranas segundo o tamanho relativo dos solutos que ficam retidos.....	38
Figura 15 -	Esquema do fluxo da água de alimentação, permeado e concentrado	39
Figura 16 -	Transporte com maior custo-benefício considerando volume e distância	46
Figura 17 -	Aplicações do hidrogênio verde	47
Figura 18 -	Localização da planta de produção de hidrogênio verde.....	54
Figura 19 -	Parâmetros da água de alimentação – Água superficial.....	78
Figura 20 -	Esquema da etapa de ultrafiltração – Água superficial.....	78
Figura 21 -	Condições de operação da unidade de ultrafiltração – Água superficial	79
Figura 22 -	Dosagem de químicos da etapa de ultrafiltração – Água superficial ...	79
Figura 23 -	Qualidade da água de saída da ultrafiltração – Água superficial.....	80
Figura 24 -	Custos com eletricidade da etapa da ultrafiltração – Água superficial.	80
Figura 25 -	Esquema da etapa de osmose reversa – Água superficial.....	81
Figura 26 -	Vazões e pressões da etapa de osmose reversa – Água superficial ..	81

Figura 27 - Datasheet da membrana modelo BW30-4040.....	81
Figura 28 - Qualidade da água de saída da osmose reversa – Água superficial...	82
Figura 29 - Custo com eletricidade na etapa da osmose reversa – Água superficial	82
Figura 30 - Esquema da etapa de troca iônica – Água superficial.....	83
Figura 31 - Condições de regeneração – Água superficial	83
Figura 32 - Qualidade do produto da troca iônica – Água superficial.....	84
Figura 33 - Composição iônica da água de saída da troca iônica – Água superficial	84
Figura 34 - Custo com eletricidade na etapa de troca iônica – Água superficial....	85
Figura 35 - Fluxograma com etapas do tratamento da água superficial	86
Figura 36 - Parâmetros da água de alimentação – Água salina	87
Figura 37 - Esquema da etapa de ultrafiltração – Água salina.....	87
Figura 38 - Condições de operação da unidade de ultrafiltração – Água salina	88
Figura 39 - Dosagem de químicos da etapa de ultrafiltração – Água salina	88
Figura 40 - Qualidade da água de saída da ultrafiltração – Água salina.....	89
Figura 41 - Custos com eletricidade da etapa da ultrafiltração – Água salina	89
Figura 42 - Vazões e pressões da etapa de osmose reversa – Água salina	90
Figura 43 - Datasheet da membrana modelo SW30XLE-440i	90
Figura 44 - Qualidade da água de saída da osmose reversa – Água salina.....	91
Figura 45 - Custo com eletricidade na etapa da osmose reversa – Água salina ...	91
Figura 46 - Esquema da etapa de troca iônica – Água salina.....	92
Figura 47 - Condições de regeneração – Água salina	92
Figura 48 - Qualidade do produto da troca iônica – Água salina	93
Figura 49 - Composição iônica da água de saída da troca iônica – Água salina...	93
Figura 50 - Custo com eletricidade na etapa de troca iônica – Água salina	94
Figura 51 - Fluxograma com etapas do tratamento da água salina	94
Figura 52 - Consumo de energia elétrica no processo de tratamento	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASTM	American Society for Testing and Materials
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
COP	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
EIA/RIMA	Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETA	Estação de Tratamento de Água
H2V	Hidrogênio Verde
HUB	Centro
ISO	International Organization for Standardization
O&M	Operação e Manutenção
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Policloreto de Alumínio
PEM	Proton Exchange Membrane
RAS	Relatório Ambiental Simplificado
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
kWh/m²/dia	Kilowatt por metro ao quadrado por dia
mg/L	Miligramas por litro
km	Quilômetro
°C	Graus Celsius
K	Kelvin
kWh	Kilowatt por hora
kg/Nm³	Quilograma por normais metros cúbicos
m³/s	Metros cúbicos por segundo
R\$/m³	Reais por metros cúbicos
Nm³/h	Normais metros cúbicos por hora
L/Nm³	Litro por normais metros cúbicos
Kg H₂/dia	Quilograma de hidrogênio por dia
Kgf/cm²g	Quilograma força por centímetro quadrado
m³/h	Metros cúbicos por hora
R\$/kWh	Reais por kilowatt hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Transição Energética	21
2.2	Hidrogênio Verde	23
2.3	Hidrogênio verde como fonte de energia do futuro	24
2.4	Cenário atual	26
2.4.1	No mundo	26
2.4.2	No Brasil	27
2.5	Geração de Hidrogênio Verde	29
2.5.1	Tipos de eletrolisadores mais utilizados para produção de hidrogênio verde	30
2.5.1.1	Eletrolisador alcalino	30
2.5.1.2	Eletrolisador tipo PEM	32
2.5.2	Água	34
2.5.2.1	Tratamento primário	34
2.5.2.2	Desmineralização da Água	38
2.5.2.3	Ultrafiltração	39
2.5.2.4	Osmose Reversa	39
2.5.2.5	Troca iônica	40
2.5.2.6	Disponibilidade da água	41
2.6	Armazenamento de Hidrogênio Verde	44
2.7	Distribuição do Hidrogênio Verde	45
2.8	Utilização do Hidrogênio Verde	46
2.8.1	Energia	47
2.8.2	Indústria	48
3	DESENVOLVIMENTO E DEFINIÇÕES	50
3.1	Definição dos parâmetros para escolha da localização da planta	50
3.2	Parâmetros da água de entrada	51
3.3	Fonte de água utilizada	52

3.3.1	<i>Facilidade da coleta da água</i>	53
3.3.2	<i>Distância de transporte da fonte de água até a unidade de produção</i>	54
3.3.3	<i>Concorrência com outros usos de água</i>	55
3.3.4	<i>Complexidade do licenciamento e da autorização de captação da água, considerando custo de obtenção da água</i>	56
3.3.5	<i>Custos com o tratamento da água (aquisição e custo O&M)</i>	58
3.3.5.1	<i>Especificação do eletrolisador</i>	58
3.3.5.2	<i>Especificação das plantas de tratamento de água</i>	60
3.3.5.3	<i>Avaliação dos custos</i>	61
3.3.5.4	<i>Custos de Aquisição (CAPEX)</i>	61
3.3.5.5	<i>Custos de Operação e Manutenção (O&M)</i>	61
4	RESULTADOS	63
4.1	Descrição das plantas	63
4.1.1	Água superficial	63
4.1.1.1	Unidade de coagulação/floculação	65
4.1.1.2	Sedimentação	65
4.1.1.3	Filtros Multimídia	66
4.1.1.4	Ultrafiltração	66
4.1.1.5	Osmose Reversa	67
4.1.1.6	Troca iônica	68
4.1.1.7	Destinação de lodo e de efluentes	68
4.1.2	Água Salina	68
4.1.2.1	Captação	69
4.1.2.2	Pré tratamento	70
4.1.2.3	Osmose Reversa	70
4.1.2.4	Pós-tratamento	70
4.1.2.5	Destinação do rejeito do processo de dessalinização	70
4.2	Cálculo da vazão de entrada de água bruta nas plantas de tratamento de água	71
4.2.1	Cálculo para vazão inicial de água superficial	72
4.2.2	Cálculo para vazão inicial de água salina	75
4.3	Simulação realizada no software Wave para água superficial, proveniente do Canal do Pecém	77

4.4	Simulação realizada no software Wave para água do mar, proveniente do Pecém.....	87
4.5	Custos com aquisição, operação e manutenção	95
4.5.1	<i>Água superficial</i>	95
4.5.1.1	<i>Custo de Aquisição (CAPEX)</i>	95
4.5.1.2	<i>Custos de Operação e Manutenção (O&M)</i>	97
4.5.2	<i>Água salina</i>	100
4.5.2.1	<i>Custo de Aquisição (CAPEX)</i>	100
4.5.2.2	<i>Custos de Operação e Manutenção (O&M)</i>	102
4.6	Análise comparativa das fontes de água	104
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS.....	108

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica representa uma etapa fundamental no processo de entrega da eletricidade aos consumidores – é a primeira etapa, seguida pelos processos de transmissão, distribuição e a venda da eletricidade.

De acordo com Letcher e Williamson (2004), nos primórdios, a demanda de energia humana era limitada ao próprio vigor físico fornecido pelo corpo e provido pelo alimento ingerido durante o dia. Porém, essa demanda evoluiu de uma forma que, atualmente, o ser humano é dependente da energia para assegurar sua sobrevivência, utilizando-a em atividades vitais, como iluminar, aquecer, refrigerar, transportar e comunicar.

Um estudo realizado por Ferreira Neto, Corrêa e Perobelli (2016) mostra que a evolução econômica e tecnológica da sociedade está diretamente relacionada ao aumento da demanda de energia. É demonstrado que o aumento da demanda por energia implica em um maior crescimento econômico para determinado período.

De acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), o conjunto de fontes de energia disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo é chamada de matriz elétrica. A matriz representa o conjunto de fontes disponíveis em um país, para suprir a necessidade de utilização da energia elétrica para atividades rotineiras da população, como utilizar a televisão, ouvir músicas no rádio, acender a luz, ligar a geladeira, carregar o celular.

Freire (2014) e Mantoyani, Neumann e Edler (2016) definiram duas formas de classificar as fontes energéticas, como citadas anteriormente. São elas:

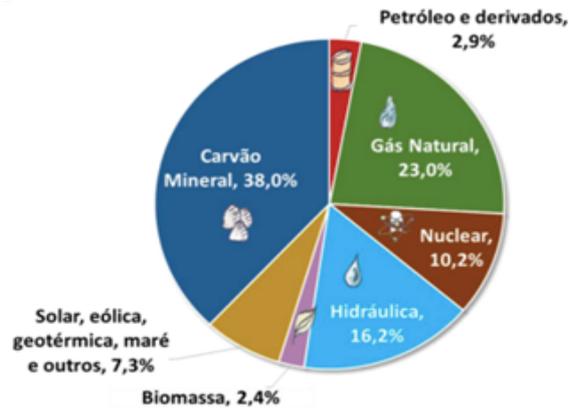
- Não renováveis: possuem o ciclo de formação de milhões de anos, logo, são encontradas na natureza em quantidades limitadas e não podem ter suas reservas regeneradas caso esgotadas. Nessa categoria são enquadrados os combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e urânio – como fonte de energia nuclear.

- Renováveis: suas fontes conseguem manter-se disponíveis durante um longo prazo, pois passam por um processo de renovação em ciclos contínuos. São exemplos de fontes renováveis a energia solar, hidráulica, biocombustíveis e eólica.

Historicamente, a geração de energia elétrica no mundo é baseada, principalmente, no uso acentuado de combustíveis fósseis ou minerais, não renováveis, como o petróleo, carvão e gás natural. O gráfico da Figura 1 mostra a

composição da matriz elétrica mundial. A maior parte da energia elétrica produzida vem de fontes não renováveis, como carvão mineral, gás natural, nuclear, petróleo e derivados que, somados, representam mais de 70% do total.

Figura 1 - Matriz Elétrica No Mundo



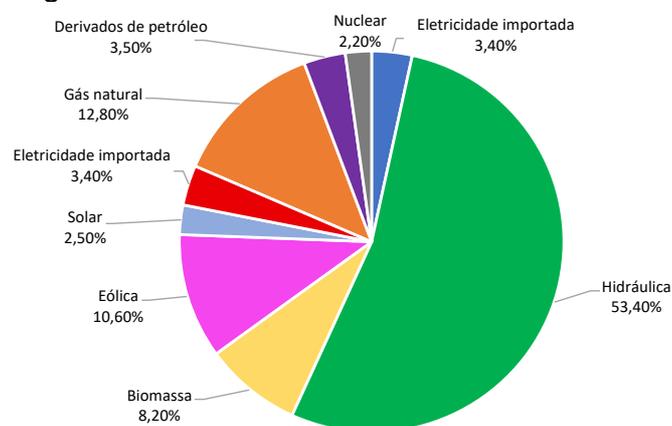
Fonte: Matriz elétrica mundial 2018 (IEA, 2020).

No entanto, essas fontes de energia geram uma série de efeitos ambientais adversos, como emissão de poluentes e gases de efeito estufa, colocando em risco a sustentabilidade ou suprimento de longo prazo do planeta (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

No Brasil, a maior parte da energia é produzida pelas hidrelétricas, que são fontes renováveis e contribuem para a descarbonização da matriz elétrica brasileira.

Como apresentado no gráfico da Figura 2, 78,1% da energia elétrica utilizada no Brasil provém de energias renováveis.

Figura 2 - Matriz elétrica no Brasil



Fonte: Adaptado de EPE (2022 – Ano base 2021).

Apesar de possuir uma matriz elétrica bastante renovável, as fontes não renováveis ainda utilizadas no Brasil devem ser substituídas, em um plano de transição energética. A utilização do carvão, por exemplo, ainda é essencial para a garantia energética do país.

Com a crescente utilização e aproveitamento das fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa, associada à utilização do potencial hidrelétrico não utilizado, o país poderá avançar para dispor uma matriz 100% renovável e limpa.

Com os objetivos de atingir a neutralidade de CO₂, o mundo terá que encontrar maneiras de descarbonizar todos os setores que utilizam combustíveis fósseis, como indústria, mobilidade, construção (SIEMENS, 2021).

O hidrogênio pode ser uma boa alternativa para acelerar essa transição energética, pois possibilita uma integração na produção de energia renovável em grande escala; distribui energia entre os setores e regiões; permite a descarbonização em vários setores, como transporte, indústria, químicos para indústria – como amônia, metanol (SIEMENS, 2021).

Com isso, esse trabalho visa mostrar a importância e a aplicabilidade do hidrogênio verde como aliado da descarbonização. No seu processo de produção, entretanto, é necessário a utilização de uma fonte de água. Com isso, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicação e a rentabilidade de fontes de água a serem utilizadas no processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Esse trabalho tem como objetivo geral analisar qualitativamente e quantitativamente diferentes fontes de água para produção de hidrogênio verde, a partir de fatores definidos inicialmente.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir localização da planta;
- Determinar e analisar fatores para comparação das fontes de água para utilização na planta;

- Estabelecer parâmetros de uso das fontes de água;
- Realizar simulações a partir da definição de etapas de tratamento da água;
- Calcular consumo da água;
- Selecionar modelo de eletrolisador a ser utilizado

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transição Energética

Ao longo da história, pelo uso acentuado de combustíveis fósseis, uma série de efeitos ambientais tem sido gerados, como emissão de poluentes locais e gases de efeito estufa, colocando em risco a sustentabilidade de longo prazo do planeta (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Esses gases poluentes permitem a passagem da luz solar em direção ao planeta, pois retêm calor, elevando a temperatura. A poluição também aumenta e o efeito estufa é agravado. Esse processo traz consequências preocupantes, como mudanças climáticas – estiagens maiores, redução de reservas de água potável, aumento do nível do mar, redução na produção de alimentos (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017b) e problemas de saúde – doenças cardíacas, respiratórias e câncer (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017a) com a preocupação crescente em relação ao aquecimento global, há uma tendência do setor energético a nível mundial de diminuir o uso dos combustíveis que emitem gases poluentes.

Com a tendência de diminuição da utilização dos combustíveis fósseis, a sustentabilidade é um assunto bastante discutido e priorizado nas empresas e na comunidade. Os países uniram pela primeira vez para um evento dedicado à discussão do tema em 1992, no Brasil, porém, mesmo com a criação de um acordo, nem todos os países cumpriram as metas estabelecidas. Outros encontros aconteceram posteriormente, como o de Kyoto (1997) e as negociações de Copenhague (2009), que também não contribuíram para o engajamento sustentável global. Um acordo mais abrangente aconteceu em dezembro de 2015, na COP21 de Paris, em que um acordo internacional foi assinado e estabelecia, como objetivo, manter até o final deste século o aquecimento global em 2 graus em relação aos níveis pré-industriais, e de preferência limitá-lo a 1,5 graus. A COP26 de Glasgow, que ocorreu em novembro de 2021, confirmou o compromisso de alcançar a chamada “Carbon Neutrality” até 2050.

Esse objetivo tende a ser alcançado com o maior desenvolvimento da chamada transição energética, ou seja, a utilização de uma matriz energética (e, conseqüentemente, uma matriz elétrica) baseada em combustíveis renováveis, e que possuem baixa ou zero emissões de carbono. É importante, também, que a

transição energética seja inclusiva, gere novos empregos, novas formas de trabalho, que valorize a economia circular, que ofereça novos serviços aos consumidores.

O processo de transição energética atual a nível mundial abrange todos os aspectos do sistema elétrico, seguindo a lógica dos 3 D's: descentralização, digitalização e descarbonização. Como a matriz elétrica mundial ainda possui alta participação de fontes que geram gases poluentes, a descarbonização é o ponto chave para o combate às mudanças climáticas e deve ser realizada em um cenário com uma característica de flexibilidade e não programabilidade. Os países devem estar preparados para mudanças repentinas de equilíbrio entre demanda e oferta de energia, estresse da rede e outras situações excepcionais (EPE, 2020).

Além disso, a ONU, em 2015, integrou como parte do programa da Agenda de Desenvolvimento Sustentável um conjunto de 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, detalhados na Figura 3. Dentre eles, pode ser citado a energia limpa e a uma ação climática, dois objetivos que requerem ações que transformem a energia global, com soluções inovadoras (SIEMENS, 2021).

Figura 3 - Panorama de caminhos até uma sociedade carbono-neutra



Fonte: Mitsubishi (2021).

O etanol é um exemplo de combustível que é uma boa alternativa na transição energética, pois possui vários vieses de utilização, como: substituição à gasolina, nos veículos; mistura com água e posterior alimentação em uma célula combustível, produzindo hidrogênio, que pode ser utilizado como fonte elétrica para o veículo (MITSUBISHI, 2021).

Em se tratando de energia elétrica, o Brasil possui uma configuração geográfica que impulsiona a exploração das energias solar e eólica. Uma alternativa

viável seria a intermitência na oferta de energia eólica e solar, que pode ser enfrentada de diversas formas. Poderiam ser combinadas as ofertas dessas fontes com a hidroeletricidade, alternando a geração de acordo com as disponibilidades conjunturais de cada uma delas. Outra solução seria armazenar a energia gerada por essas fontes intermitentes através de baterias ou transformação em hidrogênio verde, que funcionariam como um grande estoque da energia gerada. Os custos dessas novas tecnologias de armazenamento vêm caindo ao longo dos últimos anos, favorecendo sua adoção. A energia eólica e solar excedente poderiam ser armazenadas nos reservatórios das usinas hidrelétricas, transformando esses reservatórios em baterias gigantes de armazenamento (EPE, 2020).

2.2 Hidrogênio Verde

Hidrogênio é o elemento mais comum do universo. Além disso, o mais leve dos gases (peso molecular igual a 2 – 0,09 kg/Nm³). No planeta, ele ocorre principalmente em sua forma molecular na água e como gás. Hidrogênio é uma substância não tóxica, não corrosiva, não auto inflamável e sua queima não emite CO₂. Quase todos os combustíveis químicos são baseados no hidrogênio ou outros compostos de hidrogênio (SIEMENS, 2021).

A substância possui uma baixa densidade energética, advindo de seu peso extremamente baixo e uma capacidade calorífica consideravelmente alta – em relação ao metano, por exemplo (SIEMENS, 2021).

O hidrogênio pode ser obtido de diversas formas e, dependendo da forma gerado, recebe um nome diferente. Desde o hidrogênio cinza – obtido com grande geração de CO₂, até o hidrogênio verde – gerado através de energias renováveis e sem emissão de CO₂. Alguns tipos de hidrogênio estão descritos abaixo, de acordo com a cor quanto à origem (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT – GIZ, 2021):

- Hidrogênio cinza: é obtido através da reforma de vapor, convertendo o gás natural ou o carvão, sob calor, em H₂ e CO₂. Nesse caso, cerca de 10 toneladas de CO₂ são gerados para atmosfera, para cada quilo de hidrogênio produzido. Em se tratando de emissão por kWh, a reforma do vapor gera cerca de 285 gramas de CO₂ por kWh, enquanto a gaseificação do carvão tem uma emissão de cerca de 675 gramas de CO₂ por kWh de geração de hidrogênio.

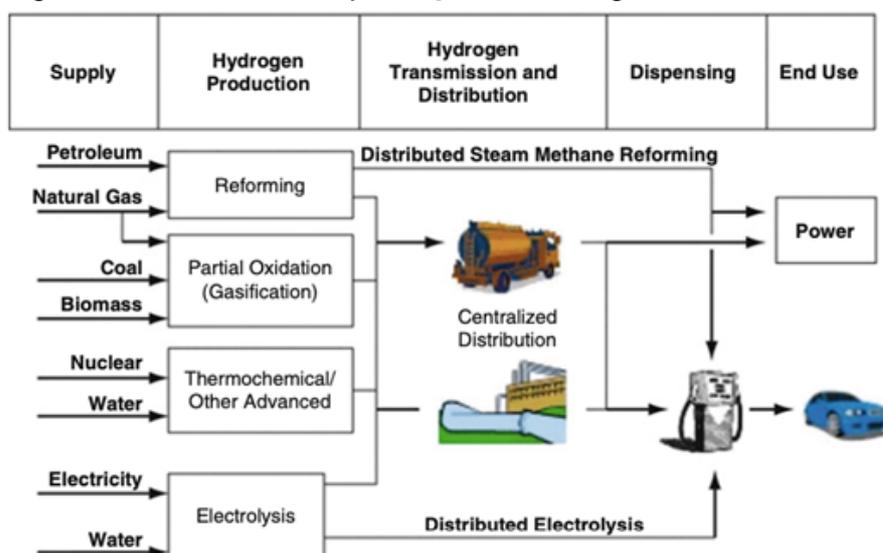
- Hidrogênio azul: produzido da mesma forma do hidrogênio cinza, mas com adição da fase de captura e armazenamento de carbono, a fim de prevenir que o CO₂ seja liberado na atmosfera.
- Hidrogênio verde: é o hidrogênio produzido pela eletrólise da água, utilizando apenas fontes de energia renováveis e que não emitem CO₂. A utilização desse processo, no entanto, depende do custo dos eletrolisadores, cadeia de suprimentos e políticas regulamentárias.

2.3 Hidrogênio verde como fonte de energia do futuro

Atualmente, cerca de 75 milhões de toneladas de hidrogênio são geradas anualmente (GREEN HYDROGEN MARKET SIZE, SHARE & TRENDS ANALYSIS REPORT BY TECHNOLOGY, 2020), sendo cerca de 95% dessa produção através de combustíveis fósseis. A maior parte da produção é concentrada em refinarias, em produção de fertilizantes e em plantas petroquímicas, como uma matéria prima que é processada em outras etapas da indústria (BODE, 2019).

Exceto em indústrias especializadas, o hidrogênio ainda não é amplamente utilizado em larga escala como uma fonte de energia. Para que isso aconteça, uma infraestrutura de produção em larga escala, distribuição e armazenamento são necessários, como mostrado na Figura 4:

Figura 4 - Caminhos de produção de hidrogênio.

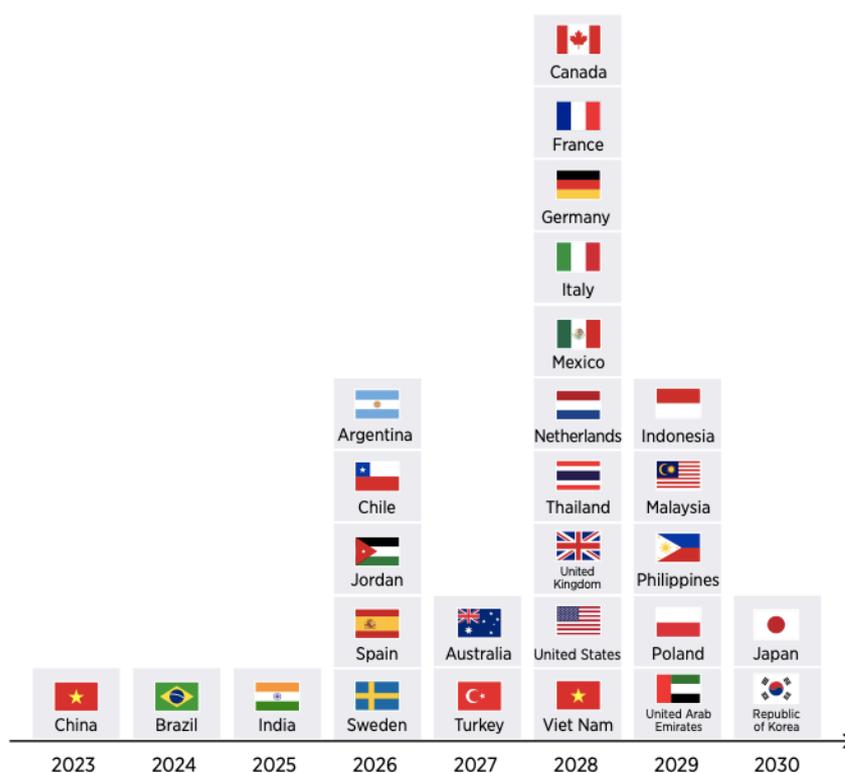


Fonte: US Energy Information Administration (EIA) (2008).

