



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, ATUÁRIA E CONTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO E
CONTROLADORIA

LUÍS MATHEUS TAVARES SILVA

AVALIAÇÃO DAS FONTES DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO DE UM HUB DE
HIDROGÊNIO VERDE NO CEARÁ POR MEIO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

FORTALEZA

2023

LUÍS MATHEUS TAVARES SILVA

AVALIAÇÃO DAS FONTES DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO DE UM HUB DE
HIDROGÊNIO VERDE NO CEARÁ POR MEIO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Administração e Controladoria
da Universidade Federal do Ceará.

Orientadora: Prof.^a Dra. Mônica Cavalcanti Sá
de Abreu.

Coorientadora: Prof.^a Dra. Flávia Mendes de
Almeida Collaço.

FORTALEZA

2023

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)

S581a Silva, Luís Matheus Tavares.

Avaliação das fontes de água para abastecimento de um HUB de hidrogênio verde no Ceará por meio de dinâmica de sistemas / Luís Matheus Tavares Silva. – 2023.
142 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Programa de Pós-Graduação em Administração e Controladoria, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Mônica Cavalcanti Sá de Abreu.
Coorientação: Profa. Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço.

1. Hidrogênio verde. 2. Fontes de abastecimento hídrico. 3. Dessalinização de água do mar. 4. Água de reúso. 5. Dinâmica de Sistemas. I. Título.

CDD 658

LUÍS MATHEUS TAVARES SILVA

AVALIAÇÃO DAS FONTES DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO DE UM HUB DE
HIDROGÊNIO VERDE NO CEARÁ POR MEIO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração e Controladoria da Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade da Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Prof.^a Dra. Mônica Cavalcanti Sá de Abreu.

Coorientadora: Prof.^a Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço.

Apresentação: 16/11/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Mônica Cavalcanti Sá de Abreu (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Flávia Mendes de Almeida Collaço (Coorientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mauricio Uriona Maldonado (Membro externo)

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Dr. Daniel Barboza Guimarães (Membro interno)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Para Deus, para meus pais e irmão, para minha
namorada, para meus amigos, para mim mesmo
e para todos aqueles que sonham.

AGRADECIMENTOS

Cursar o mestrado acadêmico em Administração e Controladoria durante uma pandemia foi um dos momentos mais difíceis que já vivi. Por isso, eu agradeço a Deus por sempre ter cuidado de mim e me dado forças durante essa Odisseia. Ele me manteve de pé mesmo quando eu achei que não conseguiria. Deus também demonstra seu amor e cuidado por mim ao colocar pais, um irmão e familiares tão maravilhosos em minha vida, que me apoiam e torcem por mim.

Deus também demonstrou seu carinho e amor ao colocar a Emilia em minha vida. Uma companheira que não só me completa e que me ajuda a alcançar voos mais altos, mas que, principalmente, me permite repousar e me sentir seguro quando o mundo cobra demais de mim. O seu apoio e amor têm sido essencial para eu me manter firme. Também gostaria de deixar uma menção honrosa ao gato que a Emilia e eu criamos, o Napoleão. Seu rosto indiferente e o jeito que você escolhe me ignorar são muito importantes para meu crescimento. Outra menção honrosa eu deixo para minha amiga Josélia, que aguenta eu arengando com ela sem pôr seu réu primário em risco.

Aos meus amigos Diniz, Maria, Thallys e Osiel, que acompanham minha trajetória ao longo de anos e torcem por mim cotidianamente. Aos meus demais amigos, que também ajudam a eu manter minha sanidade mental, ou quase isso.