Uma das principais barreiras para maior oferta de hidrogênio verde no mundo é a necessidade de ganhos de maturidade tecnológica na cadeia produtiva no hidrogênio. O custo para implantação produtiva e logística da tecnologia é alto (IRENA, 2022).

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o custo do quilo do hidrogênio cinza é de pouco mais de US\$ 1 - o que permite que seja competitivo em relação ao gás natural. O hidrogênio azul custa, em média, US\$ 2,3 o quilo. Já em relação ao hidrogênio verde, o quilo fica entre US\$ 3 e US\$ 8, dependendo da fonte de energia utilizada e a região do mundo onde essa energia é produzida e, com isso, o gás não é utilizado em larga escala no mundo. No entanto, a expectativa é que ocorra a ampliação da oferta de energias renováveis no mundo e ganhos de escala produtiva tornem o hidrogênio verde competitivo com o azul em 2030 e, no decorrer da próxima década, os custos produtivos tendem a se aproximar dos valores atuais para produção do hidrogênio cinza (IRENA, 2022). Essa tendência é mostrada na Figura 5, dividida por país.

Figura 5 - Países em que o hidrogênio verde possivelmente será mais barato que o hidrogênio azul por ano



Fonte: BloombergNEF (2021d).

2.4 Cenário atual

2.4.1 No mundo

Em 2019, a União Europeia anunciou o plano de ação para atingir a neutralidade de carbono até 2050. Em 26 de outubro de 2020, o primeiro ministro do Japão declarou que, até 2050, o país deseja tornar-se uma nação 100% descarbonizada, com zero emissões de gases. Um mês antes, o presidente da China também anunciou que o país tem o objetivo de atingir a neutralidade do carbono até 2050. Por último, em janeiro de 2021, o presidente dos Estados Unidos assinou uma ordem executiva para retornar ao tratado de Paris (MITSUBISHI, 2021).

O mundo tem caminhado para atingir a neutralidade do carbono, com um aumento da utilização do hidrogênio para produzir energia limpa, sem emissões de CO₂.

Uma série de projetos de produção de hidrogênio verde estão sendo planejados no mundo, como listados na figura 06:

Figura 6 - Os 20 maiores projetos do mundo para produção de hidrogênio verde em larga escala já anunciados



Fonte: IRENA (2021).

2.4.2 No Brasil

O Brasil tem a oportunidade de tornar-se uma potência na produção do hidrogênio verde. No país, estão sendo implementados três hubs para fabricação do H₂V: Porto do Pecém, no Ceará; Porto de Suape, em Pernambuco e Porto do Açu, no Rio de Janeiro. Esses centros já firmaram memorandos de entendimento com grandes grupos internacionais, sendo a exportação um dos principais destinos para o combustível gerado no país.

O projeto em estágio mais avançado é um projeto piloto anunciado pela empresa portuguesa EDP no porto cearense, para produção do hidrogênio verde, por meio da energia solar e da eletrólise da água. A operação está prevista para iniciar no final de 2022.

O Ceará já assinou 24 memorandos de entendimento para instalação de usinas de produção do gás (CEARÁ, 2022)

Em Pernambuco foi anunciado um memorando de entendimento com a empresa francesa Qair, assim como uma parceria entre a Neoenergia e o governo do Estado para produção da fonte de energia.

Em 2021, foi anunciado o projeto H2Brasil, criado pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, com o objetivo de apoiar o aprimoramento da expansão do hidrogênio verde no país, atuando como peça fundamental para a redução da emissão de gases de efeito estufa e contribuindo com a descarbonização da economia brasileira (CEARÁ, 2021). Esse é um projeto de Cooperação Brasil-Alemanha, que já vem desenvolvendo trabalhos nas áreas de energia sustentável e eficiência energética, em parceria com o Ministério de Minas e Energia.

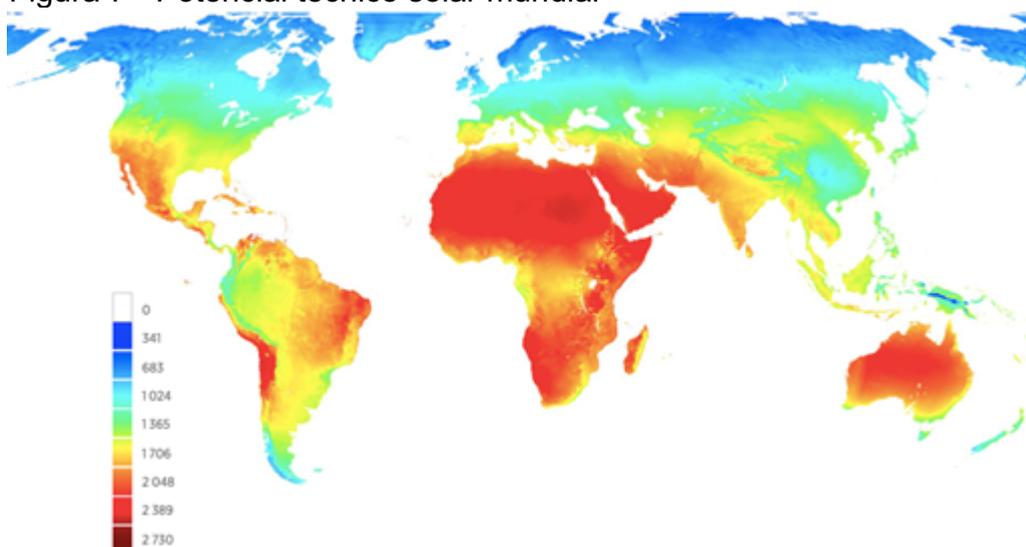
Diversas ações estão incluídas no projeto: análise sobre a implementação de um sistema de certificação de H₂V no país; elaboração de cenários de planejamento energético; apoio a universidades brasileiras por meio da instalação de laboratórios e intercâmbio com instituições de pesquisa e universidades alemãs; desenvolvimento de tecnologias, ideias e projetos inovadores para a produção de H₂V e seus derivados, entre outras ações (CEARÁ, 2021).

O hidrogênio verde é mais economicamente viável em lugares que possuem uma ótima combinação de abundantes fontes renováveis, terrenos

disponíveis, acesso à água e a estrutura para transportar e exportar energia para centros de grande demanda.

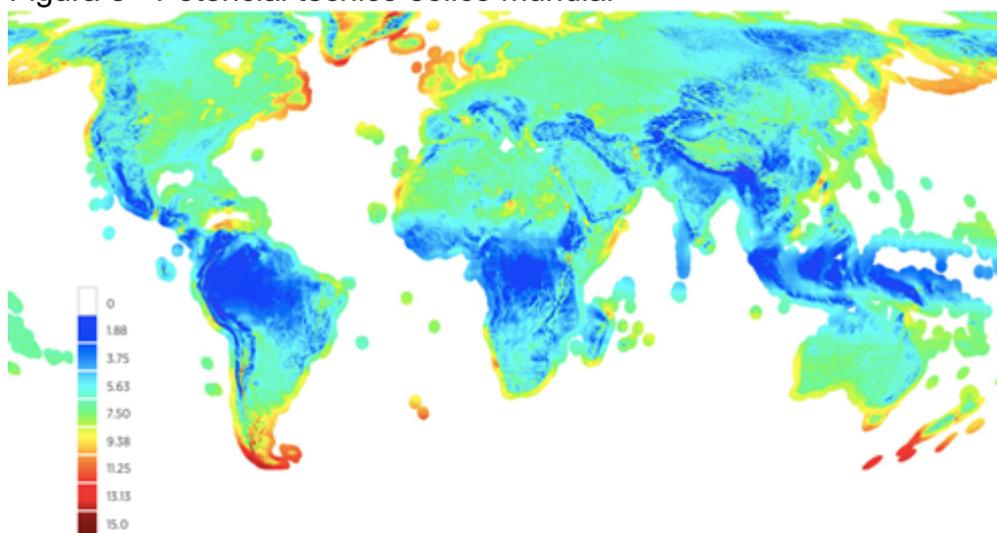
O Brasil, principalmente o Nordeste do país, possui uma ótima combinação de fontes renováveis, como pode ser visto nas figuras 7 e 8:

Figura 7 - Potencial técnico solar mundial



Fonte: IRENA (2021).

Figura 8 - Potencial técnico eólico mundial



Fonte: IRENA (2021).

Em se tratando do estado do Ceará, alguns motivos levam o estado a ser uma promessa para a produção do hidrogênio verde (FIEC, 2021). São eles:

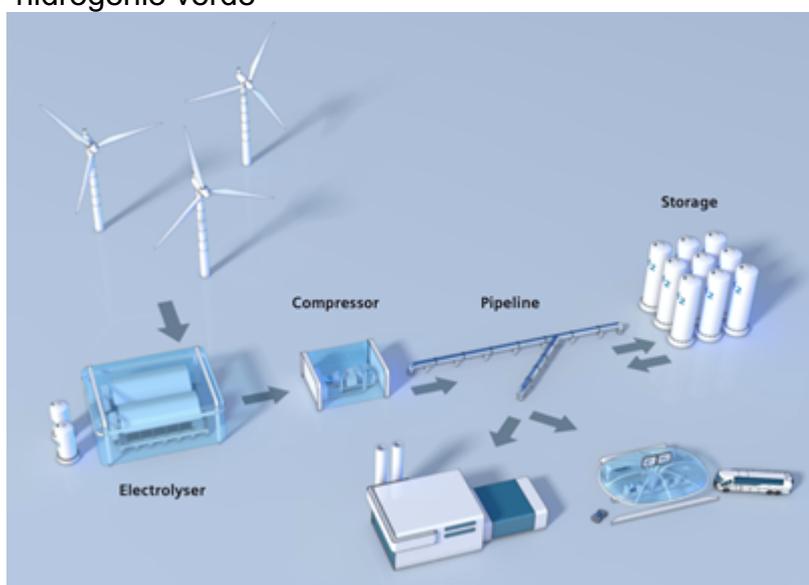
- Potencial de energia renovável no Estado, com grande abundância de fontes renováveis e um baixo custo de eletricidade;

- Localização privilegiada e baixo custo de logística;
- Existência de uma ZPE (Zona Portuária de Exportação);
- Elevados incentivos fiscais;
- Complementaridade diária das energias solar e eólica (o que ocasiona uma condição ideal para eletrolisadores);
- Porto do Pecém como mercado consumidor de hidrogênio (H₂);
- Parceria estratégica com o Porto de Roterdã (Holanda) para exportação do hidrogênio verde produzido no Estado.

2.5 Geração de Hidrogênio Verde

Os principais elementos para geração, compressão, transmissão e armazenamento do hidrogênio verde estão listados na figura 9.

Figura 9 - Elementos principais para geração, compressão, transmissão e armazenamento do hidrogênio verde



Fonte: SIEMENS (2021).

A produção do hidrogênio verde consiste em uma rota de zero carbono. Sua produção utiliza tecnologias que são conhecidas há bastante tempo, que é a eletrólise, utilizando, como fonte de energia, fontes renováveis (IRENA, 2021).

A eletrólise da água teve início em 1789, quando foi utilizado um gerador eletrostático para produzir uma descarga eletrostática entre dois eletrodos imersos na água (LEVIE, 1999). Em desenvolvimentos posteriores, Johann Wilhelm Ritter

explorou a tecnologia da bateria Volta, o que permitiu a separação de produtos gasosos (BERG, 2008).

Quase um século depois, em 1888, um método de síntese industrial de hidrogênio e oxigênio via eletrólise foi desenvolvido e, em 1902, mais de 400 eletrolisadores de água industriais já estavam em operação (ZHANG et al., 2012; KREUTER, 1998).

Inicialmente, os eletrolisadores utilizados possuíam soluções alcalinas aquosas como seus eletrólitos. Essa tecnologia é utilizada até os dias atuais. Uma inovação mais recente foi o desenvolvimento do eletrolisador com membrana de troca de prótons (PEM), que foi inicialmente descrito nos anos 1960, pela General Electric, como um método de produção de oxigênio (PERA et al., 2013).

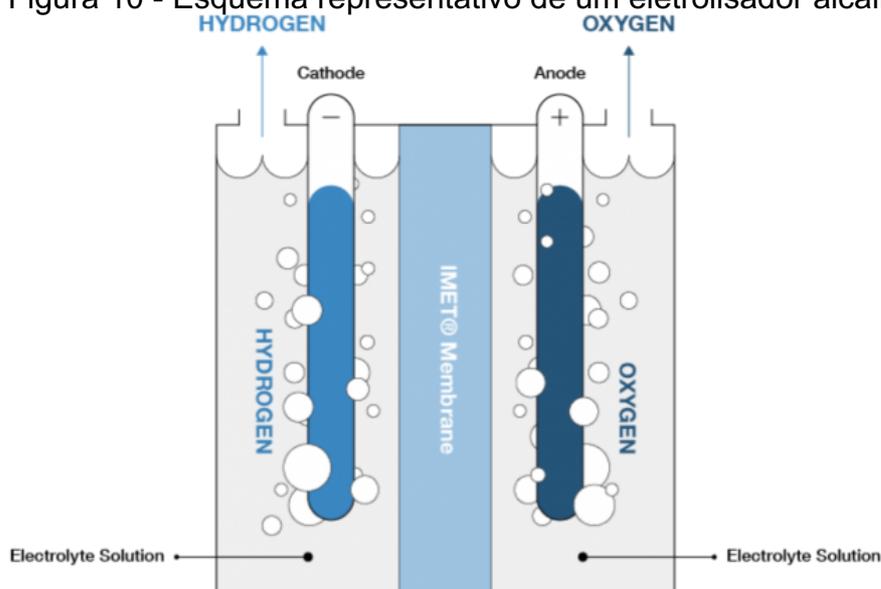
2.5.1 Tipos de eletrolisadores mais utilizados para produção de hidrogênio verde

2.5.1.1 Eletrolisador alcalino

É um eletrolisador que possui uma tecnologia estabelecida no mercado há alguns anos, e é a mais comum utilizada na produção de hidrogênio. Esse eletrolisador se baseia na eletrólise de soluções alcalinas, tipicamente uma solução aquosa, de aproximadamente 30% em massa de KOH ou NaOH. A adição de um sal (como eletrólito) aumenta a condutividade elétrica da água, e o hidrogênio é gerado como subproduto, como na produção do cloro ou hidróxido de sódio (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

As partes de um eletrolisador alcalino são: os eletrodos, uma membrana separadora com micro poros e uma solução de eletrólito alcalino (TURNER et al., 2008). A reação de separação das moléculas da água é iniciada quando uma tensão suficiente é aplicada através dos eletrodos imersos na solução aquosa. A alimentação da água é feita no cátodo, onde a água é dissociada em hidrogênio e íons OH^- . Os íons OH^- transitam pela solução, atravessando a membrana separadora, em direção ao ânodo, onde se combinam e liberam seus elétrons extras para formar água, elétrons e O_2 (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

Figura 10 - Esquema representativo de um eletrolisador alcalino



Fonte: Powerserv (2012).

Uma característica que é de extrema importância para o eletrolisador alcalino é o material do eletrodo, que influencia no efeito da cinética global da reação eletroquímica e no potencial de dissociação da água (SHEN et al., 2011).

Normalmente, os materiais utilizados são diferentes. O cátodo é feito de níquel, com uma camada catalítica de platina e o ânodo pode ser de níquel ou de cobre, revestido por óxidos de manganês, volfrâmio e rutênio (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

É um processo durável e rentável, que produz hidrogênio de alta pureza (SIEMENS, 2021). No entanto, essa tecnologia não apresenta os maiores valores de eficiência, sendo sua média entre 50% e 60%, quando baseado no poder calorífico inferior do hidrogênio (TURNER et al., 2008).

Esse tipo de eletrolisador opera em temperaturas entre 50°C e 100°C e com pressão de operação normal de 3,0 até 30,0 bar, logo, trabalha com água no estado líquido (MOKWA; TANAKA; GONÇALVES, 2007).

De acordo com Bičáková e Straka (2012), as reações para o cátodo e ânodo são, respectivamente:



Sendo a reação global:



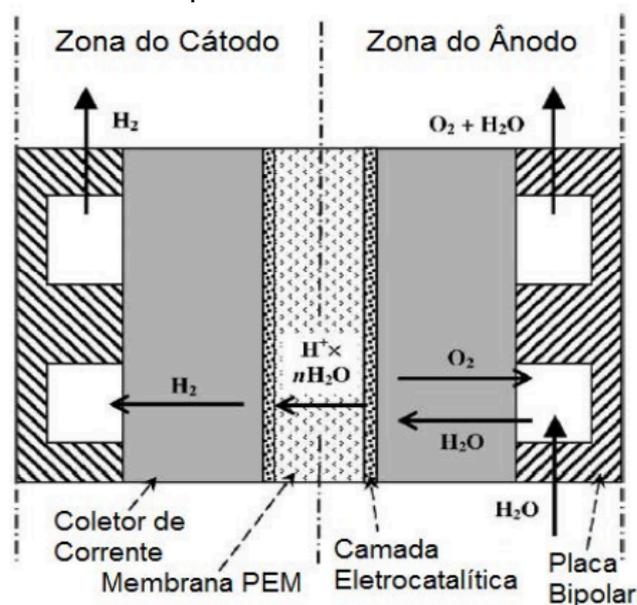
2.5.1.2 Eletrolisador tipo PEM

O desenvolvimento mais recente para a eletrólise de água é o processo de membrana de troca de prótons, primeiramente descrito nos anos 1960, pela General Electric como um método para produção de oxigênio (ISHIKARA; OTA, 2018).

Os eletrolisadores do tipo “membrana de troca de prótons” operam com uma membrana que é permeável para prótons, mas não para hidrogênio ou oxigênio gasoso, e opera como um separador para prevenir os gases gerados misturem-se (SIEMENS, 2021).

Nessa tecnologia, a alimentação da água é feita no ânodo, onde é decomposta em oxigênio, prótons e elétrons. Os prótons são transportados por meio de uma membrana, que permite sua passagem até o cátodo, onde são recombinados com os elétrons e ocorre a formação do gás hidrogênio (MARSHALL et al., 2007).

Figura 11 - Ilustração esquemática de um eletrolisador tipo PEM



Fonte: Adaptado de Grigoriev et al. (2006).

O eletrolisador tipo PEM utiliza água pura como solução eletrolítica, o que evita a necessidade de recuperação e reciclo do eletrólito, requerido nos eletrolisadores alcalinos. Essa tecnologia oferece confiabilidade na performance, com alta densidade energética e gera o gás em alta qualidade. Esses eletrolisadores necessitam de menor manutenção, e seu produto é livre de químicos e impurezas. Esse “novo” tipo de eletrolisador alcança uma alta densidade de energia e é extremamente versátil. Pode ser utilizado para estabilização da rede elétrica e casos em que a alimentação da eletricidade é realizada por meio de energia do vento (eólica) e sistema fotovoltaico (SIEMENS, 2021).

Essa tecnologia apresenta diversas vantagens em relação ao convencional eletrolisador alcalino, como uma maior eficiência energética, que pode alcançar de 55% a 70% (TURNER et al., 2008). Porém, esses sistemas necessitam de componentes especiais, como uma membrana polimérica de alto custo e eletrodos porosos, além de coletores de correntes (AWASTSHI et al., 2011). Essa necessidade acaba aumentando os custos para adquirir esse eletrolisador.

Os eletrolisadores tipo PEM trabalham com temperaturas de operação similares aos valores encontrados em eletrolisadores alcalinos, 80°C a 100°C e, em relação às pressões de operação, elas podem atingir valores superiores, até 70 bar (MOKWA; TANAKA; GONÇALVES, 2007).

Em relação à composição do eletrolisador, geralmente é utilizada platina negra, irídio, rutênio e ródio para as camadas dos eletrodos e membranas poliméricas finas de Nafion, que servem como um separador de gás (BIČÁKOVÁ; STRAKA, 2012).

Segundo Marshall et al. (2007), as reações para o ânodo e cátodo para essa tecnologia são, respectivamente



Desta forma, a reação global pode ser escrita da forma abaixo:



Percebe-se, então, que a reação global é igual à apresentada para os eletrolisadores alcalinos anteriormente (Equação 3).

2.5.2 Água

Para produzir hidrogênio verde são necessárias duas matérias-primas principais: energia renovável e água pura.

Para obter a água com a pureza necessária, primeiramente, é realizado um tratamento da água de alimentação com várias etapas de limpeza e purificação. A fonte da água pode ser diversa: água superficial, água salina, água subterrâneas. O tratamento primário é chamado de clarificação, que visa reduzir a cor e a turbidez da água.

Normalmente, as partículas menores suspensas na água (independente da fonte de água) são difíceis de ser removidas, pelo seu tamanho, sua textura coloidal e por possuírem cargas negativas, o que as impede de formar grandes partículas que poderiam ser mais facilmente retiradas. A eliminação dessas partículas requer que, primeiramente, as suas cargas sejam neutralizadas para, posteriormente, as partículas sejam estimuladas a colidirem umas com as outras. A etapa de neutralização das cargas é chamada de coagulação e a construção de grandes flocos a partir de pequenas partículas é chamada de floculação.

2.5.2.1 Tratamento primário

A coagulação é o processo unitário que consiste na formação de coágulos através da reação do coagulante, de modo que ocorra um estado geral de equilíbrio eletrostaticamente instável de partículas dentro da massa líquida. A coagulação provoca mudanças físico-químicas produzidas pela dispersão, na água, de um coagulante solúvel que se hidrolisa em partículas carregadas positivamente, anulando as cargas negativas dos coloides, formando com eles os coágulos (SOUZA, 2007).

A coagulação ocorre com a adição de cátions trivalentes à água, que são íons eletrostaticamente atraídos por partículas carregadas negativamente, e como são cargas positivas, deslocam os cátions monovalentes. A carga negativa, assim como a força repulsiva são reduzidas e, com isso, as partículas passam a colidir e se

manter juntas. Uma suspensão coloidal estável pode ser desestabilizada e, dessa forma, as partículas não vão se manter em suspensão. Normalmente, a fonte de cátions trivalentes adicionadas ao processo de tratamento de água é o sulfato de alumínio. O alumínio tem uma vantagem, além de sua alta carga positiva: uma fração dos íons de alumínio podem formar óxido de alumínio e o hidróxido, de acordo com a reação abaixo:



No processo de coagulação é dosado um agente químico coagulante primário, que pode ser sulfato de alumínio, sulfato ferroso, sulfato férrico, cloreto férrico e outros. Pode ser dosado em linha ou dosado em um tanque com misturador, que facilita a união do produto químico com a água que está sendo tratada (SOUZA, 2007).

O complexo formado é viscoso e pesado, contribuindo para a clarificação da água no tanque de decantação se as partículas coloidais entrarem em contato com o floco. Esse processo é aprimorado por meio de uma etapa conhecida como floculação (SOUZA, 2007).

Na floculação, ocorre o agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas, que são os coágulos, de modo a formar outras maiores, denominadas flocos, que poderão ser removidas posteriormente por decantação, flutuação e por filtração (SOUZA, 2007).

O floculador institui gradiente de velocidade na água, para que as partículas em um fluxo de movimento rápido possam alcançar e colidir com partículas de movimento lento. Normalmente, os gradientes de velocidade são introduzidos por pás rotativas (SOUZA, 2007).

Após a floculação, ocorre a etapa da decantação. É um processo dinâmico de separação das partículas sólidas suspensas nas águas; tais partículas tenderão a cair, se depositando no fundo dos tanques com uma certa velocidade, em função do seu peso (SOUZA, 2007).

Um tipo de decantador existente é o de fluxo horizontal, que é o tipo em que a água entra por uma extremidade movendo-se horizontalmente na direção longitudinal saindo pela outra extremidade. O decantador pode ser dividido em 4 zonas (SOUZA, 2007).

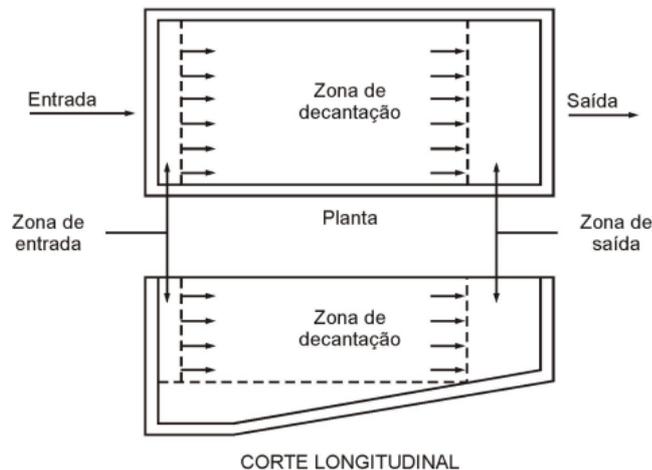
Zona de turbilhonamento: entrada da água, onde é verificado certa agitação, de modo que a localização das partículas é variável;

Zona de decantação: nessa região não há agitação, de modo que as partículas avançam e descem lentamente;

Zona de ascensão: nessa região, os flocos acompanham o fluxo da água (não descem);

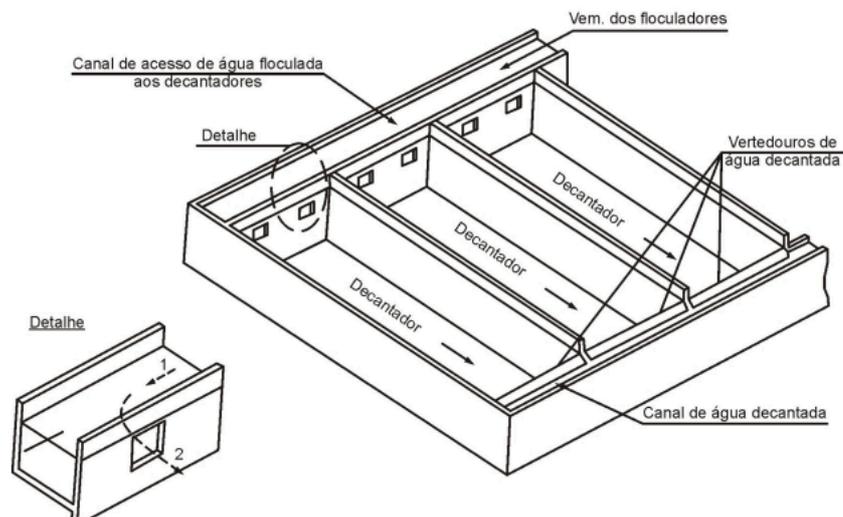
Zona de repouso: é a zona limitada pelo fundo do decantador, onde o lodo se acumula. Normalmente, o fluxo da água não possui influência nessa região. A camada de lodo deve ser retirada quando estiver espessa, seguido pela limpeza do decantador.

Figura 12 - Esquema do decantador de fluxo horizontal



Fonte: Souza (2007).

Figura 13 - Esquema detalhado do decantador de fluxo horizontal



Fonte: Souza (2007).

Após o processo de decantação, a água sai das unidades de decantação através de calhas coletoras (apresentadas na figura 13), que permitem a distribuição do fluxo sem uma alta velocidade ascensional na estrutura, diminuindo o processo de arraste dos flocos (SOUZA, 2007).

Após o processo de decantação, a água passa pela unidade de filtração, responsável pela retenção das partículas existentes na água que não foram removidas pela decantação. Os filtros podem ser constituídos de várias camadas de leitos com materiais filtrantes, como areia, carvão, antracito, com granulometria definida. Além disso, também podem possuir camadas-suporte, que são camadas de material granular e pedregulhos de granulometria bem maior que a dos leitos filtrantes, e também servem de sustentação (SOUZA, 2007).

O tratamento primário da água tem como objetivo melhorar os seguintes parâmetros (SOUZA, 2007):

- Turbidez: ocasionada pela presença de bactérias, protozoário e partículas de matéria inorgânica, constituindo flocos com diâmetros superiores a 1 μ .
- Cor: provocada pela presença de impurezas na água que se encontram em suspensão fina, em estado coloidal ou ainda em solução. São partículas com diâmetros entre 1 μ m e 1 μ .
- Alcalinidade: é uma substância que é produzida por impurezas que podem reagir com os ácidos provocando a sua neutralização. A alcalinidade da água é a capacidade da água de neutralizar ácidos fortes, devido a sua presença de várias substâncias básicas, como hidróxido de sódio, hidróxido de magnésio, carbonato de cálcio, bicarbonato de cálcio, entre outros.
- Dureza: é a propriedade que caracteriza as altas concentrações de minerais dissolvidos na água, como sais de cálcio e magnésio.

Além da clarificação, a água também pode passar por um processo de desinfecção. É um processo de eliminação dos micróbios patogênicos de uma água para consumo humano ou industrial (SOUZA, 2007).

Os principais agentes desinfetantes utilizados são: calor, irradiação, luz ultravioleta, ozônio, permanganato de potássio ou compostos de cloro (hipoclorito de cálcio; hipoclorito de sódio, cloro gasoso).

Existem vários dispositivos dosadores, como bombas dosadoras e hidroejetores (SOUZA, 2007).

Após o tratamento primário, no entanto, a água necessita passar por um processo de desmineralização, com objetivo de remover total ou parcialmente os sais minerais e íons presentes.

2.5.2.2 Desmineralização da Água

Segundo Oosterom (2000), processos gerais por todo o mundo que dizem respeito à água desmineralizada consistem em destilação, troca iônica ou osmose reversa em combinação com troca iônica. Estes processos removem sólidos dissolvidos até serem atingidos níveis de qualidade restritos.

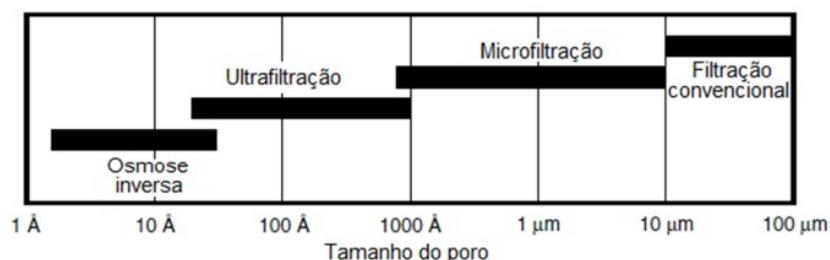
Os processos de separação por membranas ocorrem permitindo a passagem de um ou mais espécies selecionadas na fase de alimentação, de caráter líquido, gasoso ou solução, movida pela ação de uma força motriz (ANADÃO, 2010).

Segundo as características do mecanismo de separação por membranas, os processos podem ser agrupados em:

3. Ultrafiltração e microfiltração, onde o transporte ocorre por fluxo convectivo (onde o permeado é transportado por poros estreitos devido à força motriz convectiva) (BAKER, 2004).
4. Osmose reversa, pervaporação e separação de gases, cujas membranas são constituídas de uma camada densa de polímeros, sem poros visíveis (BAKER, 2004).
5. Nanofiltração, processo cujo modelo é intermediário entre a ultrafiltração e a osmose reversa (BAKER, 2004).

Os processos de separação da água por membranas estão ilustrados na figura abaixo, conforme o tamanho dos componentes

Figura 14 - Diferença das membranas segundo o tamanho relativo dos solutos que ficam retidos



Fonte: Adaptado de Baker (2004).

2.5.2.3 Ultrafiltração

O processo de ultrafiltração é a separação de água e microssolutos de macromoléculas e coloides, utilizando uma membrana de poros pequenos. O diâmetro médio dos poros varia na faixa de 100 à 1000 Å (BAKER, 2004).

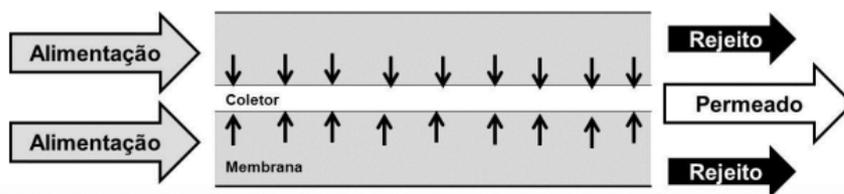
As pequenas membranas de ultrafiltração possuem uma superfície com pequenos poros, que definem a separação, proporcionando a seleção mecânica (BAKER, 2004).

Os processos de ultrafiltração e microfiltração relacionam-se pela distinção entre o tamanho dos poros de duas membranas. As membranas de microfiltração têm poros maiores e são utilizadas para separar partículas da faixa de 0,1 a 10 µm e a ultrafiltração tem membranas com diâmetros de poros de 10 a 1000 Å (BAKER, 2004).

2.5.2.4 Osmose Reversa

O termo “osmose” é importante para caracterizar um processo onde são empregadas membranas semi-permeáveis, que permitem a separação do soluto em duas correntes: permeado, contendo a água purificada que passa através da membrana e o concentrado ou rejeito, a porção que contém sais e compostos retidos (MALAEB; AYOUB, 2011). O esquema da osmose reversa está apresentado na figura 15.

Figura 15 - Esquema do fluxo da água de alimentação, permeado e concentrado



Fonte: Malaeb e Ayoub (2011).

A osmose e a osmose reversa são processos que estão diretamente relacionados. A osmose é um processo denominado quando uma solução salina é separada da água pura por uma membrana seletiva, isto é, uma membrana que

permite livremente a passagem de água e restringe a passagem de soluto. Nesse caso, a água passará através da membrana para o lado de menor concentração de água até o equilíbrio osmótico, e a força motriz dessa transferência é a transferência de massa (BAKER, 2004; REDDY et al., 2005; VARGAS, 2003).

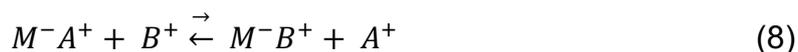
Se uma pressão hidrostática for aplicada no lado da solução salina, o fluxo de água poderá ser reduzido e, com pressão suficiente, poderá cessar. A pressão hidrostática necessária para submeter o processo ao equilíbrio é denominada pressão osmótica (BAKER, 2004; REDDY et al., 2005; VARGAS, 2003).

Se uma pressão maior que a pressão osmótica for aplicada no lado da solução salina, o fluxo de água passará a ser inverso, e ela passará da solução salina (mais concentrada) para o lado da solução de água pura (menos concentrada). Esse processo é denominado osmose reversa, um método muito importante na produção da água pura (BAKER, 2004; REDDY et al., 2005; VARGAS, 2003).

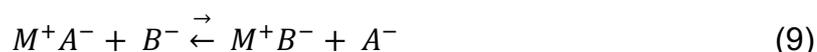
Uma séria limitação das membranas de osmose comerciais de poliamida é sua sensibilidade ao ataque por cloro. Ao estudar a degradação de membranas de osmose reversa de poliamida por hipoclorito, os autores KANG et al. (2007) concluíram que a cloração destrói ligações de hidrogênio nas camadas de poliamida, causando notável declínio no fluxo transmembrana, especialmente em pH ácido.

2.5.2.5 Troca iônica

A troca iônica, que pode ser considerado como um polimento no tratamento de água, consiste na remoção de íons indesejáveis, que são substituídos por uma quantidade equivalente de espécies iônicas que apresentam um menor potencial de perigo, presentes em uma matriz sólida insolúvel (HABASHI, 1993). Uma reação de troca iônica pode ser definida como uma troca reversível de íons entre a fase sólida (trocador iônico) e a fase líquida (solução aquosa). Desta maneira, para um trocador iônico $M^- A^+$, onde cátions A^+ são os íons trocador pela solução aquosa pelos cátions B^+ , a troca iônica pode ser representada pela equação abaixo (TENÓRIO; ESPINOSA, 2001):



A equação acima representa uma reação de troca catiônica, onde M^{-} é o grupo funcional da resina. Os cátions A^{+} e B^{+} são chamados contra-íons e os íons presentes em solução tendo a mesma carga da matriz são chamados co-íons (TENÓRIO; ESPINOSA, 2001). Similarmente, tem-se o outro processo que é uma reação de troca aniônica, que pode ser representado pela equação abaixo:



Diferentes tipos de resinas de troca iônica podem ser produzidos de acordo com a constituição da matriz, grupos de troca, assim como características físico-químicas (HABASHI, 1993).

Nas aplicações industriais, o processo de troca iônica é realizado quando o fluxo de efluente/água passa através de um leito estacionário, formado por resinas de troca iônica. Em função dos íons que estão sendo substituídos, as resinas são denominadas aniônicas – quando realizam a troca entre ânions e catiônicas – quando realizam a troca de cátions (HABASHI, 1993).

2.5.2.6 Disponibilidade da água

A maior parte da água presente na terra atualmente é extremamente salina para utilização humana, em indústrias e em processos. 97% da água presente na Terra possui uma concentração de mais de 30.000 mg/L. A água aceitável para ser utilizada pela comunidade deve possuir menos de 1000 mg/L de sólidos dissolvidos (sais).

Dentro dos 3% restantes que representam a água doce mundial, a sua maioria está classificada em águas subterrâneas e geleiras. Cerca de 0,3% são os rios e lagos, chamada água superficial, que é um tipo de fonte de água avaliada nesse trabalho.

No Brasil, a resolução Conama nº 357 (Conama, 2005) adota a seguinte classificação:

Tabela 1 - Classificação das águas naturais em função da concentração de STD (sólidos totais disponíveis).

Concentração de Sólidos Totais Disponíveis (mg/L)	Classificação
<1.000	Águas doces
de 1.000 a 5.000	Águas ligeiramente salobras
5.001 a 15.000	Águas moderadamente salobras
15.001 a 35.000	Águas fortemente salobras
>35.000	Águas marinhas

Fonte: Silveira et al. (2015).

A água doce é um recurso finito e vulnerável, essencial para sustentar a vida, o desenvolvimento e o meio ambiente, e o Brasil está incluído entre os países que mais possuem reserva de água doce do mundo. Porém, devido às suas dimensões geográficas e diversidade climática, algumas regiões sofrem graves problemas de escassez de água, como o Semi-Árido nordestino. A disponibilidade dessa água na região Nordeste apresenta grande variabilidade sazonal. Os rios são intermitentes, escoam durante o primeiro semestre do ano civil e são secos no segundo semestre.

No estado do Ceará, em específico, de acordo com o Estudo Setorial Especial da Plataforma de Desenvolvimento Ceará 2050, a escassez hídrica do Ceará está associada a semiaridez do clima e a grande variabilidade a ele associada. No Estudo, é comentado que com a nova delimitação da Portaria Nacional de semiárido, 150 de 184 municípios cearenses (81,5%) estão na região semiárida. O estado possui uma evaporação média anual alta e uma baixa precipitação média anual, relação que caracteriza a semiaridez. De acordo com o Relatório da Conjuntura Recursos Hídricos, de 2017, da ANA, alguns fatores que contribuem para o balanço hídrico desfavorável no Nordeste são: baixos índices e irregularidade de chuvas, reduzida disponibilidade de águas subterrâneas, temperaturas elevadas durante o ano todo, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração (ANA, 2017).

Como ilustração da disponibilidade da água superficial no Estado, foi retirado do monitoramento diário do nível de açudes realizado pela COGERH (Companhia de Recursos Hídricos do Estado do Ceará) os valores da média de volumes registrados em todos os açudes do Estado no ano de 2021, ano em que a chuva ficou 10% abaixo da média na quadra chuvosa (consideração pessimista).

Tabela 2 - Capacidade x volume atual dos reservatórios do Ceará em 2021

Ano referência - 2021 (último dia do mês)			
	Capacidade (hm ³)	Volume atual (hm ³)	Vol. Percentual (hm ³)
Janeiro	18.557,10	4.525,70	24,39%
Fevereiro	18.557,10	4.485,30	24,17%
Março	18.557,10	4.854,80	26,16%
Abril	18.557,10	5.125,70	27,62%
Mai	18.557,10	5.530,80	29,80%
Junho	18.557,10	5.355,60	28,86%
Julho	18.557,10	5.139,30	27,69%
Agosto	18.557,10	4.856,30	26,17%
Setembro	18.557,10	4.568,10	24,62%
Outubro	18.557,10	4.303,20	23,19%
Novembro	18.557,10	4.037,70	21,76%
Dezembro	18.557,10	3.828,40	20,63%
Média	18.557,10	4.717,58	25,42%

Fonte: Adaptado da COGERH (2022).

A água superficial possui um acesso mais fácil, por estarem acumuladas na superfície, como rios, riachos, lagos, pântanos, então ela atua como grande fonte de abastecimento do planeta. A água deve passar por um tratamento, a Estação de Tratamento de Água (ETA), para ser utilizada para consumo humano, agricultura, pecuária, indústria.

No Ceará, existe o Programa Segurança Hídrica no Semiárido, que é composto por ações que visam garantir a segurança hídrica no Ceará. É uma proposta para o fornecimento de água adequado para a população e para as atividades econômicas. Alguns resultados esperados do programa, a longo prazo, são (CEARÁ, 2020):

- Oferta de água com garantia adequada e prioridade de atendimento para os múltiplos usos: abastecimento humano, dessedentação animal, indústria e turismo, agricultura irrigada;
- Redução do desperdício de água;
- Desenvolvimento de técnicas e tecnologias para o uso eficiente da água;
- Melhoria da qualidade de vida no Semiárido Cearense, pelo fornecimento de água com adequado nível de garantia.

Por conta do potencial quase que ilimitado disponível da água do mar, as pessoas tem feito pesquisas e tentado desenvolver tecnologias mais baratas e fáceis para converter a água salina em água fresca. As tecnologias de membrana de

osmose reversa tem diminuído seu preço nos últimos 40 anos. A utilização da membrana de dessalinização tem aumentado, com a melhoria nas tecnologias e a diminuição dos custos.

Existem várias tecnologias para tratamento da água do mar, como: evaporação multiestágios flash, evaporação de múltiplos efeitos, compressão de vapor. A tecnologia mais utilizada é a osmose reversa.

Preços caíram devido à diminuição dos valores dos equipamentos, reduções no consumo de energia e avanços no design do sistema e experiências operacionais.

A água do mar, também chamada de água salina, é o tipo mais comum no planeta. Possui uma grande quantidade de sais, como o cloreto de sódio. Em suas condições originais, a água não pode ser utilizada para consumo humano, nem para outras atividades que necessitam de água. Para ser apta à utilização, a água deve passar por um processo de dessalinização, onde seus sais são retirados.

O Ceará é banhado pelo Oceano Atlântico com uma extensa faixa litorânea de cerca de 573 km. Logo, é uma alta disponibilidade em relação às águas superficiais, já que o recurso pode ser descrito como quase que ilimitado.

2.6 Armazenamento de Hidrogênio Verde

Atualmente, o hidrogênio é mais comumente armazenado como gás ou líquido em tanques de pequena escala, possuindo mobilidade ou sendo estacionários. No entanto, a cadeia de valor do hidrogênio no futuro, que será intercontinental e em larga escala, necessitará de uma variedade maior de opções de armazenamento (IEA, 2019).

Tanques armazenando hidrogênio comprimido ou liquefeito possuem taxas de descarga e eficiência de cerca de 99%, sendo apropriadas para aplicações de larga escala, onde uma estação local de combustível ou de matéria-prima necessita estar prontamente disponível (IEA, 2019).

Hidrogênio comprimido (com pressão de 700 bar) possui apenas 15% da densidade energética da gasolina, logo, o armazenamento de uma quantidade equivalente de energia em uma estação de combustível necessita de quase 7 vezes mais espaço. Amônia possui uma melhor densidade energética, então, diminui a necessidade de tanques maiores. Quando se trata de veículos, ao invés de estações

de abastecimento, o hidrogênio comprimido possui uma densidade energética maior que as baterias de íons-lítio e, com isso, permitem um alcance maior em carros ou caminhões do que é possível com veículos elétricos à bateria (IEA, 2019).

O armazenamento do hidrogênio em materiais em estado sólido, como metal ou químicos híbridos ainda está em fase inicial de desenvolvimento, porém, poderiam permitir um melhor armazenamento do hidrogênio à pressão atmosférica, com melhores densidades (IEA, 2019).

Em relação a opções para armazenamento de hidrogênio à larga escala e a longo prazo, cavernas de sal, reservatórios de gás natural esgotados e aquíferos são opções para esse armazenamento (HyUNDER, 2014; KRUCK et al., 2013).

Eles são atualmente utilizados para armazenamento de gás natural e proporcionam economias de escalas significativas e alta eficiência (a quantidade de hidrogênio injetada dividida pela quantidade que pode ser extraída), baixos custos operacionais e baixos custos de terra. Essas características significam que, provavelmente, eles serão uma opção de menor custo de armazenamento de hidrogênio, embora o hidrogênio possua uma baixa densidade energética em comparação com o gás natural (BUNGER et al., 2014).

Embora o armazenamento geológico ofereça as melhores perspectivas para armazenamento de longo prazo e à grande escala, a distribuição geográfica, o tamanho grande e os requisitos de pressão mínima dos locais os tornam muito menos adequados para o armazenamento de curto prazo e em menor escala, sendo, nesse caso, os tanques – mencionados anteriormente a opção mais promissora (IEA, 2019).

2.7 Distribuição do Hidrogênio Verde

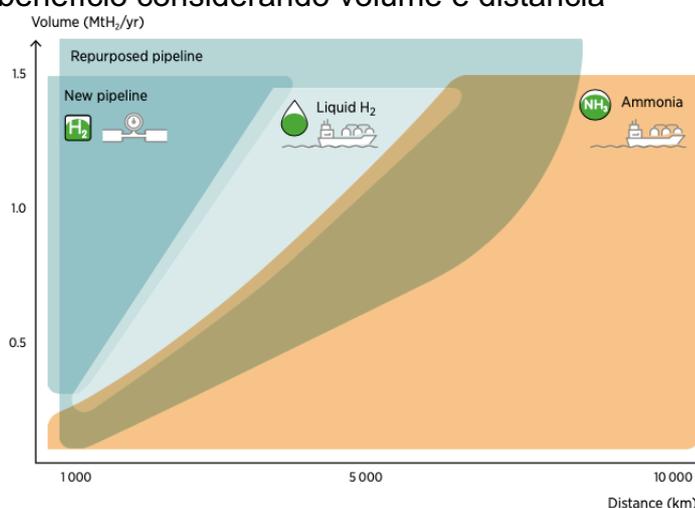
Caso o hidrogênio não seja consumido no local onde foi produzido é necessário ser transportado. Existem vários processos que realizam essa operação, como: containers com o gás à alta pressão; gás liquefeito em containers adequados; na forma de metanol ou amônia; quimicamente dissolvido em um transportador médio, chamado de “Líquido Orgânico Transportador de Hidrogênio” (SIEMENS, 2021).

Os dois principais modos para transportar hidrogênio são: gasodutos ou navios. A distância e o volume são essenciais para determinar qual modo é mais

viável. Inicialmente, para pequenos volumes (0,3 milhões de toneladas de hidrogênio por ano), os gasodutos podem ser mais baratos que os navios para distâncias menores que 1500 km. Para grandes volumes (1,5 milhões de toneladas de hidrogênio por ano), a construção de novos gasodutos para hidrogênio seria a opção com maior custo-benefício para distâncias acima de 4000 km (IRENA, 2021).

A figura 16 mostra qual forma de transporte é a mais viável dependendo da condição.

Figura 16 - Transporte com maior custo-benefício considerando volume e distância



Fonte: Irena (2021).

O transporte de hidrogênio em navios é tecnicamente possível para distâncias maiores, onde gasodutos não são uma opção. Por conta de sua baixa densidade por volume, o hidrogênio gasoso é convertido em um líquido com maior densidade energética antes de ser carregado em um navio (IRENA, 2021).

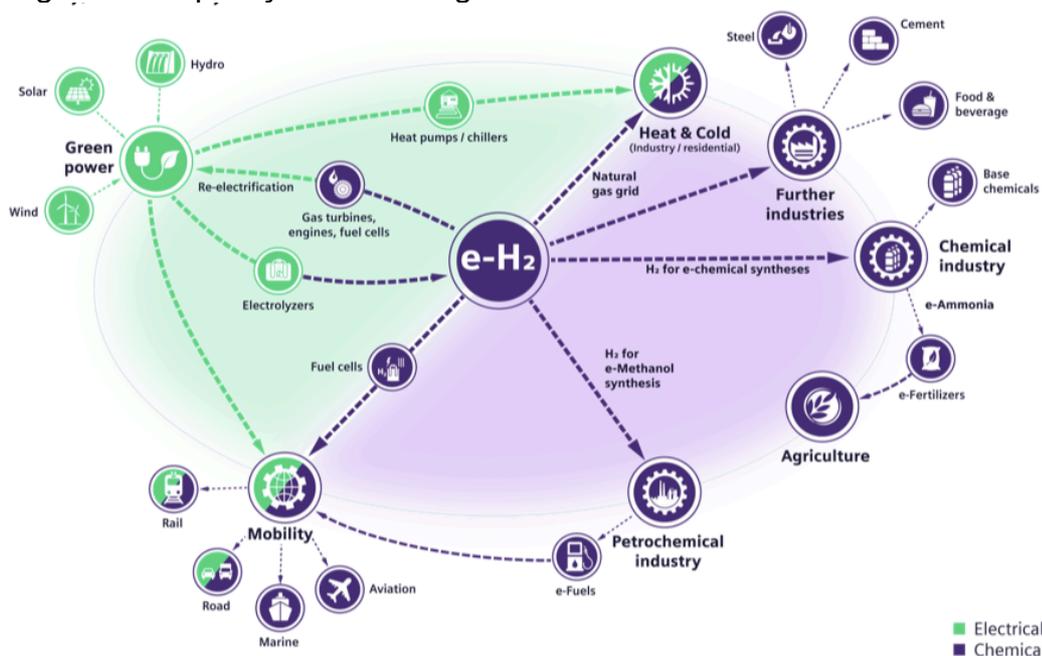
Existem também vários vetores para transporte do hidrogênio por meio do navio, porém, a amônia é a mais promissora (IRENA, 2021).