As minhas chefes e orientadoras, Mônica Cavalcanti Sá de Abreu e Flávia de Almeida Collaço. Sem o direcionamento de vocês, eu não teria vivido tão intensamente esses 2 anos e 6 meses de mestrado acadêmico. Vocês me deram grandes atividades e me direcionaram para que eu pudesse crescer. Ao Laboratório de Estudos em Competitividade e Sustentabilidade. Lugar de muitas alegrias e frustrações, lugar que me permitiu desenvolver minha pesquisa, lugar que me deu amigos cientistas, lugar que fez de mim um melhor profissional. Ao professor Daniel Barboza, que desde minha graduação na UFC me ajuda sempre que necessito. Ao professor Maldonado, por ter paciência e acreditar na minha capacidade em desenvolver um trabalho em dinâmica de sistemas. Ao meu amigo Cosme Polese, que me ajudou no desenvolvimento deste trabalho e está se tornando um grande amigo. Também gostaria de agradecer a minha equipe do Pró-Humanidades e toda a disposição que tem para crescermos juntos e entregarmos as etapas do projeto. Aos meus amigos Zé, Fernanda e Claudinha pelas cantorias no Devoisse.

Eu definitivamente estive sobre os ombros de gigantes. Também gostaria de agradecer o financiamento da FUNCAP por 21 meses. Por fim, a todas as pessoas que passaram pela minha vida e agregaram da sua própria forma, mas que hoje em dia não podem ser tão presentes.

“Apenas faça. Tu pode não ter talento, mas raça
é obrigação. (FELIPE RET, 2020)

RESUMO

O objetivo geral desta dissertação é avaliar a produção de hidrogênio verde no Ceará a partir de diferentes fontes hídricas por meio de dinâmica de sistemas. O Estado do Ceará está localizado em uma região semiárida do território brasileiro, portanto, sofre de escassez hídrica constante. Desse modo, a fonte de abastecimento hídrico de um *hub* de hidrogênio verde no Ceará deve ser bem planejada, pois pode ser insustentável a longo prazo. Dinâmica de sistemas é abordagem utilizada para atingir o objetivo do trabalho. Como instrumentos de coleta de dados, foram aplicadas entrevistas, pesquisa bibliográfica e análise documental. As ferramentas Diagrama de retroalimentação Causal e Diagrama de Estoques e Fluxos, próprias da abordagem, foram aplicadas para alcançar o objetivo geral. Os principais resultados apontam que a água de reúso é a fonte de abastecimento hídrico mais viável considerando-se disponibilidade e o manejo dos resíduos e que a variável mais importante na produção de hidrogênio verde é a tecnologia de resfriamento do sistema de produção de hidrogênio verde. O trabalho discute que a forma como cenário de preferência por dessalinização de água do mar pode ser insustentável a longo prazo devido ao despejo da salmoura no mar propiciar o desequilíbrio da biota marinha e caso o modelo alternativo, cujo abastecimento do *hub* de hidrogênio verde seja realizado apenas por água de reúso, seja escolhido, há possibilidades de utilizar o lodo como insumo de outros processos fabris, ou seja, adicionando economia circular há cadeia de produção de hidrogênio verde.

Palavras-chaves: Hidrogênio verde; Fontes de abastecimento hídrico; Dessalinização de água do mar; Água de reúso; Dinâmica de Sistemas.

ABSTRACT

The main purpose of this dissertation is to evaluate the production of green hydrogen in Ceará from different water sources using system dynamics. The state of Ceará is located in a semi-arid region of Brazil and, as a result, suffers from a constant shortage of water. Therefore, the water supply source for a green hydrogen hub in Ceará must be well planned, as it may not be sustainable in the long run. System dynamics is the approach used to achieve the objective of this thesis. Interviews, bibliographic research, and document analysis were used as data collection tools. The Causal Loop Diagram and the Stocks and Flows Diagram, typical tools of the approach, were used to achieve the overall objective. The main results show that reuse water is the most viable source of water supply, considering availability and waste management, and that the most important variable in the production of green hydrogen is the cooling technology of the green hydrogen production system. The paper argues that the preferred scenario of desalination may not be sustainable in the long term due to the discharge of brine into the sea, which causes disturbances in the marine biota, and that if the alternative scenario is selected, where the green hydrogen hub is supplied only with reuse water, there are possibilities to use the sludge as an input for other production processes.

Keywords: Green hydrogen; Water supply sources; Seawater desalination; Reuse water; System dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação completa da cadeia de valor do H2V.....	33
Figura 2	– Cadeia de produção de GNH_3	35
Figura 3	– Etapas de tratamento de efluentes.....	42
Figura 4	– Diferença de abordagem entre economia linear e economia circular (à direita).....	47
Figura 5	– Representação genérica de um SFD.....	53
Figura 6	– Localização do Ceará e região do semiárido brasileiro.....	62
Figura 7	– Regiões hidrográficas do estado do Ceará.....	63
Figura 8	– CLD do mapeamento de fontes hídricas para a produção de H2V no Ceará.....	77
Figura 9	– Fontes hídricas para abastecimento do <i>hub</i> de H2V e possíveis impactos socioecológicos compilados.....	79
Figura 10	– Modelo de SFD para a produção de H2V a partir de fontes não convencionais de água.....	81
Figura 11	– Setor 1 – produção de H2V.....	82
Figura 12	– Setor 2 – Dessalinização de água do mar por Osmose Reversa.....	84
Figura 13	– Setor 3 – Estação produtora de água de reúso.....	85
Figura 14	– Setor 4 - Economia do H2V.....	86
Figura 15	– Setor 5 - Exportação de GNH_3	87
Figura 16	– Setor 6 - Mar do Pecém (CE).....	88
Figura 17	– Setor 7 - Mercado de H2V na Europa.....	89
Figura 18	– Setor 8 - Oferta potencial de GNH_3 para mercado interno.....	90
Figura 19	– Evolução da capacidade instalada da dessalinização de água do mar e da EPAR por ano.....	92
Figura 20	– Vazão projetada de despejo de salmoura no mar cearense.....	92
Figura 21	– Vazão de salmoura despejada no mar do Ceará por ano.....	93
Figura 22	– Taxa de recuperação de água do mar por dessalinizadoras.....	94
Figura 23	– Emissões de CO_2 pelas plantas de dessalinização no estado do Ceará.....	95
Figura 24	– Emissões de CO_2 pelas EPAR no estado do Ceará.....	95
Figura 25	– Estoque de lodo em aterro sanitário e produção de lodo anual.....	96