2.8 Utilização do Hidrogênio Verde

O acoplamento de setores por meio da conversão de energia renovável em hidrogênio oferece uma maneira de acelerar a transição energética, que será necessária para evitar mudanças climáticas catastróficas. A conversão de eletricidade de fontes verdes em hidrogênio, que pode ser reconvertida em energia,

utilizada como combustível, como matéria prima industrial, para e-combustíveis, como e-querosene, e-diesel ou e-metano, é uma maneira de estabelecer essa ligação entre diferentes setores, incluindo o sistema de energia, indústria, manufatura, edifícios, transporte e mobilidade, entre outros (SIEMENS, 2021).

Figura 17 - Aplicações do hidrogênio verde



Fonte: Siemens (2021).

Atualmente, a maior parte do hidrogênio produzido é utilizado em três setores industriais: refino do óleo, químicos e ferro e aço. A produção de hidrogênio que atende esses setores é em escala comercial e provém, principalmente, do gás natural, do carvão e do óleo, atualmente, que são fontes associadas a impactos ambientais (IEA, 2019).

2.8.1 Energia

O hidrogênio verde, no setor de energia, pode ser utilizado como fonte de energia ou como meio de armazenamento. Ele possui a vantagem de ser compatível com infraestruturas já existentes, como redes de gás, que possuem um enorme potencial de armazenamento.

Onde a infraestrutura adequada já está disponível, o hidrogênio também é uma opção econômica para a descarbonização de calor e energia em edifícios. Além

disso, devido à alta flexibilidade da eletrólise, a produção de hidrogênio verde pode contribuir para a estabilidade de todo o setor de energia, fornecendo serviços de rede, como controle de frequência, buffering para aumentar a resiliência do sistema e geração de energia limpa e despachável em usinas de pico (SIEMENS, 2021).

2.8.2 Indústria

Atualmente, cerca de 90% do hidrogênio produzido é utilizado para indústria, como combustível essencial, ou agente redutor. Hidrogênio é primordialmente utilizado para síntese da amônia e outros fertilizantes, como ureia, assim como para síntese do metanol, vários polímeros e resinas. Outros consumidores do hidrogênio na indústria atual são refinarias e metalúrgicas, assim como indústrias de semicondutores, vidros e alimentos (SIEMENS, 2021).

A utilização do hidrogênio verde como matéria prima nas indústrias pode aumentar de 8 EJ em 2015 para 80 EJ em 2050. Essa tendência será estimulada por regulamentações mais rígidas sobre dessulfurização em refinarias de petróleo e o uso de hidrogênio verde para síntese de amônia e conversão de metano e água em metanol. O calor de processo, especialmente em indústrias com uso intensivo de energia, também pode ser fornecido pelo hidrogênio sem a necessidade de grandes adaptações dos processos de fabricação atuais (SIEMENS, 2021).

2.8.3 Mobilidade

A eletrificação da mobilidade é um dos maiores desafios da descarbonização global. O hidrogênio verde pode ajudar a descarbonizar esse setor de duas maneiras: veículos com células de combustível pode usar hidrogênio diretamente. Em vez de gases, como CO₂ e NO_x, eles produzem apenas água. Esses veículos possuem uma autonomia significativamente superior a dos veículos exclusivamente movidos à bateria, além do seu reabastecimento demorar apenas alguns minutos (SIEMENS, 2021).

A outra maneira do hidrogênio verde auxiliar é através da síntese de combustíveis verdes, obtidos a partir do hidrogênio verde e carbono obtido da agricultura e silvicultura ou captura direta do ar. Dessa forma, mesmo setores com alta demanda de combustível, como aeronáutica e a indústria naval podem ser

descarbonizados. A atual gama de veículos elétricos com células a combustível, incluindo ônibus, carros médios e empilhadeiras, será complementada em um futuro próximo à medida que modelos adicionais de veículos de médio e grande porte, como ônibus, caminhões, vans e trens se tornarem disponíveis (SIEMENS, 2021).

3 DESENVOLVIMENTO E DEFINIÇÕES

3.1 Definição dos parâmetros para escolha da localização da planta

Para definição da localização da planta de hidrogênio, alguns requisitos foram considerados:

- Complementariedade de energia eólica e solar, para alimentação da planta;
- Proximidade com a rede de distribuição de água bruta e com a zona costeira;
- Proximidade aos mercados consumidores com uma localização geográfica ideal para produção desse vetor energético, conectada às principais rotas marítimas;
- Localização em um HUB;
- Proximidade com outras indústrias, que podem ser potenciais consumidoras de H₂;
- Facilidade de acesso e de distribuição do gás;
- Mão de obra com experiência industrial;
- Infraestrutura logística.

Considerando os parâmetros descritos anteriormente, foi escolhido a região do complexo industrial Porto do Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante. O estado do Ceará, em especial o Complexo do Pecém, possui grande potencial para desenvolvimento da cadeia de produção, distribuição, armazenagem e transporte do hidrogênio verde.

O local possui capacidade instalada e um grande potencial calculado de novas instalações de fontes renováveis (eólicas ou fotovoltaicas); possui um berço de atracação em área de futura ampliação portuária; uma rede elétrica robusta com infraestrutura de linhas de transmissão compatível com as demandas das usinas de eletrólise.

O Complexo do Pecém também possui a única Zona de Processamento de Exportação em operação no Brasil, a ZPE Ceará, sendo um poderoso diferencial

competitivo para negócios voltados à exportação devido aos incentivos fiscais que a ZPE cearense oferece.

Em relação ao consumidor, além de um parque industrial com empresas do mercado consumidor de hidrogênio, como aço, fertilizantes, cimento, mineração, o Complexo do Pecém também possui localização geográfica privilegiada, conectada às principais rotas marítimas que ligam o Pecém à Europa e aos Estados Unidos, para possíveis exportações e uma parceria com o Porto de Roterdã, que está se tornando o principal Hub de Hidrogênio na Europa.

A produção de hidrogênio verde pode ser viabilizada a partir de energias renováveis, principalmente solar e eólica. Nesse trabalho, a energia utilizada será a solar, pelo grande potencial do estado do Ceará.

A geração de hidrogênio a partir de geradores fotovoltaicos deve possuir baixo custo, o mínimo de componentes e baixa manutenção.

O rendimento do gerador fotovoltaico é influenciado pela irradiação e temperatura. Há duas possibilidades para a conexão do eletrolisador ao gerador fotovoltaico: uma é o acoplamento direto e a outra é a instalação de um conversor de corrente contínua seguidor do ponto de máxima potência (DJAFOUR et al., 2011).

O Ceará, com seu clima favorável, é um dos estados com maior potencial de geração de energia limpa do Brasil.

De acordo com o Atlas Eólico e Solar do Ceará, de 2019, o potencial solar fotovoltaico do Estado é de 643 gigawatts (GW), suficiente para suprir em mais de duas vezes a demanda de 2019 de energia elétrica do país. A partir desses dados, pode-se determinar que a irradiação normal direta anual da área do Pecém, próxima à instalação da planta, é de 4,7 kWh/m²/dia, possuindo, em vários meses, valor maior que a média. No geral, a localização apresenta uma irradiação com pouca variabilidade durante o ano, o que é um ponto positivo para a instalação da planta.

3.2 Parâmetros da água de entrada

Todos os diferentes tipos de eletrolisadores requerem água ultrapura. Para definir a tecnologia de tratamento de água que será utilizada na planta, é necessário fixar os parâmetros de água pura, de acordo com normas qualitativas. Diferentes organizações possuem as normas de qualidade de água, como:

- ASTM D1193 20211 (American Society for Testing and Materials);
- ISO 3696 (International Organization for Standardization).

Como não existem normas brasileiras que regulam os parâmetros qualitativos da água pura, será utilizada a norma ASTM D1193 20211 como referência para a qualidade da água de entrada do eletrolisador. Nessa norma, a água é especificada como reagente para utilização em análises químicas e testes físicos, e quatro tipos de água são especificados.

Os tipos I e II são mais utilizados para o eletrolisador:

Tipo I: Água reagente preparada por destilação ou processo similar, seguido de um polimento com um leito misto de materiais de troca iônica e um filtro de membrana de 0,2 µm. A água de alimentação para a etapa final de polimento deve ter uma condutividade máxima de 20 µS/cm a 298 K (25°C)

Tipo II: Água reagente deve ser preparada por destilação, utilizando um alambique projetado para produzir um destilado com condutividade inferior a 1,0 µS/cm a 298 K (25°C). Troca iônica, destilação ou osmose reversa e adsorção orgânica podem ser necessários antes da destilação se a pureza não puder ser alcançada por destilação única.

A Tabela 3 ilustra os parâmetros definidos pela ASTM para cada tipo de água.

Tabela 3 - Parâmetros da água

	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Condutividade elétrica máxima (µS/cm), a 298 K (25°C)	0,056	1	0,25	5
Condutividade elétrica mínima, Mcm, a 298 K (25°C)	18	1	4	0,2
pH a 298K (25°C)	-	-	-	5 a 8
Carbono orgânico total (TOC), max, µg/L	50	50	200	sem limite
Sódio, max, µg/L	1	5	10	50
Cloretos, max, µg/L	1	5	10	50
Sílica total, max, µg/L	3	3	500	sem limite

Fonte: Adaptado de ASTM D1193-99 (2017).

3.3 Fonte de água utilizada

Nesse trabalho, foram avaliadas duas fontes de água diferentes, para a produção de hidrogênio verde: superficial e salina.

Vários critérios foram considerados para avaliação qualitativa e quantitativa das fontes de água escolhidas para comparação. Os fatores escolhidos nesse trabalho foram:

- Disponibilidade da água (no curto e no longo prazo), que é impactado por fatores climáticos, como secas;
- Facilidade da coleta da água;
- Concorrência com outros usos de água (ao nível de captação da água);
- Complexidade do licenciamento e da autorização de captação da água, considerando custo de obtenção da água (caso haja);
- Custos com o tratamento da água (aquisição e custo O&M);
- Distância de transporte da fonte de água até a unidade de produção

Foram avaliados e comentados todos os pontos citados anteriormente para água superficial e água do mar.

3.3.1 Facilidade da coleta da água

Em se tratando da água salina, é necessário que a coleta da água seja feita a uma distância considerável da costa do mar – para não prejudicar banhistas, comunidades ribeirinhas - e em uma profundidade adequada (normalmente, mais de 10 metros) para capturar a água do mar com a qualidade adequada para o processo de tratamento, evitando problemas como óleos e gorduras, hidrocarbonetos.

A coleta ocorre por uma torre de captação, que, além de estar localizada adequadamente, nas condições citadas anteriormente, também deve receber a água com uma velocidade adequada para não produzir correntes que arrastem peixes e outros animais marinhos ou, para, caso eles adentrem a torre de captação, consigam sair por conta própria para fora dela.

A água do mar que é captada é bombeada por bombas centrífugas até uma câmara de aspiração localizada na planta de H₂V, conduzida por meio de tubulações de PEAD (polietileno de alta densidade). As bombas devem ser submersíveis e seu material deve ser resistente à água do mar, além de serem protegidas com proteção catódica, para evitar a corrosão.

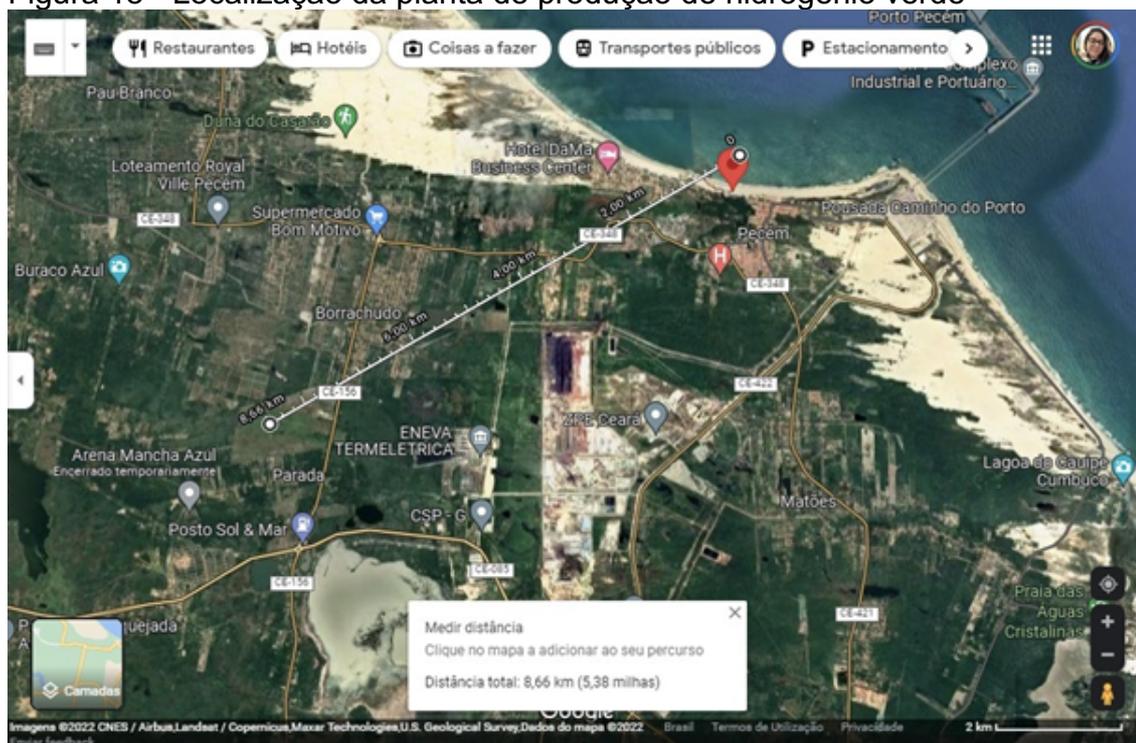
Na câmara de aspiração, um sistema de chicanas será instalado para aumentar o tempo de permanência e permitir que as possíveis areias sejam capturadas. Da câmara, a água é bombeada até o sistema de tratamento.

Em relação à água bruta, ela é coletada no chamado Canal do Pecém, que abastece as indústrias do Pecém que necessitam de água bruta, por bomba, e enviada até a indústria por meio de tubulações. Na planta, a água que chega fica localizada em uma bacia de transferência de água bruta e, posteriormente, é bombeada até a unidade de clarificação, onde inicia o processo de tratamento da água. Na bacia, é importante que haja um transmissor de nível, um alarme para alto nível e uma proteção para evitar o baixo nível. Além disso, na bacia, haverá presença de filtros de água bruta, para retirar as impurezas de maior tamanho da água.

3.3.2 Distância de transporte da fonte de água até a unidade de produção

Foi considerada, para a avaliação desse fator, uma possível localização para a instalação da planta de produção de hidrogênio verde, apresentada na Figura 18:

Figura 18 - Localização da planta de produção de hidrogênio verde



Fonte: Google Maps (2022).

Percebe-se que, com a proximidade da planta com a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) e do Complexo Termoelétrico do Pecém (EDP e ENEVA), que são plantas que são abastecidas por água bruta, a planta de produção de hidrogênio verde também estaria perto da rede de abastecimento de água bruta da COGERH, que advém do Canal do Pecém.

Em se tratando da água salina, a planta também está em uma ótima localização geográfica, como percebe-se avaliando a figura acima, pois estaria aproximadamente a 10 km de distância da Praia do Pecém, que seria a possível localização da torre de captação para captação da água salina.

3.3.3 Concorrência com outros usos de água

Em relação à água superficial no Ceará, esse recurso hídrico é elemento indispensável à vida e é utilizado como insumo nas atividades produtivas, como uso pela população para irrigação, indústrias, atividades de lazer, dentre outros empregos múltiplos dos recursos hídricos, em fontes de qualidade e quantidade saudáveis e seguras.

No Estado, os distritos industriais possuem sistema de oferta de água bruta separada da de água tratada. A existência dessas duas redes de distribuição permitiu o arranjo institucional em que a COGERH assumisse a operação da rede de água bruta e a CAGECE a rede de água tratada.

As demandas industriais nos distritos industriais e na região do complexo portuário do Pecém, assim como de indústrias com captação de água própria cresceram significativamente nas duas últimas décadas.

Uma demanda expressiva no baixo vale dos rios e em lagos dos reservatórios é a água para aquicultura, associada principalmente ao camarão e à tilápia.

De acordo com o Estudo Setorial Especial da Plataforma de Desenvolvimento Ceará 2050, um estudo recente realizado por uma consultoria para a Secretaria de recursos apresentou uma síntese da utilização de água bruta no Estado do Ceará, de acordo com as informações disponibilizadas pela COGERH:

Tabela 4 - Número de usuários pelos principais usos da água

Uso	Número de Usuários	%
Irrigação	8.981	57,66%
Empresa Concessionária de Água Bruta	6.357	40,81%
Indústria	190	1,22%
Aquicultura e Carnicultura	10	0,06%
Turismo e Lazer	39	0,25%
TOTAL	15.577	100%

Fonte: SISCAD – Sistema de Cadastro de Usuário de Água (2018).

Sendo as empresas concessionárias de água bruta as empresas de cidades, distritos, povoados, fazendas e sítios. Observa-se na tabela anterior que o setor de irrigação concentra 56,6% dos usuários de água bruta do Estado, sendo o maior consumidor desse recurso. A indústria, setor abordado nesse trabalho, ocupa cerca de 1,22% do total. Porém, pode-se perceber a grande utilização que a água bruta possui no Estado.

O Ceará ainda não destina a sua água do mar para utilização industrial, ou para outro meio. Em 2018, foi autorizada a construção da maior usina de dessalinização da água do mar do país, que será construída na Praia do Futuro, em Fortaleza, e será utilizada para consumo humano. O empreendimento vai incrementar a oferta de água na Capital e Região Metropolitana com a sua capacidade de produção de água de 1 m³/s. O projeto, no entanto, ainda não está em funcionamento.

3.3.4 Complexidade do licenciamento e da autorização de captação da água, considerando custo de obtenção da água

A Resolução COEMA nº 3 de 10/02/2022 estabeleceu critérios e parâmetros aplicados aos processos de licenciamento e autorização ambiental, nos empreendimentos de produção de hidrogênio verde no Estado do Ceará. Na Resolução, é explicitado que se entende por hidrogênio verde, no Estado, aquele produzido de fontes renováveis variáveis, particularmente energia eólica e solar, via eletrólise da água.

Foi definido que os procedimentos de licenciamento ambiental dos empreendimentos de produção de hidrogênio verde considerados ocorrerão em 3 etapas:

- I. Licença Prévia;
- II. Licença de Instalação;
- III. Licença de Operação.

Os prazos para análise e emissão das licenças são de no máximo 90 dias para cada uma (a partir da data da protocolização da licença anterior).

Também será exigido no processo de licenciamento o Estudo de Análise de Risco, devidamente aprovado pela autoridade competente.

Além disso, também é evidenciado que para empreendimentos classificados como de porte micro e pequeno será requerido o Relatório Ambiental Simplificado (RAS) e para empreendimentos classificados como porte médio, grande e excepcional será requerido o Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA).

Esses requisitos para o licenciamento ambiental são referentes para instalação de plantas de produção de hidrogênio verde no Estado do Ceará, independente da fonte de água.

Em se tratando de fonte, a COGERH solicita a emissão de uma outorga para autorização da utilização da água bruta. A outorga é um ato administrativo, que autoriza nos termos e condições expressas no ato de permitir o uso, obra ou serviço, sem prejuízo das demais formas de licenciamento ambiental a cargo de instituições competentes. São usos que dependem da outorga aqueles que alterem a qualidade (tal como o lançamento de efluentes) ou a quantidade (a exemplo da captação de água).

A outorga deve ser solicitada por usuários que utilizam água bruta de rios, lagoas, açudes, canais, adutoras, poços e nascentes, para qualquer processo produtivo.

O pedido de outorga é feito ao Secretário de Recursos Hídricos através de uma plataforma online, e alguns requerimentos devem ser apresentados e preenchidos, com algumas informações necessárias, como coordenadas de captação, tipo de uso.

Além da outorga, também é necessário pagar pela utilização da água bruta. Esse mecanismo instalado pela COGERH visa estimular o uso racional do recurso e assegurar a sustentabilidade de seu sistema de gerenciamento.

O valor da tarifa de cobrança de água bruta depende da categoria do uso e, para a indústria – para fornecimento de água com captação e adução completa

por parte da COGERH, atualmente está R\$ 3,27/m³. É realizado, anualmente, um reajuste nessa tarifa, baseado no IPCA acumulado do período.

A outorga mencionada anteriormente diz respeito à utilização de Bacias Hidrográficas, porém nenhuma Bacia brasileira abrange as águas marítimas. Com isso, ainda existe dúvida, porém, atualmente, inexistente o instrumento de outorga para fins de uso de água do mar.

Alguns argumentos corroboram com essa inexigibilidade, como a ausência de regulamentação das águas marítimas nas normas legais que tutelam os recursos hídricos.

A Instrução Normativa MMA 04/00 é uma das normas legais que tutelam os recursos hídricos, pois ela aprova os procedimentos administrativos para emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos em corpos d'água de domínio da União. Na Instrução, é detalhado os usos que estão sujeitos à outorga, porém, as águas marítimas não estão citadas. Com isso, não se pode olvidar que há instrumentos normativos que protegem esses recursos. A proteção de forma ampla e abrangente das águas marítimas, atualmente, compete a vários órgãos de fiscalização ambiental no âmbito de sua competência, protegendo as águas marítimas de degradação ambiental, fazendo a concessão de autorizações, licenças ambientais para uso desse recurso.

Também não existe legislação estadual que contemple a necessidade de obtenção de outorga para utilização da água marítima.

No projeto da usina de dessalinização de Fortaleza, é mencionado que não se faz necessário a apresentação de outorga do uso da água, pois a água do mar não está sujeita a outorga pelo Poder Público, não constando no Art.12 da Lei nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. No projeto, é mencionada a necessidade de alguns licenciamentos ambientais, pela localização em região litorânea, porém, não existe a necessidade de outorga para uso da água.

3.3.5 Custos com o tratamento da água (aquisição e custo O&M)

3.3.5.1 Especificação do eletrolisador

Para cálculo do volume de água necessário para o eletrolisador, foi considerado o modelo de eletrolisador alcalino da NEL Hydrogen, com as seguintes características:

Tabela 5 - Eletrolisador alcalino modelo A4000 – Nel Hydrogen

Especificações	Modelo - A4000
Intervalo de vazão de produção	2.400 a 3.880 Nm ³ /h
Alcance da capacidade de produção dinâmica	3,75 a 100% do intervalo de vazão
Consumo de energia	3,8 a 4,4 kWh/Nm ³
Pureza - com purificação opcional	99,99 a 99,998%
O ₂ - Contido no H ₂	< 2 ppm v
H ₂ O - Contido no H ₂	< 2 ppm v
Pressão de saída	1 a 200 barg
Dimensões	aproximadamente 770 m ²
Temperatura ambiente	
- Processo	2 a 40°C
- Retificador	2 a 35°C
Eletrolito	Solução de KOH 25%
Consumo de água de alimentação	aproximadamente 1 L/Nm ³

Fonte: Nel Hydrogen (2022).

Percebe-se que a vazão de produção de H₂ do eletrolisador está no intervalo de 2.400 a 3.880 Nm³/h. Logo, será considerada a vazão máxima de produção de 3.880 Nm³/h.

Como o consumo de água do eletrolisador é de 1 L/Nm³, pode-se considerar que, para a alimentação do eletrolisador, serão necessários 3880 L/h de água desmineralizada.

Além disso, é importante também considerar a vazão de resfriamento utilizada no eletrolisador, para que sua temperatura aumente, absorvendo energia, enquanto o equipamento diminui sua temperatura.

Segundo Simon, Daily e White (2010), a água utilizada para resfriamento dos equipamentos não necessita ter características ultrapuras como a água de alimentação do eletrolisador. A água de resfriamento deve possuir uma qualidade inferior, porém, é utilizada em maior quantidade. Existem dois tipos de resfriamento que são mais utilizados na produção de hidrogênio: torres de resfriamento e resfriamento a seco.