Figura 26	– Outflow anual de água para cada uso no hub de H2V.	97
		97
Figura 27	– Quantidade produzida de H2V a partir dos valores do cenário preferência por dessalinização de água do mar.....	97
Figura 28	– Quantidade de GNH3 produzida anualmente no Ceará.....	98
Figura 29	– Histograma da probabilidade de produção de H2V para os 200 cenários em 2036.	100
Figura 30	– Intervalos de confiança da produção de H2V por ano.....	101
Figura 31	– Aumento da produção de H2V por ano versus despejo de salmoura no mar cearense por ano.....	102
Figura 32	– Histograma do despejo de salmoura no mar cearense por ano.....	103
Figura 33	– Histograma de emissões de CO2 pela planta de dessalinização de água do mar por ano.....	103
Figura 34	– Aumento da produção de H2V por ano versus produção de lodo para os 200 cenários.....	104
Figura 35	– Histograma de emissão de CO2 pela EPAR.....	105
Figura 36	– Produção de lodo anual no modelo abastecido apenas pela água de reúso.....	107
Figura 37	– SETS do Business-as-usual da cadeia de produção de H2V no Ceará.....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Classificação de produção de H ₂ e suas principais características.....	30
Quadro 2	– Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de eletrólise da água..	31
Quadro 3	– Fontes de água e tratamento necessário para uso na indústria de H ₂ V.....	33
Quadro 4	– Características gerais da salmoura do processo de osmose reversa.....	37
Quadro 5	– Tipos de tratamento para recuperação de água a partir de efluentes.....	41
Quadro 6	– Principais aplicações para a água de reúso e principais problemas.....	43
Quadro 7	– Princípios da economia circular alinhados ao setor hídrico	49
Quadro 8	– Interpretação de um CLD.....	52
Quadro 9	– Entrevistas do estudo.....	61
Quadro 10	– Amarração metodológica baseada em dinâmica de sistemas.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Parâmetros de pureza de água segundo ASTM.....	32
Tabela 2	– Valores de produção de H2V no Ceará segundo Memorandos e EIA/RIMA da Fortescue.....	71
Tabela 3	– Fontes hídricas e quantidade necessária de água para produção de H2V.....	71
Tabela 4	– Equações e parâmetros do setor 1.....	83
Tabela 5	– Equações e parâmetros do setor 2.....	84
Tabela 6	– Equações e parâmetros do setor 3.....	85
Tabela 7	– Equações e parâmetros do setor 4.....	86
Tabela 8	– Equações e parâmetros do setor 5	88
Tabela 9	– Equações e parâmetros do setor 6.....	89
Tabela 10	– Equações e parâmetros do setor 7	89
Tabela 11	– Equações e parâmetros do setor 8.....	90
Tabela 12	– Oscilação das variáveis-chave do sistema preferência por dessalinização de água do mar.....	99
Tabela 13	– Cenários com produção de H2V para o sistema com preferência por dessalinização de água do mar compatíveis com previsão pela Fortescue e memorandos de entendimento.....	99
Tabela 14	– Oscilação das variáveis-chave do sistema abastecido apenas com água de reúso.....	106
Tabela 15	– Cenários com produção de H2V para o sistema abastecido apenas com água de reúso compatíveis com previsão pela Fortescue e memorandos de entendimento.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
H ₂ O	Água
NH ₃	Amônia
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CIPP	Complexo industrial e portuário do Pecém
CH ₄	Metano
CDL	Diagrama de Retroalimentação Causal
CO ₂	Dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
EPAR	Estação Produtora de Água de Reúso
GEE	Gases de efeito estufa
GW	Gigawatt
H ₂	Gás hidrogênio
H ₂ V	Hidrogênio verde
Kg	Quilogramas
Kwh	Quilowatt-hora
L	Litro
m ³	Metros cúbicos
NaOH	Soda cáustica
NO ₂	Monóxido de dinitrogênio
O ₂	Gás oxigênio
PAERHCE	Plano de Ações Estratégicas dos Recursos Hídricos do Ceará
PGECE	Plano de Gestão Estratégica da Companhia de Água e Esgoto do Ceará
Seg.	Segundos
SFD	Diagrama de Estoques e Fluxos
SETS	Sistema Social-Ecológico-Tecnológico
SWRO	Dessalinização de Água do Mar por Osmose Reversa

Ton.	Toneladas
TSS	Sólidos Suspensos Totais.
USD	Dólares Americanos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Pergunta de pesquisa	21
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo geral.....	22
1.2.2 Objetivos específicos	22
1.3 Justificativa.....	22
1.4 Estrutura do trabalho	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1 Nexus Água-Energia, Transição energética e o hidrogênio verde	27
2.1.1 A cadeia produtiva de hidrogênio	30
2.1.2 A cadeia produtiva de amônia verde	34
2.2 Principais fontes não convencionais de água	36
2.2.1 Dessalinização de água do mar	36
2.2.2 O tratamento de efluentes sanitários e a produção de água de reúso	40
2.3 Economia circular, desenvolvimento sustentável na cadeia do recurso água.....	46
2.4 A abordagem de dinâmica de sistemas.....	51
2.4.1 Dinâmica de sistemas aplicada ao hidrogênio verde.....	55
2.5 Síntese sobre o referencial teórico	59
3 METODOLOGIA	61
3.1 Tipologia da pesquisa.....	61
3.2 Gestão dos recursos hídricos no Ceará, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém e o hidrogênio verde	61
3.3 Coleta de dados: instrumentos de coleta e métodos de análise	65
4 RESULTADOS - FASES DE APLICAÇÃO DA ABORDAGEM DE DINÂMICA DE SISTEMAS.....	70
4.1 Fase 1: identificação do problema e levantamento de dados para subsidiar as etapas posteriores	70
4.2 Fase 2: construção do modelo.	76
4.3 Fase 3: formulação do modelo.	79
4.3.1 Setores do modelo de SFD do estudo	82
4.4 Fase 4: análise e validação do modelo.	90
4.4.1 Análise do modelo de preferência por dessalinização de água do mar.....	91
4.4.2 Teste de sensibilidade de abastecimento hídrico com preferência por dessalinização de água do mar	99
4.4.3 Teste de sensibilidade de abastecimento hídrico exclusivo com água de reúso	105
4.5 Design de ações	108

5	DISCUSSÃO.....	110
6	CONCLUSÃO	115
7	REFERÊNCIAS.....	118
	APÊNDICE A – Roteiro de entrevista E1.....	135
	APÊNDICE B – ROTEIRO DE ENTREVISTA E2	137
	APÊNDICE C – ROTEIRO DE ENTREVISTA E3.....	138
	APÊNDICE D – ROTEIRO DE ENTREVISTA E4.....	139
	APÊNDICE E – ROTEIRO DE ENTREVISTA E5.....	140
	APÊNDICE F – ROTEIRO DE ENTREVISTA E6	142
	APÊNDICE G – ROTEIRO DE ENTREVISTA E7.....	143
	APÊNDICE H – ROTEIRO DE ENTREVISTA E8.....	144

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas referem-se a alterações significativas e persistentes nas condições atmosféricas e climáticas da Terra ao longo de um período. Essas mudanças podem afetar vários aspectos do sistema climático, incluindo temperatura, precipitação, ventos e padrões climáticos. Elas são identificadas a partir de testes estatístico, como a variabilidade de suas propriedades convencionais (IPCC, 2012). As mudanças climáticas ocasionam alterações na biosfera, como a mortalidade de árvores devido à seca, extinção de espécies endêmicas, mudança no ciclo hidrológico de regiões, acidificação dos oceanos e mortalidade de seres humanos devido às ondas de calor. As consequências das mudanças climáticas impactam diretamente no desenvolvimento social e econômico de regiões e barram o alcance das metas de desenvolvimento sustentável, principalmente os relacionados à segurança alimentar e hídrica (IPCC, 2022).

As mudanças climáticas são principalmente ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis, visto que estas fontes emitem gases de efeito estufa (GEE). Duas possíveis soluções para amenizar o agravamento da Mudanças climáticas são promover o uso eficiente de energia e viabilizar formas menos poluentes de geração e consumo de energia. Assim seria possível descarbonizar a economia e reduzir as emissões de GEE (Neofytou; Nikas; Doukas, 2020; York; Bell, 2019). A produção e o consumo de energia com menores emissões de poluentes estão associadas à transição energética, que pode ser definida como a mudança de uma fonte primária de combustível e da tecnologia associada à sua produção (Fouquet; Pearson, 2012; Hirsh; Jones, 2014). A transição energética planejada visa a mudança da matriz energética baseada no petróleo, carvão mineral e gás natural, para uma matriz baseada em fontes renováveis (Matthes, 2017).

Nesse contexto, a produção de hidrogênio (H_2) por meio da eletrólise da água (H_2O) a partir de matrizes energéticas renováveis, o chamado hidrogênio verde (H_2V), emerge como uma possível solução para este problema, sendo considerado um acelerador da transição energética (Abad; Dodds, 2020; Ginsberg, 2022). Isso porque o H_2V é considerado um vetor de energia limpa, confiável e potencialmente sustentável, ou seja, um promotor do desenvolvimento social e industrial (Falcone; Hiete; Sapio, 2021). Contudo, diversos aspectos precisam ser mais bem compreendidos na cadeia de valor do H_2V , como é o caso de aspectos relativos à fonte hídricas de abastecimento das plantas de H_2V , principalmente no que tange à disponibilidade de água e aos possíveis impactos ambientais e sociais (Shi, Liao; Li, 2020).