Nas torres de resfriamento, a água quente entra em contato diretamente com o ar. Uma fração da água evapora, ocasionando o resfriamento da água restante. No entanto, a água evaporada deve ser restituída à fonte de água da torre,

e os sólidos dissolvidos que estavam na água antes da evaporação permanecem na torre, ocasionando incrustações e corrosões, resultando na perda de eficiência do equipamento. Com isso, é necessário a presença de um sistema de purga, com o objetivo de desconcentrar a água da torre e evitar a presença de uma grande quantidade de sólidos dissolvidos. A purga resulta em uma maior quantidade necessária de água bruta (SIMON; DAILY; WHITE, 2010).

Normalmente, o consumo de energia nas torres de resfriamento é maior do que em sistemas de resfriamento a seco.

Os sistemas de resfriamento a seco, por outro lado, possuem um circuito fechado. Uma vez alimentado o sistema com água, não é necessário água de reposição e não há geração de águas residuais. É utilizado um trocador de calor para rejeitar calor da água para o ar ambiente. Porém, o custo de obtenção desse sistema é muito maior do que as torres de resfriamento (SIMON; DAILY; WHITE, 2010).

De acordo com Simon, Daily e White (2010), para uma planta de produção de 1500 kg-H₂/dia é necessária uma vazão de água de resfriamento de 180 galões por minuto, independente do sistema de resfriamento utilizado.

Convertendo a quantidade para litros, esse valor seria aproximadamente 680 litros de água de resfriamento por minuto para a capacidade de produção da planta citado anteriormente.

Ao transformar a vazão do eletrolisador para kgH₂/dia, foi obtido um valor de 348,76 kgH₂/dia.

3.3.5.2 Especificação das plantas de tratamento de água

Para simular as plantas de tratamento para as duas fontes de água estudadas nesse trabalho, foram realizadas simulações no software Wave.

Wave é um software oferecido pela Dupont, utilizado para modelar plantas de tratamento de água, incluindo tratamento de efluentes, com tecnologias oferecidas pela empresa, como ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica.

No software, é possível definir a fonte de água utilizada e simular diferentes configurações de tratamento para o insumo. Os parâmetros inseridos no software são a vazão necessária (de entrada ou de saída do tratamento); a

caracterização da água que está sendo tratada e a definição do layout de tratamento.

A partir da definição de alguns parâmetros, o software realiza a simulação e emite relatórios – por etapa ou geral - com várias informações importantes, como qualidade de saída da água, custo com químicos, custo com eletricidade.

3.3.5.3 Avaliação dos custos

Para avaliar os custos de tratamento e de operação de cada fonte de água, foram listados alguns fatores de avaliação.

3.3.5.4 Custos de Aquisição (CAPEX)

Aquisição da planta de tratamento e desmineralização da água, dependendo da fonte.

3.3.5.5 Custos de Operação e Manutenção (O&M)

- Custo com a energia elétrica que a planta requer;
- Custo com produtos químicos utilizados no processo;
- Custo com tratamento do concentrado da osmose;
- Custo com transporte e disposição final de resíduos sólidos (lodo, caso haja).
- Custo com manutenção da planta;
- Custo com abastecimento de água;
- Custo com reagentes químicos para análises laboratoriais.

Para efeito de comparação das fontes de água, algumas considerações foram feitas:

- As plantas funcionarão durante 12 horas por dia;
- Custos com recursos humanos não serão considerados para efeito de comparação – será considerado o mesmo grupo de colaboradores para as duas fontes de água;
- Não será considerado custos com compra do sistema de resfriamento da água dos equipamentos. Será considerado o mesmo sistema para

as duas fontes de água. A água utilizada será a água clarificada (para águas superficiais) e água após a passagem dos filtros (para a água salina) – considerada, nesse trabalho, como água filtrada.

4 RESULTADOS

4.1 Descrição das plantas

Nesse trabalho, o tratamento da água superficial e da água do mar será diferente entre si. Isso porque as composições das fontes de água são diferentes, logo, cada uma possui o tratamento adequado para torná-la ultrapura e possibilitar a sua entrada no eletrolisador.

4.1.1 Água superficial

A água superficial considerada nesse trabalho é a água bruta fornecida pela COGERH e bombeada do Canal do Pecém até a planta de produção de hidrogênio verde. O Canal do Pecém fornece água bruta para várias indústrias da região. A tabela abaixo descreve os parâmetros da água bruta no tratamento primário. Os dados são referentes a uma análise físico-química realizada em uma indústria no Pecém que utiliza a mesma fonte da água bruta.

Tabela 6 - Parâmetros de entrada – Água bruta

Análise da água bruta do Canal do Pecém		
Parâmetro	Unidade	Valores médios
Cálcio	ppm Ca ²⁺	18
Magnésio	ppm Mg ²⁺	20
Sódio	ppm Na ⁺	70
Potássio	ppm K ⁺	9
Ferro	ppm Fe	0,18
Cloretos	ppm Cr ⁻	125
Sulfatos	ppm SO ₄ ²⁻	10
Nitrato	ppm NO ₃ ⁻	0,16
Nitrito	ppm NO ₂ ⁻	0,22
Nitrogênio Total	ppm	0,7
Nitrogênio Amoniacal	ppm NH ₃ , NH ₄	0,2
Fósforo Total	ppm	0,15
Dureza Total	ppm CaCO ₃	127
Alcalinidade Total	ppm CaCO ₃	83,3
Alcalinidade Carbonato	ppm CaCO ₃	10,2
Alcalinidade Bicarbonato	ppm CaCO ₃	94,4
Alcalinidade Parcial	ppm CaCO ₃	13,2
BOD	ppm O ₂	76,8
Oxigênio Dissolvido Laboratório	ppm O ₂	2,2
Ortofosfatos solúveis	ppm	0,06
Coliformes Totais	NMP/100 mL	63,3
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	16
Sólidos Dissolvidos Totais	ppm	370
Sólidos Totais	ppm	340
Condutividade	µs/cm	<800
Turbidez	NTU	25
Cor	Unidades Hazen	14,8
pH	-	8,2
Temperatura	°C	27
Sílica	ppm	20
Sólidos Suspensos Totais	ppm	60

Fonte: Indústria localizada no Pecém (2022).

A água bruta, inicialmente, passa por um processo de tratamento primário. A água bruta é transferida do Canal do Pecém até a bacia de água bruta localizada na planta de produção de hidrogênio verde, por meio de uma tubulação com bombas de transferência. A linha de transferência deve possuir um transmissor de pressão, um indicador de pressão, uma válvula manual do tipo borboleta e uma válvula de controle.

Na bacia de água bruta também estão localizadas bombas de transferência que transportam a água até a unidade primária de tratamento. Na bacia, é dosado hipoclorito de sódio com 10% a 12% de cloro ativo, para oxidação da matéria orgânica e desinfecção.

4.1.1.1 Unidade de coagulação/floculação

A água bruta é deslocada até a unidade de coagulação com agitação estática, onde é dosado um coagulante, para possibilitar que as partículas do fluido formem flocos estáveis e bem suspensos. É necessário que a mistura seja rápida e efetiva, para que os coagulantes promovam colisões de partículas e formação de flocos. O coagulante dosado é o Policloreto de Alumínio (PAC), que é um coagulante inorgânico polimerizado catiônico de baixo peso molecular e pré-polimerizado já bastante utilizado nas estações primárias de tratamento de água. Ainda na unidade, a água também é submetida ao processo de floculação, onde é dosado um floculante polimérico de alto peso molecular. O produto se une aos flocos, facilitando a ligação entre eles. A agregação, ligação e fortalecimento dos flocos acontece até atingir a forma de flocos grandes e visivelmente suspensos.

O processo de coagulação/floculação é importante para diminuir os parâmetros de cor e turbidez.

Foi definida que a eficiência da etapa é de 90%.

4.1.1.2 Sedimentação

Os flocos, agora grandes e suspensos, passam por uma bacia de sedimentação, um processo físico da estação de tratamento de água, onde as partículas sólidas em suspensão são separadas da água, através da ação da gravidade e da diferença de densidade entre a água e a partícula sólida. O objetivo dessa etapa é clarificar e melhorar os parâmetros de cor e turbidez da água

O lodo é retirado de forma periódica, por uma empresa terceirizada, quando seu nível estiver atrapalhando o tratamento da água, e destinado para tratamento correto.

Baseado em estações já construídas, foi definido que a eficiência da etapa é de 90%.

4.1.1.3 Filtros Multimídia

Depois da bacia de sedimentação, a água clarificada é direcionada para um sistema de filtros multimídia, que está relacionado à remoção de sólidos suspensos e redução de turbidez. Os filtros multimídia são formados por várias camadas de meios filtrantes, como antracito, quartzo, brita, e são responsáveis pela remoção mecânica das partículas em suspensão, além de alguns contaminantes, que causam odor, turbidez.

Transmissores de pressão instalados nos filtros monitoram as pressões de entrada e saída dos filtros e, quando atingido um diferencial de pressão de 1,0 kgf/cm², um sinal é enviado para iniciar a sequência de retrolavagem dos filtros. Além da perda de carga, a retrolavagem também pode ser iniciada de forma automática por tempo – 24 horas. É efetuada com água clarificada, com uma vazão de 130% da vazão de entrada do filtro.

Depois da passagem pelos filtros multimídia, a água é direcionada até um tanque de água clarificada.

Após o tanque de água clarificada, é essencial que a água passe por um processo de retirada de íons, para que esteja nas condições adequadas para entrada no eletrolisador. Com isso, a água passa por um processo de desmineralização, que compreende as etapas de ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica.

4.1.1.4 Ultrafiltração

A água é bombeada do tanque de água clarificada até um skid de ultrafiltração, etapa que tem como objetivo reter partículas muito pequenas, reduzindo a turbidez. É muito importante como um pré-tratamento para osmose reversa, pois ajuda a reduzir o entupimento de suas membranas.

Durante essa etapa, a água é bombeada através da membrana – do sentido de fora para dentro das fibras ocas. Logo, a água ultrafiltrada é recolhida no interior das fibras e sai do skid através do coletor de permeado, na parte superior do módulo.

A duração do ciclo é de aproximadamente 60 minutos.

Com a utilização do sistema de ultrafiltração, alguns contaminantes presentes na água de alimentação acumulam nas membranas e é necessário realizar uma contralavagem automática para manter o bom funcionamento do sistema.

A contralavagem inclui uma etapa de limpeza inicial com ar, onde é introduzido à baixa pressão na parte inferior do módulo – por cerca de 30 segundos, de forma que as bolhas de ar sobem e agitam ligeiramente as fibras, contribuindo para a eliminação da sujeira depositada sobre a membrana.

Posteriormente, uma vazão de água ultrafiltrada é bombeada no sentido contrário – introduzida pela parte do filtrado e atravessa a fibra de dentro para fora, para expulsar os contaminantes da membrana depositados interiormente ou em sua superfície.

A contralavagem é necessária dependendo da perda de carga dos filtros, ou por tempo – 60 minutos. Também é dosada uma dosagem de solução de hipoclorito de sódio para desinfecção.

Dependendo da quantidade de contaminantes, limpezas químicas periódicas são necessárias, onde são utilizados produtos como o hidróxido de sódio (NaOH), para limpeza e controle da sujeira orgânica, hipoclorito de sódio (NaOCl), para desinfecção e ácido clorídrico (HCl), para limpeza de resíduos inorgânicos.

Após o sistema de ultrafiltração, a água é direcionada para as bombas de pressurização da unidade de osmose reversa.

4.1.1.5 Osmose Reversa

O processo de osmose reversa é iniciado na sucção das bombas de pressurização, bombas centrífugas verticais.

Antes dessa etapa, ocorre a dosagem de metabissulfito de sódio, produto químico responsável por eliminar o cloro das membranas, que possuem baixa tolerância com o cloro, assim como anti-incrustante.

Após a osmose reversa, a água é direcionada para o polimento, na etapa de troca iônica.

4.1.1.6 Troca iônica

O sistema é composto por resinas catiônicas e aniônicas de diferentes volumes, que adsorvem os contaminantes na passagem da água. Essa etapa é importante para remoção eficiente de íons dissolvidos na água e garantir que a água esteja na qualidade adequada para entrada no eletrolisador.

As resinas devem ser regeneradas com produtos químicos (NaOH ou HCl) quando saturadas.

4.1.1.7 Destinação de lodo e de efluentes

Um tipo de efluente gerado no tratamento primário da água superficial é o lodo, proveniente da unidade de sedimentação. É necessário que seja dado uma destinação adequada para esse resíduo sólido.

Diversas soluções mais econômicas e inteligentes para uso e disposição final do lodo são: uso em solos (agricultura, reflorestamento, recuperação de áreas degradadas), fabricação de cimento, fabricação de materiais cerâmicos, lançamento em sistemas de coleta e tratamento de esgoto e recuperação de coagulantes (CORNWELL et al., 1999).

Nessa planta, a destinação do lodo é de responsabilidade de empresa contratada, que irá coletar e dispor em local adequado o resíduo, de forma que sua utilização não prejudique o meio ambiente.

4.1.2 Água Salina

Os parâmetros da água salinos considerados são provenientes de uma análise realizada para implementação da Usina de dessalinização de Fortaleza, sendo, portanto, uma representação da composição da água do mar do Ceará.

Tabela 7 - Parâmetros de entrada – Água salina

Análise da água do mar do Ceará		
Parâmetro	Unidade	Valores médios
Cálcio	ppm Ca ²⁺	4,55
Magnésio	ppm Mg ²⁺	1249,42
Sódio	ppm Na ⁺	12.110,61
Potássio	ppm K ⁺	420
Estrôncio	ppm Sr ²⁺	0,3
NH ₄ ⁺	ppm	125
Sulfatos	ppm SO ₄ ²⁻	4.159,73
Nitrato	ppm NO ₃ ⁻	10,7
Cloretos	ppm Cl ⁻	20.425,10
CO ₃ H-	ppm	0,7
Flúor	ppm	0,3
NO ₃ -	ppm	10,7
CO ₃ 2-	ppm	10,04
Sílica	ppm	8,2
CO ₂	ppm	1,23
Bário	ppm	5
Sólidos em Suspensão	ppm	10
Turbidez	NTU	1,00
pH	-	7,9
Cor	Pt-Co	1

Fonte: CAGECE (2018).

4.1.2.1 Captação

A coleta da água é feita por uma torre de captação localizada a uma distância adequada da costa e em profundidade também, para capturar a água do mar com uma qualidade apropriada para o tratamento.

Na torre de captação, é realizada uma dosagem de ácido sulfúrico, para controle do pH e de hipoclorito de sódio, para limpeza da torre e da tubulação de conexão entre a torre e a câmara, localizada na planta de produção do gás.

Após a captação, a água salina é encaminhada para uma bacia de água de alimentação na planta de produção de hidrogênio verde, para posterior início do tratamento.

4.1.2.2 Pré tratamento

A primeira fase do tratamento da água salina é o pré-tratamento, etapa necessária para eliminar os constituintes indesejáveis na água de alimentação, e fornecer uma boa proteção para as membranas.

Na planta, após a chegada da água do mar até a planta de produção de hidrogênio verde, ela é direcionada para um processo de filtragem com filtros cartucho. Serão utilizados filtros equipados com cartuchos de polipropileno, que serão responsáveis por diminuir o índice SDI – parâmetro que mede a quantidade total de sólidos em suspensão na água a água do mar. Após essa passagem pelos filtros iniciais, a água obtida será denominada como água filtrada. Essa água será direcionada para uma unidade de ultrafiltração, que será composta por camadas de meios filtrantes distintos, para melhor retirada dos sólidos em suspensão e melhora da turbidez da água.

4.1.2.3 Osmose Reversa

Após a passagem por filtros cartucho e unidade de ultrafiltração, a água salina é encaminhada para o sistema de osmose reversa, etapa responsável pela diminuição da condutividade da água.

4.1.2.4 Pós-tratamento

Após a passagem pela osmose reversa, o permeado é encaminhado até a etapa de troca iônica, denominada como pós-tratamento. Essa etapa é importante para retirada de íons dissolvidos na água, preparando o insumo para seu destino final, o eletrolisador.

Na planta de tratamento da água salina a troca iônica também é realizada em um tanque com resinas catiônicas e aniônicas com volumes diferentes, responsáveis pelo polimento da água.

4.1.2.5 Destinação do rejeito do processo de dessalinização

No processo de dessalinização da água do mar, uma corrente de água bastante concentrada em sais também é gerada (o rejeito) e deve ser disposta em local apropriado (KIM, 2009). Normalmente, a principal destinação do rejeito é seu retorno ao mar, porém, é necessário verificar a fragilidade de cada ecossistema e os riscos dessa prática. Segundo Einav e Lokiec (2002), os prejuízos aos ecossistemas se devem à alta concentração do rejeito e à presença de compostos químicos utilizados no pré-tratamento da água.

Com o objetivo de diminuir os impactos do sistema de dessalinização nos ecossistemas marinhos, a indústria tem se preocupado em desenvolver métodos de descarga da salmoura no mar, que descarreguem e difundam a salmoura, de modo que minimize o impacto ambiental gerado (HENTHORNE, 2009).

Algumas alternativas para disposição desse rejeito estão sendo estudadas, como bacias de evaporação, redução do volume do rejeito por plantas aquáticas, bacias de percolação, irrigação de planta halófitas (PORTO et al., 2001). Outra alternativa, segundo Ahmed et al. (2003) seria o tratamento de rejeitos de dessalinização com a tecnologia de cristalização de sais. A alternativa encontrada seria a produção de vários sais, como cloreto de sódio, cloreto de cálcio, carbonato de sódio, que são produtos muito demandados por indústrias, a partir do rejeito desse processo de dessalinização.

Em algumas comunidades do sertão do Brasil, são cultivados peixes, como a tilápia, assim como camarões, com a água salobra da dessalinização. Também são utilizadas plantas halófitas, que tem alta tolerância aos sais e conseguem absorver grande quantidade de água salgada na irrigação, além de servirem como alimentação para o gado cultivado no local (SOARES, 2006).

É necessário, então, estudos mais aprofundados para definição do tratamento que deve sofrer a salmoura do processo de dessalinização, porém, é possível a utilização das alternativas já utilizadas no Nordeste brasileiro, como cultivo de peixes e camarões com a água, ou utilização de plantas halófitas.

4.2 Cálculo da vazão de entrada de água bruta nas plantas de tratamento de água

Para simulação do tratamento de água no software Wave, é necessário introduzir a vazão de entrada ou de saída da planta.

Para cálculo dessa vazão, foram considerados valores, de acordo com a bibliografia, para recuperação de cada etapa do tratamento e, posteriormente, a eficiência foi ajustada de acordo com os valores obtidos na simulação.

4.2.1 Cálculo para vazão inicial de água superficial

A água, nessa planta, será utilizada para três processos: alimentação no eletrolisador (água ultrapura), resfriamento do eletrolisador (água clarificada, após a ETA) e para retrolavagem dos filtros multimídia da ETA (água ultrapura).

O eletrolisador, como calculado anteriormente, necessita de uma vazão de alimentação de água ultrapura de 3,88 m³/h.

Para a vazão de retrolavagem dos filtros multimídia, normalmente é feita com um valor de 130% da vazão de entrada de água bruta no sistema do tratamento primário – uma vez ao dia ou quando o sistema atinge determinada pressão. Mesmo a retrolavagem sendo realizada apenas por 12 minutos, será dimensionada uma vazão suficiente para realização de 1 hora de retrolavagem durante o dia. Logo:

$$Q_{retrolav.filtros\ MM} = 130 * z/dia \quad (10)$$

Considerando que a planta irá operar por 12 horas:

$$Q_{retrolav.filtros\ MM} = 0,025 * z/hora \quad (11)$$

Sendo z a vazão de entrada de água bruta na estação primária de tratamento de água.

A equação para vazão de água clarificada produzida pode ser representada pela soma das três vazões de água necessárias, seja clarificada ou desmineralizada, já que a água clarificada é o primeiro passo para produção da água desmineralizada.

$$Q_{clarificada} = y + Q_{resf.eletrol.} + Q_{retrolav.filtros\ MM} \quad (12)$$

$$Q_{desmi} = Q_{eletrolisador} + Q_{retrolav.filtros\ MM} \quad (13)$$

Sendo y a vazão de entrada no sistema de desmineralização da água para posterior alimentação no eletrolisador. Assim, com esse cálculo, as perdas com os sistemas de ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica são consideradas para entrada de $3,88 \text{ m}^3/\text{h}$ no eletrolisador.

$$Q_{\text{eletrolisador}} = \% \text{efic.}_{\text{GRAD}} * \% \text{efic.}_{\text{ULTRAFILT.}} * \% \text{efic.}_{\text{OSMOSE}} * \% \text{efic.}_{\text{TROCA IÔNICA}} * y = 3,88 \quad (14)$$

Substituindo de acordo com as recuperações encontradas na simulação e calculando o valor de y , pode-se obter:

$$99,50\% * 97,34\% * 75\% * 99,5\% * y = 3,88 \quad (15)$$

$$y = 5,42 \text{ m}^3/\text{h}$$

A única recuperação definida, de acordo com bibliografia, foi a recuperação de 75% da osmose reversa. As outras eficiências foram inicialmente simuladas com recuperações obtidas em bibliografias, porém, depois foram substituídas pelos valores resultantes da simulação.

Para cálculo da vazão de resfriamento da água, foi utilizado o dado mencionado em bibliografia, que afirma que, para uma planta de $1500 \text{ kgH}_2/\text{dia}$ é necessária uma vazão de resfriamento de cerca de 680 litros de água por minuto. Para o eletrolisador definido no projeto, a produção é cerca de $348,76 \text{ kgH}_2/\text{dia}$, portanto, o cálculo da vazão de resfriamento necessária foi realizado com a seguinte equação:

$$Q_{\text{resf.eletrol.}} = \frac{680 \text{ litros}/\text{min}}{1500 \text{ kgH}_2/\text{dia}} * 348,76 \text{ kgH}_2/\text{dia} \quad (16)$$

$$Q_{\text{resf.eletrol.}} = 158,1 \text{ L}/\text{min} \quad (17)$$

$$Q_{\text{resf.eletrol.}} = \frac{158,1 \text{ L}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \quad (18)$$

$$Q_{\text{resf.eletrol.}} = 9,486 \text{ m}^3/\text{h}$$

O resfriamento será realizado pela água clarificada, ou seja, a água obtida após o tratamento primário.

A vazão de água clarificada também pode ser definida da seguinte forma, considerando as perdas do sistema:

$$Q_{clarificada} = z * \% \text{efic.}_{COAG} * \% \text{efic.}_{SED} * \% \text{efic.}_{filtros} \quad (19)$$

Considerando as eficiências das etapas de coagulação e sedimentação como 90% e da etapa de filtros multimídia como 100%

$$Q_{clarificada} = 90\% * 90\% * 100\% * z \quad (20)$$

Igualando as equações para $Q_{clarificada}$

$$90\% * 90\% * 100\% * z = y + Q_{resf.eletrol.} + Q_{retrolav.filtros MM} \quad (21)$$

$$90\% * 90\% * 100\% * z = 5,42 + 9,486 + 0,025 * z \quad (22)$$

$$z = 23 \text{ m}^3/\text{h}$$

Logo, a vazão de abastecimento de água bruta é de 23 m³/h. Calculando o restante das vazões, pode-se obter:

$$Q_{retrolav.filtros MM} = 130\% * 23 = 28,29 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$Q_{retrolav.filtros MM} = 2,36 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{desmi} = Q_{eletrolisador} + Q_{retrolav.filtros MM} = 3,88 + 2,36 = 6,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

No software, no entanto, foi considerado um fator de segurança de cerca de 2,75%, logo, a vazão de água desmineralizada inserida para simulação foi de 6,5 m³/h.

4.2.2 Cálculo para vazão inicial de água salina

A água, nessa planta, também será utilizada para três processos: alimentação no eletrolisador (água ultrapura), resfriamento do eletrolisador (água obtida após passagem de filtros iniciais) e para retrolavagem dos filtros iniciais (água ultrapura).

As vazões para o eletrolisador e para retrolavagem dos filtros permanecem iguais, 3,88 m³/h e 130% da vazão inicial/dia, respectivamente.

$$Q_{retrolav.filtros\ iniciais} = 130 * x/dia$$

Considerando a operação da planta de 12 horas:

$$Q_{retrolav.filtros\ iniciais} = 0,025 * x/hora$$

Sendo x a vazão inicial de fornecimento de água antes de qualquer tratamento.

A equação para vazão de água filtrada (após a passagem pelos filtros iniciais) produzida pode ser representada pela soma das três vazões de água necessárias, seja filtrada ou desmineralizada, já que a água filtrada é o primeiro passo para produção da água desmineralizada.

$$Q_{filtrada} = w + Q_{resf.eletrol.} + Q_{retrolav.filtros\ iniciais} \quad (23)$$

$$Q_{desmi\ II} = Q_{eletrolisador} + Q_{retrolav.filtros\ iniciais} \quad (24)$$

Sendo w a vazão de entrada no sistema de desmineralização da água para posterior alimentação no eletrolisador. Assim, com esse cálculo, as perdas com os sistemas de ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica são consideradas para entrada de 3,88 m³/h no eletrolisador.

$$\begin{aligned} Q_{eletrolisador} &= \% \text{efic.}GRAD * \% \text{efic.}ULTRAFILT. * \% \text{efic.}OSMOSE * \% \text{efic.}TROCA\ IÔNICA * w \\ &= 3,88 \end{aligned}$$

Substituindo de acordo com as recuperações encontradas na simulação e calculando o valor de w , pode-se obter:

$$99,50\% * 97,89\% * 45\% * 84,1\% * w = 3,88$$

$$w = 10,52 \text{ m}^3/\text{h}$$

A única recuperação definida, de acordo com bibliografia, foi a recuperação de 45% da osmose reversa, que é uma % comum nos processos de dessalinização realizados com osmose reversa. As outras eficiências foram inicialmente simuladas com recuperações obtidas em bibliografias, porém, depois foram substituídas pelos valores resultantes da simulação.

A vazão de resfriamento do eletrolisador, feita por água filtrada, é a mesma do valor calculado anteriormente, para água superficial. Isso ocorre porque o modelo do eletrolisador é o mesmo nos dois casos.

$$Q_{resf.eletrol.} = 9,486 \text{ m}^3/\text{h}$$

A vazão de água filtrada também pode ser definida da seguinte forma, considerando as perdas do sistema:

$$Q_{filtrada} = x * \% \text{efic. filtros iniciais} \quad (25)$$

Será considerado, para efeito de cálculo, uma eficiência de cerca de 81% para os filtros iniciais:

$$Q_{filtrada} = x * 81\%$$

Igualando as equações para $Q_{filtrada}$

$$81\% * x = w + Q_{resf.eletrol.} + Q_{retrolav.filtros iniciais} \quad (26)$$

$$81\% * x = 10,52 + 9,486 + 0,025 * x \quad (27)$$

$$x = 39,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Logo, a vazão de abastecimento de água inicial é de 39,2 m³/h. Calculando o restante das vazões, pode-se obter:

$$Q_{\text{retrolav.filtros iniciais}} = 130\% * 39,2 = 50,96 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$Q_{\text{retrolav.filtros iniciais}} = 4,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{\text{desmi II}} = Q_{\text{eletrolisador}} + Q_{\text{retrolav.filtros iniciais}} = 3,88 + 4,25 = 8,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Logo, a vazão de água desmineralizada produzida deve ser de 8,1 m³/h. No entanto, foi utilizado um fator de segurança de cerca de 5% na simulação, logo, a vazão de produção inserida no software Wave foi de 8,5 m³/h

4.3 Simulação realizada no software Wave para água superficial, proveniente do Canal do Pecém.

Neste trabalho, foram realizadas simulações no software Wave para desmineralização da água superficial, proveniente de bacias hidrográficas e da água salina, proveniente do mar.

Primeiramente, foi realizada uma simulação para o processo de desmineralização da água superficial. Esse processo ocorre após o tratamento primário, que constitui as etapas de coagulação, floculação e sedimentação, como descritas anteriormente. Com isso, os valores inseridos no software da água de alimentação correspondem aos parâmetros da água mencionados anteriormente neste trabalho, porém, com valores mais baixos de turbidez e sólidos suspensos totais, considerando a efetividade do tratamento primário realizado pela ETA.

Foram consideradas as etapas de ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica.

Após inseridos os cátions e ânions, é necessário realizar um balanço dos íons, disponível na opção “ajustar todos os íons” no software.

Figura 19 - Parâmetros da água de alimentação – Água superficial

Cátions				Ânions				Neutros	
Sigla	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Sigla	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Sigla	mg/L
NH ₄	0,000	0,000	0,000	CO ₃	0,000	0,000	0,000	SiO ₂	6,687
K	0,000	0,000	0,000	HCO ₃	0,000	0,000	0,000	B	0,000
Na	78,514	170,908	3,415	NO ₃	0,000	0,000	0,000	CO ₂	0,000
Mg	22,433	92,377	1,846	Cl	207,287	292,598	5,847		
Ca	14,955	37,348	0,746	F	0,000	0,000	0,000		
Sr	0,000	0,000	0,000	SO ₄	6,687	6,967	0,139		
Ba	0,000	0,000	0,000	PO ₄	1,000	1,581	0,032		
				Br	0,000	0,000	0,000		
Cátions totais:			6,007	Ânions totais:			6,018	Neutros totais:	
								6,687	
Sólidos Dissolvidos Totais: 337,626 mg/L				Balanço de cargas 0,000003 meq/L			Condutividade estimada 720,67 µS/cm		
Sólidos Dissolvidos: 337,626 mg/L									
Total ppm CaCO ₃ : 301,146									

Fonte: Autor (Software Wave).

A partir disso, o software calcula as etapas que foram definidas inicialmente, gerando relatórios com características da água de saída e outras informações, como consumo de energia elétrica e de produtos químicos.

Para a ultrafiltração, o esquema gerado está demonstrado abaixo:

Figura 20 - Esquema da etapa de ultrafiltração – Água superficial



Fonte: Autor (Software Wave).

O sistema é composto por 1 módulo de ultrafiltração de operação e 1 de espera. A recuperação é de 97,3%, logo, a vazão de entrada é de cerca de 9,05 m³/h e a saída de 8,8 m³/h, sendo gerado um fluxo de 0,24 m³/h de efluentes. Pode-se perceber que o sistema foi calculado também com as lavagens e regenerações necessárias, como backwash (retrolavagem) – uma parte da água produzida é utilizada para limpar a superfície da membrana, em uma direção oposta ao fluxo da filtração, removendo partículas com uma contrapressão fornecida pela bomba, CEB

(Chemical Enhanced Backwash) – processo de retrolavagem com adição de químicos e com maior intervalo de tempo e CIP (clean in place) – limpeza para recuperar a permeabilidade da membrana, removendo toda a incrustação reversível, utilizando produtos químicos mais concentrados e com tempos de imersão maiores. Menos frequente que limpezas de manutenção. Nessa manutenção também é utilizada a aeração para limpeza. As condições de operação e intervalos de realização dessas manutenções estão descritas abaixo:

Figura 21 - Condições de operação da unidade de ultrafiltração – Água superficial

Condições de operação da UF

	Duração	Intervalo
Filtração:	60,0 min	63,1 min
Instantâneo		
1 Trens em operação		
2 Total de trens		
Média		
Líquida		
Backwash	3,1 min	63,1 min
CEB Ácido	15,8 min	336 h
CEB Alcalino	15,8 min	168 h
CIP	311,3 min	90 d
Teste de integridade das membranas:	30,0 min	24 h

Fonte: Autor (Software Wave).

As dosagens dos produtos químicos também estão especificadas no software:

Figura 22 - Dosagem de químicos da etapa de ultrafiltração – Água superficial

Químicos

Químicos	Custo unitário (R\$/kg)	Dose (mg/L)	Volume (L/d)	Custo (R\$/d)
Ácido Cítrico (100%)	10,000		0,0	0,16
CIP		20000		
HCl (32%)	3,990		0,0	0,04
CEB1		366		
CIP		366		
NaOCl (12%)	2,460		0,04	0,12
CEB2		250		
CIP		2000		

Fonte: Autor (Software Wave).

A qualidade da água de saída da ultrafiltração está especificada abaixo:

Figura 23 - Qualidade da água de saída da ultrafiltração – Água superficial

Qualidade de água da UF		Corrente 1	
Nome da corrente		Água de Superfície (10,0 - 40,0 °C)	
Tipo água		Alimentação	
		Qualidade esperada para o produto da UF	
Temperatura	(°C)	25,0	25,0
Turbidez	(NTU)	10,0	≤ 0.1
SST	(mg/L)	10,0	-
Orgânicos (TOC)	(mg/L TOC)	3,0	2,7
SDT	(mg/L)	338	338
pH		7,8	7,8

Fonte: Autor (Software Wave).

Na simulação, também é especificada a potência elétrica da etapa do tratamento. Foi definido o custo unitário de eletricidade como R\$ 0,8043/kWh, valor encontrado no site da Enel (distribuidora de energia do Ceará), referente à tarifa para “demais classes – comércio, indústria e poder público” na tarifa vermelha – pior caso

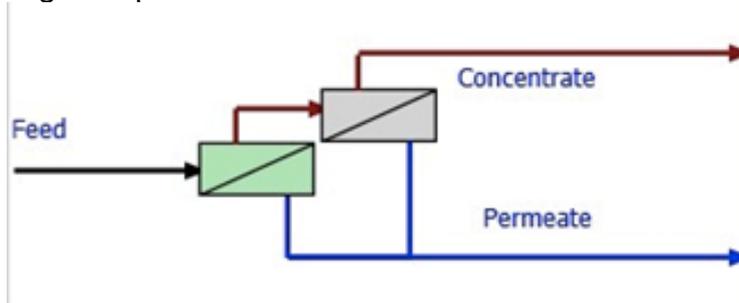
Figura 24 - Custos com eletricidade da etapa da ultrafiltração – Água superficial

Eletrecidade		
Pico de potência	(kW)	2,22
Energia	(kWh/d)	10,64
Custo unitário de eletricidade	(R\$/kWh)	0,8043
Custo da eletricidade	(R\$/d)	8,56
Energia específica	(kWh/m ³)	0,10

Fonte: Autor (Software Wave).

A água, após a ultrafiltração, passa pela etapa de osmose reversa. Foi definida uma recuperação de 75%, que é a média das plantas encontradas na bibliografia, assim como foram definidos 2 estágios para simulação, isto é, a água passa pelas membranas, onde é recuperado 75%, chamado de permeado. Os 25%, que é o concentrado, passa por outra etapa de osmose reversa, onde parte da água é implementada ao permeado inicial, enquanto a outra parte vira o concentrado final. Cada estágio possui 6 membranas. O desenho abaixo ilustra o esquema dessa etapa:

Figura 25 - Esquema da etapa de osmose reversa – Água superficial



Fonte: Autor (Software Wave).

A vazão de entrada é de 8,8 m³/h e a de saída é de 6,6 m³/h. A membrana escolhida foi a BW30-4040 (Datasheet detalhado na figura 27). A figura 26 apresenta as vazões do concentrado e do permeado em cada estágio:

Figura 26 - Vazões e pressões da etapa de osmose reversa – Água superficial

#	Descrição	Vazão (m ³ /d)	SDT (mg/L)	Pressão (bar)
1	Alimentação Raw para o Sistema RO	105,6	337,6	0,0
2	Vazão líquida para o Passo 1	105,5	337,8	14,6
4	Concentrado total do Passo 1	26,4	1 341	10,5
6	Produto Líquido do Sistema RO	79,2	3,51	0,0

Fonte: Autor (Software Wave).

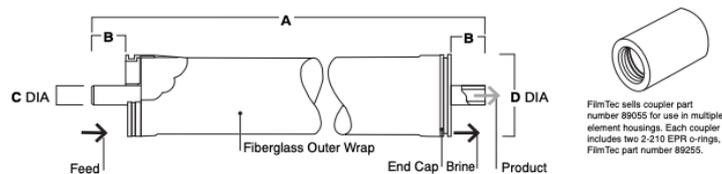
Figura 27 - Datasheet da membrana modelo BW30-4040

Product Specifications

Product	Part Number	Active Area ft ² (m ²)	Applied Pressure psig (bar)	Permeate Flow Rate gpd (m ³ /d)	Stabilized Salt Rejection (%)
BW30LE-4040	80604	82 (7.6)	150 (10.3)	2,300 (8.7)	99.0
BW30-4040	80783	82 (7.6)	225 (15.5)	2,400 (9.1)	99.5
BW30-2540	80766	28 (2.6)	225 (15.5)	850 (3.2)	99.5

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 2,000 ppm NaCl, pressure specified above, 77°F (25°C) and 15% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.
3. For the purpose of improvement, specifications may be updated periodically.
4. BW30LE-4040 was previously named BW30HP-4040.

Figure 1



Product	Dimensions – Inches (mm)			
	A	B	C	D
BW30LE-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
BW30-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
BW30-2540	40.0 (1,016)	1.19 (30.2)	0.75 (19)	2.4 (61)

1. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element systems.
 2. BW30-2540 elements fit nominal 2.5-inch I.D. pressure vessel. BW30LE-4040 and BW30-4040 elements fit nominal 4-inch I.D. pressure vessel.
- 1 inch = 25.4 mm

Fonte: Lenntech.

A qualidade da água de saída da osmose reversa está descrita na figura 28. A coluna de “total” é referente ao permeado final de saída.

Figura 28 - Qualidade da água de saída da osmose reversa – Água superficial

Concentrações (mg/L como íon)						
	Alimentação	Concentrado		Permeado		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ⁺	78,51	132,7	311,4	0,62	1,42	0,98
Mg ⁺²	22,43	37,97	89,32	0,10	0,24	0,17
Ca ⁺²	14,96	25,31	59,56	0,07	0,15	0,11
Sr ⁺²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba ⁺²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₃ ⁻²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl ⁻	207,3	350,5	823,5	1,36	3,12	2,16
Br ⁻¹	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₄ ⁻²	6,69	11,32	26,68	0,02	0,05	0,03
PO ₄ ⁻³	1,00	1,69	3,97	0,01	0,01	0,01
SiO ₂	6,69	11,32	26,62	0,03	0,08	0,05
Boron	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TDS ⁺	337,6	570,9	1 341	2,21	5,08	3,51
Cond. µS/cm	721	1 196	2 699	5	11	8
pH	7,8	7,8	7,7	7,0	7,1	7,1

Fonte: Autor (Software Wave).

O custo com eletricidade também foi calculado pelo software e está disposto na figura 29:

Figura 29 - Custo com eletricidade na etapa da osmose reversa – Água superficial

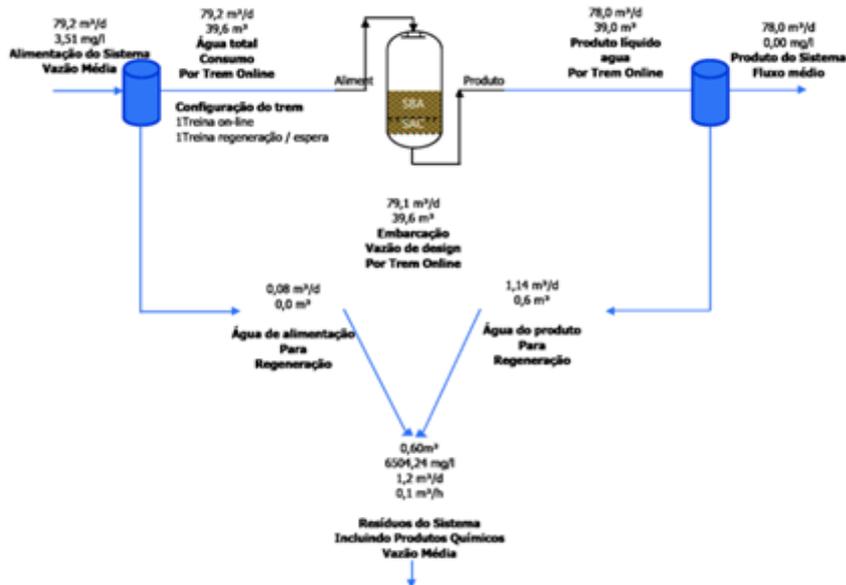
Eletrecidade

Pico de potência	(kW)	2,2
Energia	(kWh/d)	53,7
Custo unitário de eletricidade	(R\$/kWh)	0,8043
Custo da eletricidade	(R\$/d)	43,2
Energia específica	(kWh/m ³)	0,68

Fonte: Autor (Software Wave).

Após a etapa da osmose reversa, a água superficial irá para o leito de troca iônica. O leito é misto, então possui resinas aniônicas e catiônicas.

Figura 30 - Esquema da etapa de troca iônica – Água superficial



Fonte: Autor (Software Wave).

Na etapa de troca iônica, a água passa por um leito em operação, enquanto há outro de reserva. A vazão de entrada nessa etapa é de 6,6 m³/h e a de saída é de 6,5 m³/h, resultando em uma recuperação de 98,5% do sistema. O tempo de operação do leito é de 12 horas e a duração estimada da regeneração é de 3 horas. As resinas escolhidas foram a AmberLite HPR650H e a AmberLite HPR550OH. As condições de regeneração das resinas também foram especificadas pelo software, apresentadas na figura 31:

Figura 31 - Condições de regeneração – Água superficial

Regeneração IX

Consumo de químicos IX		
Protocolo de regeneração	1	2
Regenerante	HCl	NaOH
Conc. estoque (%)	32	50
Custo unitário (R\$/kg)	3,99	5,34
Temperatura de regeneração (°C)	25,0	25,0
Dose		
Base em massa (g/L)	100,0	100,0
Consumo		
por Regeneração		
@ concentração em estoque (kg)	8	5
@ base 100% (kg)	3	3
por dia		
@ concentração em estoque (kg/dia)	15,8	10,0
@ base 100% (kg/dia)	5,0	5,0
Custo diário (R\$/dia)	62,93	53,40

Fonte: Autor (Software Wave).

A qualidade e a composição iônica da água de saída que, conseqüentemente, é a água de entrada do eletrolisador estão descritas nas figuras 32 e 33.

Figura 32 - Qualidade do produto da troca iônica – Água superficial

Qualidade produto IX

		Alimentação	Média desejada	Ponto final desejado	Média estimada
pH @ 25,0 °C		7,07	-	-	7,00
Condutividade @ 25 °C	(µS/cm)	7,89	0,12	0,22	0,055
Na	(mg/L)	0,982	0,010	0,020	< 0.001
SiO ₂	(mg/L)	0,052	0,010	0,020	< 0.001

Fonte: Autor (Software Wave)

Figura 33 - Composição iônica da água de saída da troca iônica – Água superficial

Composição da água da IX

Concentração iônica e outros atributos					
Espécies		Entrada IX	Produto IX	Produto do sistema IX (incluindo bypass)	Concentrado da IX
NH ₃ /NH ₄ ⁺ Total	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
K ⁺	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Na ⁺	(mg/L)	0,982	0,000	0,000	2378
Mg ²⁺	(mg/L)	0,166	0,000	0,000	11
Ca ²⁺	(mg/L)	0,107	0,000	0,000	7
Sr ²⁺	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Ba ²⁺	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Cátions intercambiáveis totais	(meq/L)	0,06	0,00	0,00	105
CO ₃ ²⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
CO ₂	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
NO ₃ ⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
F ⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Cl ⁻	(mg/L)	2,159	0,000	0,000	4092
Br ⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	0,032	0,000	0,000	2
PO ₄ ³⁻ /H ₃ PO ₄ /H ₂ PO ₄ ⁻ /HPO ₄ ²⁻ -Total	(mg/L)	0,010	0,000	0,000	1
SiO ₂ Total	(mg/L)	0,052	0,000	0,000	3
B Total	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Ânions intercambiáveis totais	(meq/L)	0,06	0,00	0,00	116
TDS	(mg/L)	3,510	0,002	0,002	6 504
pH @ 25,0 °C		7,07	7,00	7,00	1,97
Dureza	(meq/L)	0,02	0,00	0,00	1,21
Alcalinidade total	(meq/L)	0,00	0,00	0,00	0,00
Orgânicos (TOC)	(mg/L TOC)	0,83	0,75	0,75	6,16
Total de Sólidos Suspensos (TSS)	(mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00
Condutividade @ 25 °C	(µS/cm)	7,89	0,055	0,055	15 194
Temperatura	(°C)	25,0	25,0	25,0	25,0

Fonte: Autor (Software Wave).

Nessa etapa, o custo com eletricidade diária também foi especificado na figura 34.

Figura 34 - Custo com eletricidade na etapa de troca iônica – Água superficial

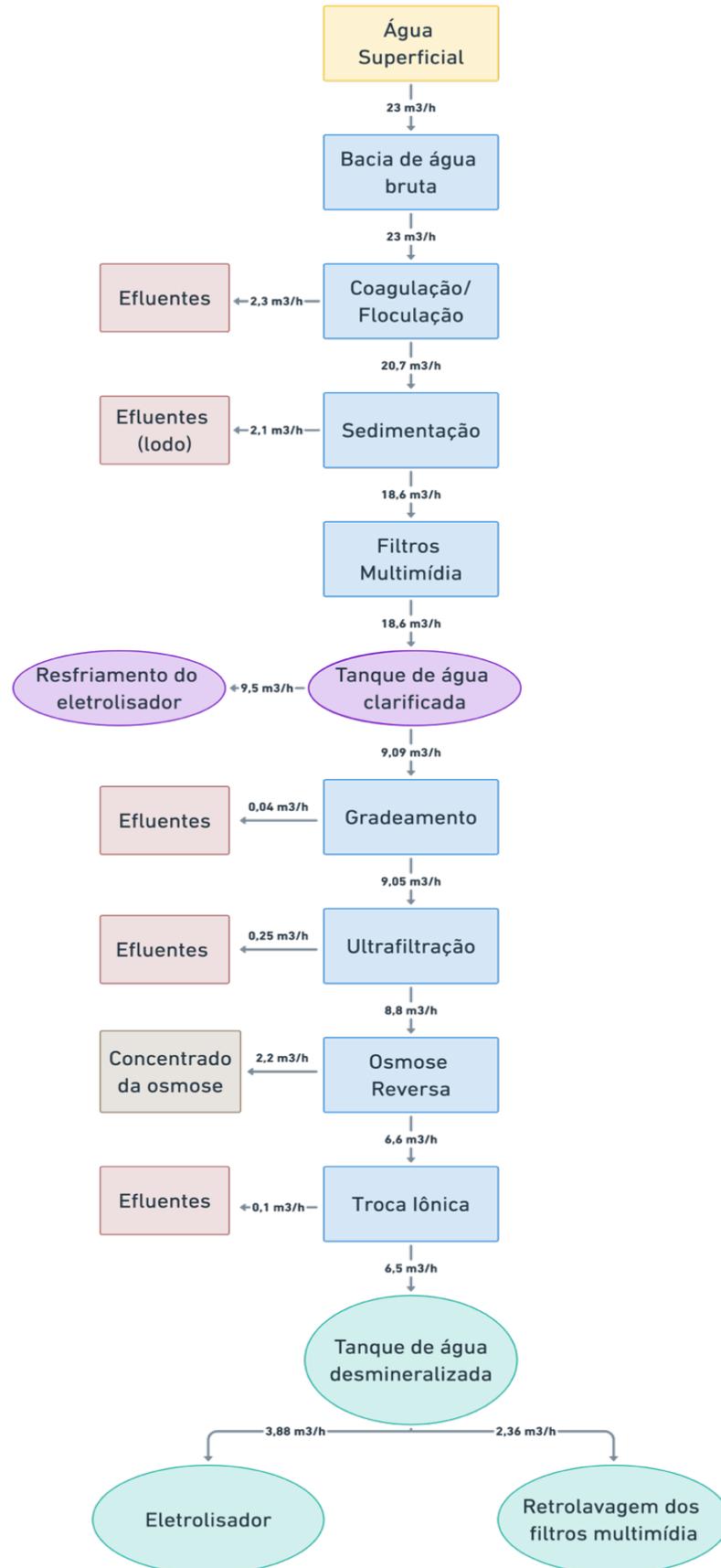
Eletrecidade

Pico de potência	(kW)	0,29
Energia	(kWh/d)	7,31
Custo unitário de eletricidade	(R\$/kWh)	0,8000
Custo da eletricidade	(R\$/d)	5,9
Energia específica	(kWh/m ³)	0,090

Fonte: Autor (Software Wave).

A figura 35 representa o fluxograma, com as vazões de entrada e de saída das etapas de tratamento da água superficial.

Figura 35 - Fluxograma com etapas do tratamento da água superficial



Fonte: Autor (2022).

4.4 Simulação realizada no software Wave para água do mar, proveniente do Pecém

Para realizar a simulação da desmineralização da água, foram inseridos os parâmetros descritos anteriormente. Após isso, foi realizado um balanceamento dos íons para manter o balanço adequado de cargas.