É importante endereçar preocupações a respeito da fonte de abastecimento hídrico das plantas de H₂V, pois a depender da região em que seja instalada, isso possa se tornar um entrave ao desenvolvimento sustentável. Por exemplo, em regiões áridas como o Mediterrâneo e o Nordeste brasileiro há um vasto potencial para a instalação de painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas (Ceará, 2019; União Europeia, 2020), principais fontes de eletricidade para a produção do H₂V, contudo, estas regiões sofrem historicamente de escassez hídrica (Woods; Bustamante; Aguey-Zinsou, 2022). Além disso, os efeitos das mudanças climáticas podem implicar no desequilíbrio da disponibilidade de recursos hídricos nessas regiões (Alves *et al.*, 2020; Teotónio *et al.*, 2020). Por isso, o papel da água na indústria de H₂V necessita ser mais bem compreendido, pois pode vir a ser um grande problema caso não seja realizado um planejamento adequado de suas fontes de abastecimento, visto que estresse hídrico e competição por água são consequências possíveis da falta de planejamento (Woods; Bustamante; Aguey-Zinsou, 2022).

Portanto, é importante considerar a interrelação entre água e energia, conhecido como o *nexus* água-energia. A interrelação entre os recursos ocorre da seguinte maneira: no caso do sistema hídrico, recursos energéticos são essenciais nas etapas de tratamento, distribuição e consumo de água, enquanto para o sistema energético, recursos hídricos são essenciais para a produção, a conversão e a utilização de energia (Liang; Huang; Ding, 2020). Exemplos dessa interrelação podem ser vistas no Brasil, no contexto das hidrelétricas, que representaram 56,8% da oferta interna de energia elétrica no Brasil no ano de 2022 (Empresa De Pesquisa Energética, 2022).

A consciência da interrelação entre estes dois recursos está aumentando devido às crises hídricas e energéticas (Ding *et al.*, 2020). Na indústria de H₂V esse relacionamento é ainda mais evidente, pois é necessário água para gerar energia por meio do processo de eletrólise (Beswick *et al.*, 2021), mas também será necessário fornecer energia elétrica para plantas de tratamento de efluentes e de dessalinização de água do mar para produzir água com requisitos de pureza adequados para o processo de eletrólise (Simões *et al.*, 2021). Essas alternativas estão sendo estudadas, pois a utilização de água bruta¹, seguindo a lógica de economia linear (extração, utilização e despejo) não é considerada uma opção suficiente para suprir a demanda de água de H₂V (Zyl; Jooste, 2022).

¹ “Água de uma fonte de abastecimento, como rio, lago, reservatório ou aquífero, antes de receber qualquer tratamento, sendo o mesmo que água “in natura”, podendo ser destinada a múltiplos usos” (CEARÁ, 2016, p.1).

O estudo de Simões *et al.* (2021) modelaram 9 tipos de fontes hídricas para o abastecimento de uma planta de H2V em Portugal, sendo elas: (1) água do mar, (2) água de estuários, (3) águas superficiais, (4) água subterrânea, (5) água pluvial, (6) água da rede pública, (7) água de esgoto urbano, (8) água de esgoto industrial e (9) água do resfriamento de torres. Apesar de haver várias opções, os resultados deste estudo aponta que as fontes hídricas mais viáveis para abastecimento de um planta de H2V em Portugal são a dessalinização de água do mar e a água de reúso² produzida por meio de tratamento de efluentes sanitários urbanos quando considera-se os seguintes fatores: disponibilidade de água, qualidade da água, opções de transporte, custos de extração, necessidade de tratamento da água e regulamentação e a aceitação social (Simões *et al.*, 2021).