Figura 36 - Parâmetros da água de alimentação – Água salina

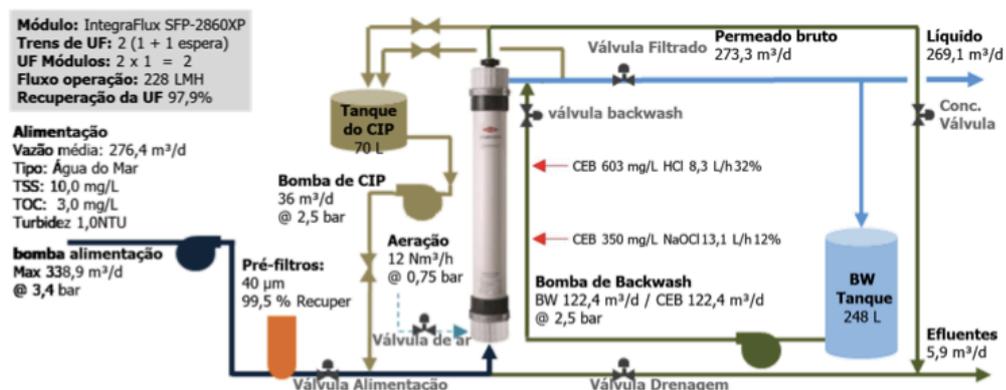
Cátions				Ânions				Neutros	
Sigla	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Sigla	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L	Sigla	mg/L
NH ₄	0,300	0,832	0,017	CO ₂	16,217	27,047	0,540	SiO ₂	8,200
K	420,019	537,601	10,743	HCO ₃	137,070	112,419	2,246	B	0,000
Na	12 111,169	26 363,278	526,806	NO ₃	10,700	8,635	0,173	CO ₂	0,817
Mg	1 249,478	5 145,308	102,817	Cl	20 424,158	28 829,916	576,096		
Ca	504,573	1 260,076	25,180	F	0,300	0,790	0,016		
Sr	5,100	5,826	0,116	SO ₄	4 159,538	4 333,759	86,600		
Ba	0,020	0,015	0,000	PO ₄	0,000	0,000	0,000		
				Br	0,000	0,000	0,000		
Cátions totais:			665,678	Ânions totais:			665,671	Neutros totais:	
								9,017	
Sólidos Dissolvidos Totais: 39 047,027 mg/L				Balanço de cargas 0,000000 meq/L			Condutividade estimada 56 649,33 µS/cm		
Sólidos Dissolvidos: 39 048,192 mg/L									
Total ppm CaCO ₃ : 33 312,936									

Fonte: Autor (Software Wave).

Foram definidas etapas também de ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica para tratamento da água do mar.

O esquema da ultrafiltração está representado na figura 37:

Figura 37 - Esquema da etapa de ultrafiltração – Água salina



Fonte: Autor (Software Wave).

O sistema é composto por 1 módulo de ultrafiltração de operação e 1 de espera. A recuperação é de 97,9%, logo, a vazão de entrada é de cerca de 22,9 m³/h e a saída de 22,4 m³/h, sendo gerado um fluxo de 0,5 m³/h de efluentes. Na ultrafiltração da água do mar também foram consideradas as manutenções e

limpezas, como backwash, CEB e CIP. As condições de operação e intervalos de realização dessas manutenções estão descritas na figura 38:

Figura 38 - Condições de operação da unidade de ultrafiltração – Água salina

Condições de operação da UF

	Duração	Intervalo	Fluxo/Vazão
Filtração:	30,0 min	33,3 min	-
Instantâneo			
1 Trens em operação			228 LMH
2 Total de trens			114 LMH
Média			112 LMH
Líquida			110 LMH
Backwash	3,3 min	33,3 min	100 LMH
CEB Ácido	16,0 min	168 h	100 LMH
CEB Alcalino	16,0 min	24 h	100 LMH
CIP	311,6 min	60 d	36,00 m ³ /d
Teste de integridade das membranas:	30,0 min	24 h	-

Fonte: Autor (Software Wave).

As dosagens de químicos também foram especificadas no software. Percebe-se que, além do intervalo de regeneração da água salina ser menor que os intervalos da água superficial, a dosagem de produto químico utilizada é maior para a água do mar.

Figura 39 - Dosagem de químicos da etapa de ultrafiltração – Água salina

Químicos

Químicos	Custo unitário (R\$/kg)	Dose (mg/L)	Volume (L/d)	Custo (R\$/d)
Ácido Cítrico (100%)	10,000		0,0	0,26
CIP		20000		
HCl (32%)	3,990		0,0	0,14
CEB1		603		
CIP		603		
NaOCl (12%)	2,460		0,37	1,04
CEB2		350		
CIP		2000		
NaOH (50%)	5,340		0,0015	0,01
CIP		925		
Custo total de químicos				1,45

Fonte: Autor (Software Wave).

A qualidade da água de saída desta etapa, por sua vez, também está especificada na figura 40:

Figura 40 - Qualidade da água de saída da ultrafiltração – Água salina

Qualidade de água da UF

Nome da corrente		Corrente 1	
Tipo água		Água do Mar (10,0 - 40,0 °C)	
		Alimentação	Qualidade esperada para o produto da UF
Temperatura	(°C)	27,0	27,0
Turbidez	(NTU)	1,0	≤ 0.1
SST	(mg/L)	10,0	-
Orgânicos (TOC)	(mg/L TOC)	3,0	2,7
SDT	(mg/L)	39048	39048
pH		7,9	7,9

Fonte: Autor (Software Wave).

Os custos de eletricidade da etapa de ultrafiltração também foram especificados e calculados pelo software, mostrados na figura 41.

Figura 41 - Custos com eletricidade da etapa da ultrafiltração – Água salina

Eletrecidade

Pico de potência	(kW)	6,15
Energia	(kWh/d)	25,19
Custo unitário de eletricidade	(R\$/kWh)	0,8043
Custo da eletricidade	(R\$/d)	20,26
Energia específica	(kWh/m ³)	0,09

Fonte: Autor (Software Wave).

Após a etapa de ultrafiltração, a água irá passar pela osmose reversa. Assim como o tratamento da água superficial, o sistema de osmose reversa ocorre em 2 estágios e com 6 membranas em cada estágio. Essa tecnologia possui uma recuperação menor no tratamento de água salina, logo, foi definida uma recuperação de 45% para as membranas.

A vazão de entrada é de 22,4 m³/h e a de saída é de 10,1 m³/h. O concentrado gerado possui uma vazão de 12,3 m³/h. A membrana escolhida foi a SW30XLE-440i (Datasheet detalhado na figura 44). Na figura 42 estão especificadas as vazões do concentrado e do permeado em cada estágio.

Figura 42 - Vazões e pressões da etapa de osmose reversa – Água salina

#	Descrição	Vazão (m³/d)	SDT (mg/L)	Pressão (bar)
1	Alimentação Raw para o Sistema RO	269,1	39 047	0,0
2	Vazão Líquida para o Passo 1	268,8	39 133	54,1
4	Concentrado total do Passo 1	148,0	70 791	51,0
6	Produto Líquido do Sistema RO	121,2	353,2	0,0

Fonte: Autor (Software Wave).

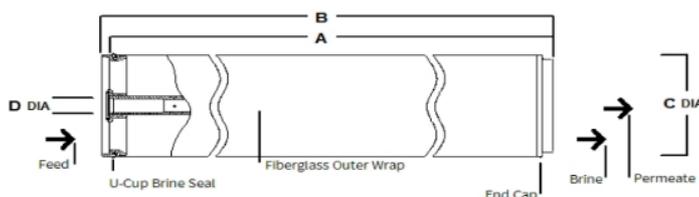
Figura 43 - Datasheet da membrana modelo SW30XLE-440i

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flowrate		Stabilized Boron Rejection (%)	Stabilized Salt Rejection (%)
	(ft²)	(m²)		(gpd)	(m³/d)		
SW30XLE-440i	440	41	28	9,900	37.4	91.5	99.8

1. The above benchmark values are based on the following test conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary $\pm 15\%$.
3. Minimum Salt Rejection is 99.6%.
4. Stabilized salt rejection is generally achieved within 24 – 48 hours of continuous use, depending upon feedwater characteristics and operating conditions.
5. Product specifications may vary slightly as improvements are implemented.
6. Active area guaranteed $\pm 5\%$. Active area as stated by DuPont Water Solutions is not comparable to the nominal membrane area figure often stated by some element suppliers.

Element Dimensions



FilmTec™ Element	Dimensions – inches (mm)						1 inch = 25.4 mm	
	A		B		C		D	
	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
SW30XLE-440i	40.0	1,016	40.5	1,029	7.9	201	1.125 ID	29 ID

Fonte: Lenntech

A qualidade da água de saída da osmose reversa está especificada na figura 44. Percebe-se que os parâmetros, como condutividade e sólidos totais dissolvidos já diminuíram bastante, porém, ainda estão fora do limite permitido para entrada no eletrolisador. Com isso, uma fase de troca iônica é necessária.

Figura 44 - Qualidade da água de saída da osmose reversa – Água salina

Concentrações (mg/L como íon)						
	Alimentação	Concentrado		Permeado		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0,30	0,47	0,53	0,02	0,03	0,02
K ⁺	420,0	672,2	760,4	2,81	17,13	5,17
Na ⁺	12 111	19 387	21 941	71,18	425,8	129,7
Mg ⁺²	1 249	2 004	2 273	1,25	7,36	2,26
Ca ⁺²	504,6	809,2	917,8	0,50	2,96	0,91
Sr ⁺²	5,10	8,18	9,28	0,01	0,03	0,01
Ba ⁺²	0,02	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00
CO ₃ ⁻²	16,22	27,23	31,21	0,00	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻	137,1	216,9	244,6	1,12	5,99	1,92
NO ₃ ⁻	10,70	17,04	19,17	0,21	1,21	0,38
F ⁻	0,30	0,48	0,54	0,00	0,01	0,00
Cl ⁻	20 424	32 698	37 010	114,5	685,2	208,7
Br ⁻¹	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₄ ⁻²	4 160	6 672	7 569	2,22	12,96	4,00
PO ₄ ⁻³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO ₂	8,20	13,11	14,81	0,08	0,46	0,14
Boron	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	0,82	1,53	1,80	0,97	1,46	1,06
TDS ^a	39 047	62 526	70 791	193,9	1 159	353,2
Cond. µS/cm	56 649	85 407	95 088	403	2 287	724
pH	7,9	7,9	7,9	6,2	6,7	6,4

Fonte: Autor (Software Wave).

Os custos com eletricidade dessa etapa estão descritos na Figura 45:

Figura 45 - Custo com eletricidade na etapa da osmose reversa – Água salina

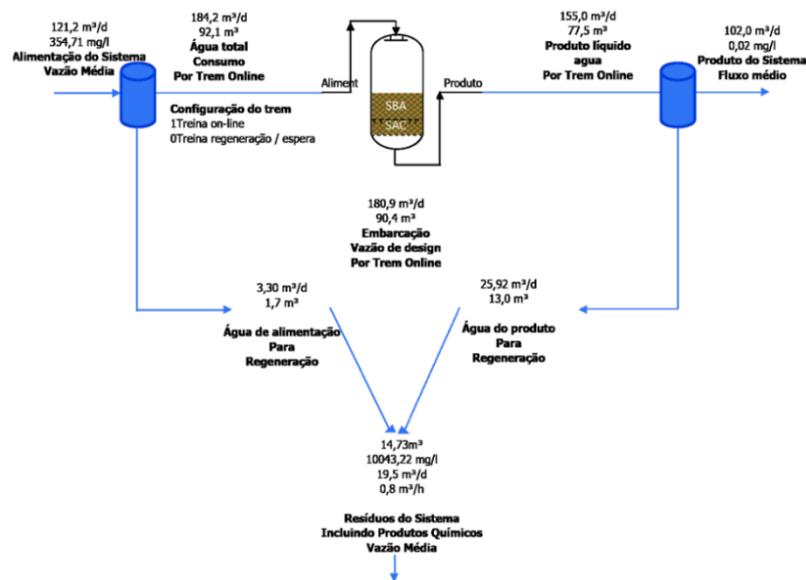
Eletricidade

Pico de potência	(kW)	21,2
Energia	(kWh/d)	507,5
Custo unitário de eletricidade	(R\$/kWh)	0,8043
Custo da eletricidade	(R\$/d)	408,2
Energia específica	(kWh/m ³)	4,19

Fonte: Autor (Software Wave)

A última etapa da desmineralização da água salina é a troca iônica. Na figura 46 está descrito o fluxograma da etapa:

Figura 46 - Esquema da etapa de troca iônica – Água salina



Fonte: Autor (Software Wave).

Na etapa de troca iônica, os íons são adsorvidos pelas resinas catiônicas e aniônicas (leito misto), contribuindo para a desmineralização da água. Nessa etapa, existem 2 leitos, sendo um em operação e outro de reserva. A vazão de entrada nessa etapa é de 10,1 m³/h e a de saída é de 8,5 m³/h, resultando em uma recuperação de 84,1% do sistema. O tempo de operação do leito é de 12 horas e a duração estimada da regeneração é de 6,23 horas. As resinas escolhidas foram as mesmas do processo da água superficial. As condições de regeneração das resinas também foram especificadas pelo software, descritas na figura 47:

Figura 47 - Condições de regeneração – Água salina

Regeneração IX

Consumo de químicos IX		
Protocolo de regeneração	1	2
Regenerante	HCl	NaOH
Conc. estoque (%)	32	50
Custo unitário (R\$/kg)	3,99	5,34
Temperatura de regeneração (°C)	27,0	27,0
Dose		
Base em massa (g/L)	61,7	69,1
Consumo		
por Regeneração		
@ concentração em estoque (kg)	132	190
@ base 100% (kg)	42	95
por dia		
@ concentração em estoque (kg/dia)	173,9	249,7
@ base 100% (kg/dia)	55,6	124,9
Custo diário (R\$/dia)	693,85	1 333,52

Fonte: Autor (Software Wave).

Percebe-se, que, a quantidade de produtos químicos necessários para regeneração das resinas do tratamento da água salina é muito maior que em comparação à água superficial. Além disso, a regeneração é mais demorada que no outro processo também.

A qualidade e a composição iônica da água de saída da última etapa estão descritas nas figuras 48 e 49:

Figura 48 - Qualidade do produto da troca iônica – Água salina

Qualidade produto IX

		Alimentação	Média desejada	Ponto final desejado	Média estimada
pH @ 27,0 °C		6,38	-	-	7,41
Condutividade @ 25 °C	(µS/cm)	724	0,12	0,22	0,082
Na	(mg/L)	129,713	0,010	0,020	0,006
SiO ₂	(mg/L)	0,139	0,010	0,020	0,010

Fonte: Autor (Software Wave).

Figura 49 - Composição iônica da água de saída da troca iônica – Água salina

Composição da água da IX

Concentração iônica e outros atributos					
Espécies		Entrada IX	Produto IX	Produto do sistema IX (incluindo bypass)	Concentrado da IX
NH ₃ /NH ₄ ⁺ Total	(mg/L)	0,020	0,000	0,000	0
K ⁺	(mg/L)	5,175	0,000	0,000	32
Na ⁺	(mg/L)	129,713	0,006	0,010	4487
Mg ²⁺	(mg/L)	2,262	0,000	0,000	14
Ca ²⁺	(mg/L)	0,906	0,000	0,000	6
Sr ²⁺	(mg/L)	0,009	0,000	0,000	0
Ba ²⁺	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Cátions intercambiáveis totais	(meq/L)	6,01	0,00	0,00	197
CO ₃ ²⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	21
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	1,916	0,000	0,000	0
CO ₂	(mg/L)	1,057	0,000	0,000	0
NO ₃ ⁻	(mg/L)	0,378	0,000	0,000	2
F ⁻	(mg/L)	0,004	0,000	0,000	0
Cl ⁻	(mg/L)	208,700	0,000	0,000	4072
Br ⁻	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	3,996	0,000	0,000	25
PO ₄ ³⁻ /H ₃ PO ₄ /H ₂ PO ₄ ⁻ /HPO ₄ ²⁻ Total	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
SiO ₂ Total	(mg/L)	0,139	0,010	0,010	1
B Total	(mg/L)	0,000	0,000	0,000	0
Ânions intercambiáveis totais	(meq/L)	6,03	0,00	0,00	116
TDS	(mg/L)	354,7	0,021	0,021	10 043
pH @ 27,0 °C		6,38	7,41	7,41	12,60
Dureza	(meq/L)	0,23	0,00	0,00	1,44
Alcalinidade total	(meq/L)	0,03	0,00	0,00	0,69
Orgânicos (TOC)	(mg/L TOC)	0,65	0,59	0,59	1,00
Total de Sólidos Suspensos (TSS)	(mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00
Condutividade @ 25 °C	(µS/cm)	724	0,082	0,082	29 116
Temperatura	(°C)	27,0	27,0	27,0	27,0

Fonte: Autor (Software Wave).

Os custos de eletricidade dessa etapa também foram descritos no software:

Figura 50 - Custo com eletricidade na etapa de troca iônica – Água salina

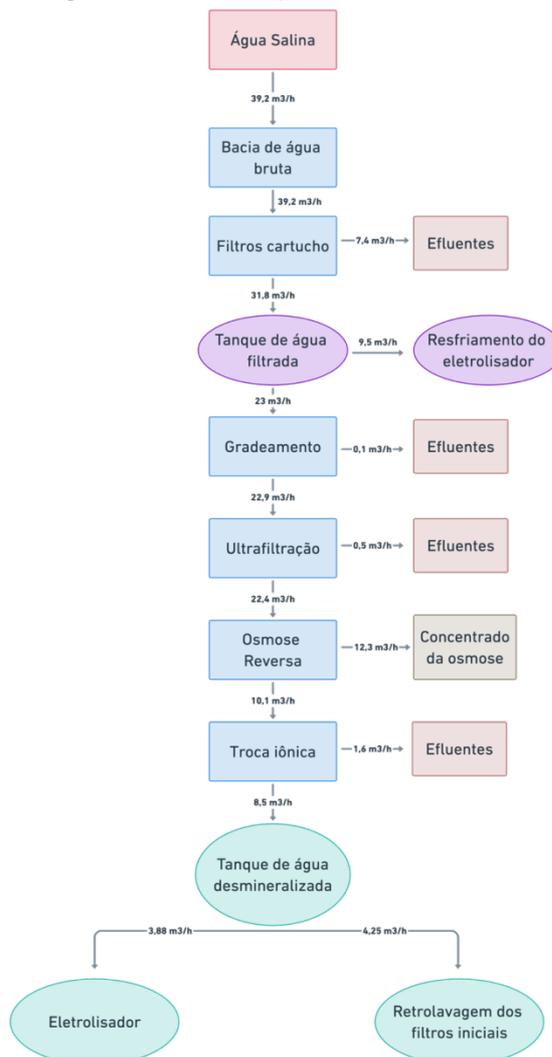
Eletricidade

Pico de potência	(kW)	0,36
Energia	(kWh/d)	69,63
Custo unitário de eletricidade	(R\$/kWh)	0,8000
Custo da eletricidade	(R\$/d)	56,0
Energia específica	(kWh/m³)	0,680

Fonte: Autor (Software Wave).

A figura 51 representa o fluxograma de etapas do tratamento de água salina, com as vazões de entrada e de saída de cada fase.

Figura 51 - Fluxograma com etapas do tratamento da água salina



Fonte: Autor (2022).

4.5 Custos com aquisição, operação e manutenção

Um dos fatores de avaliação nesse trabalho são os custos com aquisição das plantas de tratamento de água, operação e manutenção dos sistemas.

Os custos podem ser resumidos na seguinte equação:

$$Custo\ total = C_{aquis.} + C_{op.} + C_{manut.} \quad (28)$$

Agora será calculado individualmente cada custo para determinada fonte de água:

4.5.1 Água superficial

4.5.1.1 Custo de Aquisição (CAPEX)

$$C_{aquis.I} = C_{ETA} + C_{ultrafilt.} + C_{osmose} + C_{troca\ iônica} \quad (29)$$

Em relação ao custo da osmose reversa, será considerado o modelo da membrana escolhida na simulação, que é o modelo BW 30-4040, da Dupont. De acordo com bibliografias, o valor unitário da membrana é cerca de R\$ 1.100,00. Considerando que o sistema é composto por 2 estágios, com 6 membranas em cada, resulta em um total de R\$ 13.200,00.

Para cálculo do custo de aquisição da troca iônica, o sistema será o mesmo entre os dois tipos de fontes de água. No entanto, o volume das resinas presentes no leito de troca iônica é diferente.

De acordo com a simulação, para a água superficial, será necessário um volume de cerca de 27 litros de resina catiônica e cerca de 30 litros de resina aniônica. Considerando bibliografias encontradas, em que o valor unitário da resina catiônica é de R\$ 22,00 e R\$ 82,00 o preço da resina aniônica (em litro), tem-se que o valor total de cada uma é R\$ 594,00 e R\$ 2.460,00, respectivamente.

Substituindo, na equação, os valores encontrados, tem-se que:

$$C_{aquis.I} = R\$ 13.200,00 + R\$ 594,00 + R\$ 2.460,00$$

$$C_{aquis.I} = R\$ 16.254,00$$

Para estimativa dos outros custos de aquisição da planta, foram retirados dados de uma bibliografia, que representam a % de custo de cada etapa na construção de uma planta de tratamento de água superficial. Os dados foram adaptados para a planta descrita neste trabalho.

Tabela 8 - Contribuição de diversos componentes no custo de aquisição total na planta de tratamento de água superficial

Item	% do custo
Construção Civil	40%
Equipamentos e Instalação	12%
Mobilização e infraestrutura	28%
Pintura	1,5%
Tubulações	9%
Materiais	9%

Fonte: Adaptado de Rogers e Callie (2008).

Considerando que o custo com membranas e resinas é referente ao item “materiais”, que corresponde a 9%, pode-se obter um custo total de aquisição da planta de **R\$ 172.192,20**.

Na tabela 9, estão demonstrados os custos para cada item:

Tabela 9 - Custo de aquisição da planta de tratamento da água superficial

Item	Custo (R\$)
Construção Civil	R\$ 68.827,31
Equipamentos e Instalação	R\$ 20.070,01
Mobilização e infraestrutura	R\$ 48.179,11
Pintura	R\$ 2.581,02
Tubulações	R\$ 16.280,74
Materiais	R\$ 16.254,00

Fonte: Autor (2022).

Também no custo de aquisição, também é necessário realizar compras de equipamentos para realizar análises necessárias no laboratório químico. É

importante que sejam adquiridos equipamentos como espectrofotômetro, pHmetro e condutivímetro, assim como estufa, para realizar análises como DQO.

4.5.1.2 Custos de Operação e Manutenção (O&M)

O custo de operação será calculado com a soma do custo mensal de energia elétrica, produtos químicos e reagentes, assim como o custo com fornecimento de água bruta, podendo ser representado pela equação abaixo:

$$C_{op.I} = (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{ETA} + (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{ultrafilt.} + (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{osmose} + (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{troca\ iônica} + C_{água\ bruta} \quad (30)$$

Primeiramente, para consumo de energia elétrica, segundo Liu et al. (2018), tem-se o seguinte consumo para cada processo de tratamento:

Figura 52 - Consumo de energia elétrica no processo de tratamento

Tipos de tratamento	Consumo de energia (kWh/m³)
Sedimentação por coagulação	0,004 – 0,009
Filtro biológico aerado	0,15
Filtração por micro membrana	0,2 – 0,6
Reator biológico de membrana	0,5 – 1,5
Osmose reversa	1 – 1,2

Fonte: Liu et al. (2018).

Para o tratamento primário da água superficial, que é sedimentação com coagulação, foi adotado o valor máximo de 0,009 kWh/m³.

Com a vazão já calculada da ETA de 23 m³/h, tem-se que o valor gasto com energia elétrica por dia é de R\$ 2,48.

Em relação às etapas de desmineralização da água, os custos com energia elétrica por dia foram citados anteriormente, na simulação obtida no software Wave.

A partir dos resultados obtidos, pode-se construir uma tabela com o custo mensal de energia para tratamento da água superficial.

Tabela 10 - Custo mensal com energia elétrica – Água superficial

Custo com energia elétrica	
Etapa	Custo (R\$/dia)
ETA	R\$ 2,48
Ultrafiltração	R\$ 8,56
Osmose reversa	R\$ 43,20
Troca iônica	R\$ 5,90
Total (R\$/dia)	R\$ 60,14
Total (R\$/mês)	R\$ 1.804,20

Fonte: Autor (2022).

Para o cálculo de custo mensal de produtos químicos, foram considerados os produtos e as dosagens propostos na simulação realizada.

Inicialmente, para a Estação de Tratamento de Água, foram consideradas dosagens do coagulante PAC (na coagulação), polímero na floculação e hipoclorito para cloração da etapa.

Foram consideradas quantidades de dosagens desses produtos utilizados em uma Indústria do Pecém que possui um sistema similar.

Para ultrafiltração, os custos foram desconsiderados, visto que as limpezas (CEB e CIP) ocorrem a cada 7/14 e 90 dias, respectivamente, além de serem custos baixos quando comparados com o restante. Além disso, a limpeza backwash, realizada diariamente, não utiliza dosagem de produtos químicos.

Na etapa de osmose reversa, o software não considera a dosagem de nenhum produto químico. No entanto, sabe-se que seria necessário a dosagem de metabissulfito, para garantir que a presença de cloro não ocasione danos às membranas, já que elas são ultrasensíveis a esse produto. Além disso, também seria necessário a dosagem de anti-incrustante, para evitar que os sais pouco solúveis se precipitem sobre a superfície das membranas, com a adição de produtos químicos. Mesmo com essa necessidade, não será considerada no cálculo do custo com produto químico, pois o software não realizou essa simulação.

Por último, na fase de troca iônica, é necessário realizar regenerações nas resinas, utilizando químicos. Na água superficial, as regenerações duram cerca de 3 horas, depois da operação de 12 horas. As dosagens diárias de cada produto para regeneração foram especificadas nas simulações.

Assim como as dosagens da ETA, os preços unitários dos produtos químicos foram obtidos de uma Indústria no Pecém que também os utiliza.

Os resultados obtidos estão na tabela 11:

Tabela 11 - Custo mensal com produtos químicos – Água superficial

Custo com produtos químicos					
Etapa	Produto químico	Dosagem (kg/dia)	Dosagem (kg/mês)	Custo unitário (R\$/kg)	Custo (R\$/mês)
ETA	PAC	26,4	792	R\$ 5,90	R\$ 4.672,80
	Polímero	0,528	15,84	R\$ 26,16	R\$ 414,37
	Hipoclorito de Sódio	26,4	792	R\$ 2,46	R\$ 1.948,32
Ultrafiltração	-	-	-	-	R\$ 0,00
Osmose Reversa	-	-	-	-	R\$ 0,00
Troca Iônica	HCl	57,4	474	R\$ 3,99	R\$ 1.891,26
	NaOH	82,3	300	R\$ 5,34	R\$ 1.602,00
Custo total (R\$/mês)					R\$ 10.528,75

Fonte: Autor (2022).

Além dos produtos químicos, também é necessário considerar um custo para reagentes necessários para realização de análises da água no laboratório químico. É importante que as análises sejam feitas em todas as etapas de tratamento, para que seja mantido um monitoramento do processo.

Com isso, é importante a compra de reagentes para realização de análises como cloro, ferro, sulfato, alumínio, cálcio, magnésio, alcalinidade, dureza total, nitrato, sílica, DQO, fosfato e cloretos.

Em relação ao fornecimento de água bruta, será considerado o valor reajustado pela COGERH em 2022, para indústrias, de R\$ 3,27/m³. Considerando que serão necessários cerca de 23 m³ por hora de água bruta, e a planta com 12 horas de funcionamento, o custo total no mês de água bruta será o equivalente a R\$ 27.075,60.

Substituindo na equação descrita anteriormente, pode-se obter o custo de operação mensal da planta:

$$C_{o\&ml} = R\$ 1.804,20 + R\$ 10.528,75 + R\$ 27.075,60$$

$$C_{o\&ml} = R\$ 39.408,55$$

No custo de manutenção, estão englobadas manutenções realizadas anualmente na planta – em equipamentos, válvulas, tubulações, assim como a troca de membranas e resinas, que ocorrem a cada aproximadamente 1,5 anos. O tempo

de troca é maior para a planta com fonte de água superficial, pois a água de alimentação possui um menor teor de condutividade.

O custo com tratamento e descarte adequados dos efluentes gerados na ETA e do rejeito da osmose reversa não serão considerados.

4.5.2 Água salina

4.5.2.1 Custo de Aquisição (CAPEX)

Para a água salina, o custo de aquisição pode ser determinado a partir da equação abaixo:

$$C_{aquis.II} = C_{ultrafilt.} + C_{osmose} + C_{troca\ iônica} \quad (31)$$

Em relação à osmose, será considerada a membrana escolhida na simulação, que foi a de modelo SW 30XLE-440i. De acordo com bibliografias, a unidade da membrana é de R\$ 4.911,30. Considerando que são 2 estágios e cada estágio possui 6 membranas, o valor total de aquisição das membranas é de R\$ 58.935,60.

Em relação à troca iônica, será considerada a aquisição do volume adequado de resinas catiônicas e aniônicas para o sistema. De acordo com a simulação realizada, serão necessários 733 litros de resina catiônica e 1650 litros de resina aniônica. Calculando o custo total, com os valores unitários iguais ao do sistema de tratamento da água superficial, obtém-se um valor total de R\$ 151.426,00.

Após cálculo do custo de membranas e de resinas, para estimativa do preço de aquisição dos componentes restantes da planta foi realizado uma consideração, baseada em bibliografia, para contribuição de cada item em %.

Tabela 12 - Contribuição de diversos componentes no custo de aquisição total na planta de tratamento da água salina

Item	% do custo
Membranas	6,19%
Bombas	8,19%
Captação	7,09%
Construção civil	16,39%
Custos de Desenvolvimento e Projeto	7,09%
Equipamentos e materiais	25,79%
Instalação e serviços diversos	7,89%
Jurídico e Custos Ambientais	1%
Pré-tratamento	7,49%
Tubulações, conexões e válvulas	12,59%

Fonte: Adaptado de DesalData.com.

Considerando que o valor calculado das membranas, de R\$ 58.935,60 é referente a 6,19%, estima-se que o custo total de aquisição da planta é de **R\$ 952.109,85**.

A tabela 13 resume o custo em reais para aquisição de cada item da planta:

Tabela 13 - Custo de aquisição da planta de tratamento da água salina

Item	Custo (R\$)
Membranas	R\$ 58.935,60
Bombas	R\$ 77.977,80
Captação	R\$ 67.504,59
Construção civil	R\$ 156.050,81
Custos de Desenvolvimento e Projeto	R\$ 67.504,59
Equipamentos e materiais	R\$ 245.549,13
Instalação e serviços diversos	R\$ 75.121,47
Jurídico e Custos Ambientais	R\$ 12.282,22
Pré-tratamento	R\$ 71.313,03
Tubulações, conexões e válvulas	R\$ 119.870,63

Fonte: Autor (2022).

Foi considerado que o valor de R\$ 151.426,00, referente à aquisição das membranas está inserido dentro do item “equipamentos e materiais” na tabela anterior.

Além dos custos citados na tabela 13, o custo para montagem do laboratório para análises de qualidade também é relevante. No caso da água salina,

o custo é maior, pois o laboratório necessita de equipamentos que possuem maiores ranges de leitura, pelos altos índices de alguns parâmetros da água salina.

É importante salientar que o custo CAPEX calculado anteriormente é referente somente ao tratamento da fonte de água da planta, não considerando equipamentos como o eletrolisador – uma vez que é o mesmo para as duas plantas, assim como etapas após a produção do hidrogênio verde, como compressão, distribuição e armazenamento do gás.

4.5.2.2 Custos de Operação e Manutenção (O&M)

Para cálculo dos custos de operação da planta foram considerados os valores gastos com energia elétrica e produtos químicos/reagentes mensalmente. A equação que define esse cálculo está disposta abaixo:

$$C_{op.II} = (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{ultrafilt.} + (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{osmose} + (C_{en.elétrica} + C_{prod.quim.})_{troca\ iônica} \quad (32)$$

O custo com energia elétrica da planta de osmose reversa também foi obtida por meio da simulação realizada pelo software Wave. Os custos estão descritos na tabela 14:

Tabela 14 - Custo mensal com energia elétrica – Água salina

Custo com energia elétrica	
Etapa	Custo (R\$/dia)
Ultrafiltração	R\$ 20,26
Osmose reversa	R\$ 408,20
Troca iônica	R\$ 56,00
Total (R\$)/dia	R\$ 484,46
Total (R\$)/mês	R\$ 14.533,80

Fonte: Autor (2022).

Pode-se perceber que o custo de energia elétrica é um fator bastante relevante para o alto custo de operação da planta, sendo cerca de 14x maior que o custo mensal para água superficial.

Em relação ao custo com produtos químicos, também serão considerados os valores obtidos na simulação realizada no software Wave.

Para ultrafiltração, a lavagem CEB ocorre a cada 7 dias com ácido clorídrico e a cada 24 horas com hipoclorito de sódio. No entanto, a dosagem dos produtos ocorre em baixa vazão, 8,3 L/h e 13,1 L/h e por pouco tempo, 16 minutos. Com isso, o custo obtido com esses produtos químicos pode ser desprezado. A lavagem CIP só ocorre a cada 60 dias, e os custos com os químicos também serão desprezados.

Em relação à osmose reversa, assim como na planta de água superficial, os reagentes dosados, como anti-incrustante e metabissulfito, não foram considerados para cálculo de custo de produtos químicos no software.

Por conta da alta condutividade da água na saída da osmose, as resinas da etapa de troca iônica incrustam mais rápido e necessitam de uma regeneração com maior tempo – 6,23 horas a cada 12 horas - e mais dosagem de produto químico. Com isso, o custo mensal com produtos químicos é bem maior.

A tabela 15 resume os custos mensais com produtos químicos para tratamento da água salina:

Tabela 15 - Custo mensal com produtos químicos – Água salina

Custo com produtos químicos					
Etapa	Produto químico	Dosagem (kg/dia)	Dosagem (kg/mês)	Custo unitário (R\$/kg)	Custo (R\$/mês)
Ultrafiltração	-	-	-	-	R\$ 0,00
Osmose Reversa	-	-	-	-	R\$ 0,00
Troca Iônica	HCl	173,9	5217	R\$ 3,99	R\$ 20.815,83
	NaOH	249,7	7491	R\$ 5,34	R\$ 40.001,94
Custo total (R\$/mês)					R\$ 60.817,77

Fonte: Autor (2022).

Há necessidade, também, de considerar maiores gastos com reagentes para o laboratório localizado na planta salina, pois os reagentes que serão adquiridos devem ter altos ranges, principalmente de cloro, para leituras de altos valores. Como a água do mar possui certos parâmetros bem maiores que a água superficial, é necessário que os reagentes sejam adequados para análise.

Substituindo na equação descrita anteriormente para o custo total mensal:

$$C_{o\&mII} = R\$ 14.533,80 + R\$ 60.817,77$$

$$C_{o\&mII} = R\$ 75.351,57$$

Para efeito de simplificação do cálculo, também não foram considerados os custos com dosagens de produtos químicos dosados na etapa de captação da água salina.

Com isso, caso considerado todos os produtos químicos dosados no tratamento, o custo com químicos representaria um valor maior do que o calculado.

No custo de manutenção estão englobadas manutenções realizadas anualmente nas plantas – em equipamentos, válvulas, tubulações, assim como a troca de membranas e resinas, que ocorrem a cada aproximadamente 6 meses. O tempo de troca é menor para planta de osmose reversa com fonte de água salina, por conta da alta condutividade da água de alimentação. Além disso, o custo com tratamento e descarte adequados do rejeito da osmose reversa não será considerado.

4.6 Análise comparativa das fontes de água

A partir dos resultados discutidos anteriormente, foi elaborada uma tabela comparativa que representa o favorecimento do tipo de água para cada fator definido:

Tabela 16 – Resumo dos resultados qualitativos e quantitativos da fonte de água

Critérios de Escolha	Água Salina	Água superficial
Disponibilidade da água	X	
Facilidade da coleta da água		X
Concorrência com outros usos de água	X	
Complexidade do licenciamento e da autorização de uso da água	X	
Custos aquisição e O&M		X
Distância de transporte da fonte de água até a planta		X

Fonte: Autor (2022).

A água salina possui uma maior viabilidade em fatores importantes e que devem ser analisados, como disponibilidade da água, concorrência com outros usos de água e complexidade do licenciamento e da autorização de uso de água. Um critério importante é a disponibilidade da água, principalmente em estados que sofrem com a seca, como o Ceará, em que a água superficial deve ser utilizada em

processos essenciais. Com isso, uma alternativa seria a utilização da água salina em plantas que necessitam da utilização de água, como a produção de hidrogênio verde.

Além disso, a utilização da água salina ainda não é amplamente explorada no estado Ceará, algo que não ocorre com a água superficial, visto que essa fonte de água é utilizada em diversos outros processos, como agricultura, indústrias.

Com isso, é importante destacar que, além de fatores já conhecidos, como custos de aquisição e de operação e manutenção, também é importante avaliar outros critérios para decisão da fonte de água a ser utilizada em plantas de hidrogênio verde.

Atualmente, a água superficial ainda possui uma maior viabilidade de aplicação, principalmente pelos seus custos menores, enquanto a água salina ainda possui investimentos muito altos. No entanto, os avanços tecnológicos, que resultam em menores custos, combinados com a necessidade de buscar alternativas para uso da água em locais com problema de seca apontam para uma maior utilização, nos próximos anos, da água salina.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com esse trabalho, pode-se discutir a importância do hidrogênio verde para a descarbonização nacional e mundial. O gás é versátil e pode ser utilizado em várias aplicações, como na indústria, projetos de mobilidade e na geração de energia. Para geração do hidrogênio verde, dois insumos principais são necessários: água purificada e energia renovável. Sua produção consiste na quebra da molécula de água – em hidrogênio e oxigênio - através da passagem da corrente elétrica, originada da fonte de energia renovável, em um processo conhecido como eletrólise.

Uma vez conhecida sua importância, sabe-se que são diversas as fontes de água que podem ser utilizadas para alimentação no eletrolisador. No entanto, essas fontes de água necessitam estar dentro dos padrões determinados pela norma ASTM D1193 20211 de pureza.

Diante do exposto, foram comparadas, qualitativamente e quantitativamente, duas fontes de água distintas para produção de hidrogênio verde: água salina e água superficial.

O local escolhido para instalação das plantas analisadas foi o Ceará, por possuir um HUB de hidrogênio verde em construção no Porto do Pecém; por sua alta oferta de energias renováveis; por sua localização geográfica privilegiada; por possuir indústrias que seriam possíveis consumidores do hidrogênio verde.

O eletrolisador utilizado para as duas plantas simuladas foi o modelo alcalino A4000 da NEL Hydrogen, que produz 3880 Nm³/h e necessita de cerca de 1 L/Nm³ de água de alimentação para produção de hidrogênio verde. A fonte de energia renovável escolhida foi a solar.

Foram definidos os tratamentos das fontes de água, baseados, principalmente, na ultrafiltração, osmose reversa e troca iônica nas duas opções. A diferença está na estação de tratamento primário em que a água superficial é submetida, já que essa fonte possui uma maior turbidez e cor. No caso da água salina, o tratamento inicial é feito pela passagem da fonte por filtros, responsáveis por iniciarem o processo de retirada de impurezas. Fluxogramas foram criados para resumir os processos de tratamento das duas fontes de água.

A utilização do software *Wave* mostrou-se uma excelente ferramenta para a simulação das etapas de tratamento de água, com resultados satisfatórios e

coerentes em relação aos parâmetros de saída da água esperados, assim como custos de eletricidade e de consumo de produtos químicos.

Em relação aos custos, foi estimado um custo de aquisição da planta de tratamento para água salina de R\$ 952.109,85, e um custo com operação e manutenção mensais de R\$ 75.351,57. Em relação à planta de tratamento de água superficial, o custo CAPEX estimado foi de R\$ 172.192,20, enquanto que o custo de O&M foi estimado em R\$ 39.408,55.

Os resultados obtidos mostraram que a água salina possui alguns prós dentro dos fatores escolhidos para comparação, como: possui uma maior disponibilidade de água – cerca de 97% da água mundial e o Ceará possui um litoral extenso; há uma menor concorrência da água com outros usos, visto que a água salina não é amplamente utilizada para a indústria; há uma menor complexidade do licenciamento e da autorização de uso de água, uma vez que não é necessário a emissão de uma outorga para utilizar essa fonte de água.

Por outra vez, a água superficial possui vantagens em outros quesitos: possui maior facilidade na sua coleta; seus custos de aquisição, operação e manutenção são menores e a distância de transporte da fonte de água até o lugar escolhido para instalação da planta é menor em relação à água salina.

Diante do exposto, pode-se concluir que a água salina possui um maior custo para sua construção, por isso, a mais indicada nessa situação seria a água superficial. No entanto, a água salina pode ser uma fonte importante para o futuro, principalmente em países que sofrem com a seca, como o Brasil.

Ao longo do tempo a tecnologia e os custos para dessalinização da água salina têm melhorado e é promissor e importante ser estudada sua aplicação em diversas indústrias que necessitam de consumo de água, como a do hidrogênio verde.

Para trabalhos futuros, é sugerida a abordagem das seguintes questões:

- Avaliação do tipo de fonte de água para um outro modelo de eletrolisador, como PEM;
- Avaliação do tipo de fonte de água para plantas com maiores capacidades de GW;
- Cálculo mais preciso dos custos de aquisição, operação e manutenção das plantas, englobando todos os valores envolvidos

REFERÊNCIAS

- AHMED, M. et al. Feasibility of salt production from inland RO desalination plant reject brine: a case study. **Desalination**, Amsterdam, v.158, n.1-3, p.109-117, 2003.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Relatório Conjuntura Recursos Hídricos**, 2017. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/relatorio-conjuntura-2017.pdf/view>. Acesso em: 10 out. 2022.
- ANADÃO, P. et al. Síntese e caracterização de membranas de microfiltração para aplicação em sistemas de tratamento de águas e abastecimento e efluentes industriais. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 1, p.1-10, 2007.
- AWASTHI, A.; SCOTT, K.; BASU, S. Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 22, p. 14779–14786, 2011.
- BAKER, R. W. **Membrane Technology and Applications**. 2a Edição. John Wiley & Sons, 2004.
- BERG, H. J. W. R. The founder of scientific electrochemistry. **Rev Polarogr**, v.54, 2008.
- BIČÁKOVÁ, O.; STRAKA, P. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 16, p. 11563–11578, 2012.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.
- BUNGER et al. **Overview and public launch of the HyUnder Project**, 2014.
- CORNWELL, D.A.; MUTTER, R.N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial application and marketing of water plant residuals**. Denver, CO: American Water Works Association Research Foundation; American Water Works Association, 187p, 1999.
- GIZ, **Deutsche Gesellschaft Fur Internationale Zusammenarbeit**. 2021. Disponível em: <https://www.giz.de/de/html/index.html>. Acesso em: 05 out. 2022.
- EINAV, R.; LOKIEC, F. Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. **Desalination**, Amsterdam, v. 156, n.1-3, p. 79-85. 2003.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 05 out. 2022.

_____. **Plano Nacional de Energia 2050 - PNE**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 05 out. 2022.

FERREIRA NETO, A.B.; CORRÊA, W.L.R.; PEROBELLI, F.S. Consumo de energia e crescimento econômico: uma análise do Brasil no período 1970-2009. **Análise Econômica**. v.34, n.65, 2016.

FIEC, Sistema Federação das Indústrias do Estado do Ceará. **Combustível do futuro: Ceará se consolida como referência em hidrogênio verde**. Ano XIII N. 144 | Nov/Dez 2021. Disponível em: <https://arquivos.sfipec.org.br/sfipec/files/files/revista-fiec-144.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

FREIRE, L. **Energias renováveis complementares: benefícios e desafios**. Fundação Getúlio Vargas, 2014. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/19079/renovaveis_luciano_freire.pdf. Acesso em: 22 out. 2022.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias Renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, v.72, p.6-15, 2007.

CEARÁ, Governo do. **Governo do Ceará chega a 24 memorandos de entendimento assinados sobre energia renovável**. 2022. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2022/10/26/governo-do-ceara-chega-a-24-memorandos-de-entendimento-assinados-sobre-energia-renovavel/>. Acesso em: 05 out. 2022.

_____. **H2Brasil - Expansão do Hidrogênio Verde**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/h2-brasil>. Acesso em: 05 out. 2022.

GRIGORIEV, D.; LESER, M.; MICHEL, M.; MILLER, R. Component separation in spread sodium stearoyl lactylate (SSL) monolayers induced by high surface pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v.286, p.57-6, 2006.

HABASHI, F. A textbook of Hydrometallurgy. **Métallurgie Extrative Québec, Enr. Québec**, Canadá, p. 375 – 405, 1993.

HENTHORNE, L. Desalination – a critical element of water solutions for the 21st century. *Drinking Water – Sources, Sanitation and Safeguarding*, p. 47- 57, 2009.

LEVIE, R. The electrolysis of water. **J Electroanal Chem**, n.476, 1999.

IEA. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**, IEA, Paris, 2019.

IEA. **World Energy Outlook**. 2020. Paris, 2020. Disponível em: www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020. Acesso em: 05 out. 2022.

IRENA, **Geopolitics of the Energy Transformation - The Hydrogen Factor**, 2022.

KANG, G.; GAO, C.; CHEN, W.; JIE, X., CAO, Y.; YUAN, Q.; Study on hypochlorite degradation of aromatic polyamid reverse osmosis membrane. **Journal of Membrane Science**, v. 300, p. 165-171, 2007

KIM S, CHO D, LEE MS, OH BS, KIM JH, KIM IS. SEAHOR&D program and key strategies for the scale-up of a seawater reverse osmosis (SWRO) system. **Desalination**, v.238, p.1–9, 2009.

KREUTER, W. Electrolysis: The important energy transformer in a world of sustainable energy. **Int J Hydrogen Energy**, v.23, 1998.

KRUCK, O.; CROTOGINO, F.; PRELICZ, R.; RUDOLPH, T. Overview on All Known Underground Storage Technologies for Hydrogen. HyUnder. **Grant Agreement Deliverable**, August 2013.

LETCHER, T.M.; WILLIAMSON, A. **Forms and Measurement of Energy**. In: Encyclopedia of Energy, Cleveland, C.J. (ed.), New York: Elsevier, p. 739-748, 2004.

MANTOVANI, Paula Renata Albrecht; NEUMANN, Pamela Nicole; EDLER, Marco Antonio Ribeiro. Matriz energética brasileira: em busca de uma nova alternativa. **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão**, Cruz Alta, v. 4, n. 1, 2016.

MARSHALL, A.; BØRRESEN, B.; HAGEN, G.; TSYPKIN, M.; TUNOLD, R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers - Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 431–436, 2007.

MITSUBISHI, Power. **Hydrogen Power Generation Handbook**. 2022. Disponível em: https://solutions.mhi.com/sites/default/files/assets/pdf/et-en/hydrogen_power-handbook.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

MOKWA, R. H.; TANAKA, J. G. P.; GONÇALVES, R. do R. **Estudo e análise experimental de um sistema de células a combustível**. Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Causes and Effects of Climate Change**. YouTube, agosto de 2017a. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=G4H1N_yXBiA. Acesso em: 05 out. 2022.

_____. **Air Pollution 101**. YouTube, outubro de 2017b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=e6rglsLy1Ys&t=16s>. Acesso em: 05 out. 2022.

OOSTEROM, H.; GALJAARD, G.; NEDERLOF, M. M.; SCHIPPERS, J. C. Feasibility of micro- and ultrafiltration for the direct treatment of surface water: results of various pilot studies. **Desalination**, v. 119, p. 275-276, 1998.

PERA, M.C. et al. **Electrochemical components**. Chichester, UK: Wiley; 2013.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. DE; SILVA JÚNIOR, L. G. A. Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.1, p.111-114, 2001.

SHEN, M.; BENNETT, N.; DING, Y.; SCOTT, K. A concise model for evaluating water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 22, p. 14335–14341, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319910023712?via%3Dihub>. Acesso em: 05 out. 2022.

SIEMENS, Energy. **Hydrogen infrastructure** – the pillar of energy transition. 2022. Disponível em: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:3d4339dc-434e-4692-81a0-a55adbcaa92e/200915-whitepaper-h2-infrastructure-en.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

SIEMENS, Energy. **Soluções de Hidrogênio**. 2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/br/pt/solucoes/energia-renovavel/solucoes-de-hidrogenio.html>. Acesso em: 10 out. 2022.

SIEMENS. **Descarbonização**. 2022. Disponível em: <https://www.siemens.com/br/pt/empresa/sustentabilidade/descarbonizacao.html>. Acesso em: 05 out. 2022.

SILVEIRA, A. P. P. et al. **Dessalinização de águas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

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

REDDY, A. V. R. et al. Fouling resistant membranes in desalination and water recovery, **Desalination**, V. 138, p. 301-306, 2005.

SOARES, M. T. Destinação de águas residuais provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.3, 730-737, 2006.

SOUZA, W. A. de. **Tratamento de água**. Natal: CEFET/RN, 2007.

TENÓRIO, J. A. S. E ESPINOSA, D. C. R. Treatment of Chromium Plating Process Effluents with Ion-Exchange Resins. **Waste Management**, vol. 21. p. 637- 642, 2001.

TURNER, J.; SVERDRUP, G.; MANN, M. K.; et al. Renewable hydrogen production. **International Journal of Energy Research**. February 2007, p. 379–407, 2008.

VARGAS, G.M.R. **Investigação de alguns parâmetros operacionais e de rejuvenescimento na performance do processo de osmose inversa**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2003.

ZHABG J. et al. **Electrochemical technologies for energy storage and conversion**. New York: Wiley, 2012.