O resultado de Simões *et al.* (2021) quanto à dessalinização de água do mar são corroborados por outros estudos, como o de Cavaliere; Perrone; Silvello *et al.* (2021), que estuda a eficiência da produção de H2V para aplicação na produção de aço considerando a dessalinização de água do mar como fonte de abastecimento. O estudo conclui que devido aos avanços de eficiência energética do processo de dessalinização de água do mar, é possível utilizar essa tecnologia no processo produtivo de H2V (Cavaliere; Perrone; Silvello *et al.*, 2021). Outro estudo que modelou uma planta de H2V alimentada por painéis fotovoltaicos e abastecida por uma planta de dessalinização de água do mar conclui que é possível produzir H2V a um preço aproximado de 2 dólares americanos (USD) por quilograma (Kg), considerando os preços de eletricidade por hora cobrados nos Estados da Califórnia e Texas, ambos localizados nos Estados Unidos da América em 2020 (Ginsberg *et al.*, 2022).

Contudo, o processo de dessalinização de água do mar possui impactos socioecológicos severos devido ao lançamento da salmoura no mar, principal subproduto desse processo (Darre; Toor, 2018; Jones *et al.*, 2019). Estima-se uma produção mundial de salmoura seja de 142 milhões de m³/dia (Jones *et al.*, 2019). Outro impacto socioecológico de uma planta de dessalinização de água do mar é o aumento de emissão de GEE devido ao alto consumo de eletricidade, portanto, um efeito indireto do processo (Darre; Toor, 2018; Elsaïod *et al.*, 2020; Pinto; Marques, 2020).

Um outro estudo corrobora com Simões *et al.* (2021), mas dessa vez quanto a utilização de água de reúso no processo de produção de H2V. Essa proposição é feita por Woods,

² “Reúso para fins industriais: utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais” (CEARÁ, 2016, p.1).

Bustamante e Aguey-Zinsou (2022), que apontam o tratamento terciário de efluentes urbanos como a tecnologia mais adequada para abastecer uma planta de produção de H₂V na Austrália em detrimento da utilização de dessalinização de água do mar. Os autores afirmam que utilizando plantas de tratamento de efluentes em Sydney é possível produzir 420.000 toneladas (ton.) de H₂V por dia até 2030 a um preço de custo que varia entre 4 dólares americanos (USD) e 6 USD por Kg de H₂V ou a 3 USD por Kg de H₂V caso considere-se a venda de gás oxigênio (O₂) como subproduto da produção de H₂V. Além do benefício econômico, isso implicaria numa redução da pegada hídrica da indústria de H₂V e em menores impactos socioecológicos, visto que o subproduto da produção de água por meio da dessalinização de água do mar impacta severamente o ambiente aquático (Woods; Bustamante; Aguey-Zinsou, 2022).

Contudo, o tratamento terciário de efluentes urbanos também apresenta subprodutos, como o lodo, gerado ao longo das etapas de tratamento de efluentes, e a liberação direta de dióxido de carbono (CO₂), de metano (CH₄) e monóxido de dinitrogênio ou óxido nitroso (N₂O), gases de efeito estufa (Zhang *et al.*, 2019). Na China, foram produzidos cerca de 39 milhões de ton. de lodo até 2019 (Wei *et al.*, 2020) e estima-se que serão liberados em torno de 0,56 e 0,71 gigatoneladas de CO₂ anualmente na atmosfera entre os anos de 2005 e 2030 pela indústria de tratamento de efluentes global (Lu *et al.*, 2018).

A crescente atenção às mudanças climáticas e seus impactos interligados na água e na energia destaca a urgência de soluções sustentáveis e inovadoras. O H₂V, derivado de fontes renováveis, emerge como uma solução promissora nesse cenário. No entanto, sua produção traz desafios, principalmente em relação ao fornecimento hídrico, exigindo considerações cuidadosas sobre as fontes de água utilizadas. A dessalinização e o reúso de água tratada surgem como alternativas viáveis, mas ambas apresentam impactos socioecológicos que precisam ser minuciosamente avaliados. O equilíbrio entre a busca por energia limpa e a gestão sustentável dos recursos hídricos é fundamental. Consequentemente, um planejamento holístico, que considere tanto os avanços tecnológicos quanto as implicações ambientais e sociais, é crucial para garantir que as ações adotadas sejam soluções a curto prazo e novos desafios em longo prazo.

1.1 Pergunta de pesquisa

A partir do contexto dinâmico, complexo e relevante, o presente trabalho busca responder a seguinte pergunta de pesquisa: quais as potenciais fontes de abastecimento hídrico

para um *hub* de hidrogênio verde no Ceará?

1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a produção de hidrogênio verde no Ceará a partir de diferentes fontes hídricas por meio de dinâmica de sistemas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) identificar as possíveis fontes de água para abastecimento do hub de H₂V no Ceará;
- b) montar um diagrama de retroalimentação causal que demonstre as relações entre as variáveis presentes no sistema de abastecimento hídrico de um *hub* de H₂V no Ceará;
- c) formular um modelo matemático de estoques e fluxos que represente a produção de hidrogênio verde por meio de diferentes fontes hídricas de abastecimento no Ceará;
- d) propor a fonte de abastecimento hídrico mais viável para o abastecimento do *hub* de H₂V no Ceará.

1.3 Justificativa

Um *hub* de H₂V está em processo de instalação no estado do CE, localizado na região Nordeste do Brasil. Esta indústria nascente merece atenção e esforços de estudos no estado do CE, pois há condições favoráveis e desfavoráveis para a instalação do *hub*. Como principais pontos positivos, há uma rede de produção de eletricidade por meio de fontes renováveis bem estabelecidas (Empresa De Pesquisa Energética, 2021, 2022), um vasto potencial para aumentar a produção desse tipo de geração de eletricidade (Ceará, 2019) e a

operação de um complexo industrial e portuário (COMPLEXO DO PECÉM, 2022d). Como principal ponto negativo, a escassez hídrica histórica do estado do CE emerge como um ponto de atenção (Souza Filho, 2018).

Sobre a produção de energia elétrica no estado do CE, pontua-se que nos anos de 2020 e 2021, mais de 50% da energia elétrica total produzida no CE derivou de parques eólicos e fotovoltaicos (Empresa De Pesquisa Energética, 2021, 2022), cuja capacidade instalada no ano de 2021 representa 58% do total da capacidade de geração de energia elétrica no Estado (Empresa De Pesquisa Energética, 2022). Essa produção é consequência de uma rede de negócios capaz de lidar com as tensões inerentes do processo de TE por meio da construção de confiança entre os atores da rede, interesses em comum e aprendizagem social (Freitas, 2021). Se todo o potencial de produção de energia elétrica no CE por meio de parques eólicos *onshore* e *offshore* e parques fotovoltaicos fosse aproveitado, seria possível produzir cerca de 1.363,2 Terawatt-hora por ano (Ceará, 2019).

Além disso, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), onde o *hub* de H2V será instalado, ocupa uma área de 19 mil hectares e é dividido em três partes, sendo elas a Área Industrial, o Porto do Pecém, um terminal *offshore* de classe mundial, e a zona de processamento e exportação ZPE Ceará, a primeira a operar no Brasil. As três partes do CIPP permitem uma robustez de operação no complexo e fazem com que surja um ambiente propício para a instalação das plantas de H2V, considerando-se como principais fatores: (1) infraestrutura própria e capacidade de ampliação portuária, (2) rede elétrica robusta com infraestrutura necessária para o processo de eletrólise, (3) rede de distribuição de gás bem estabelecida ao longo de todo o complexo e que pode ser utilizada para transporte do H2V, (4) a ZPE, que permite condições fiscais favoráveis para negócios, e possui empresas que podem servir de mercado consumidor de hidrogênio, como empresa de aço, fertilizante, cimento e mineração (Complexo Do Pecém, 2022d), (5) proximidade com Fortaleza, capital do CE, e (6) possibilidade de novas conexões ferroviárias (Complexo Do Pecém, 2022e). Além disso, o CIPP possui uma vantagem competitiva em relação a outros portos do Brasil, pois localiza-se próximo dos Estados Unidos da América, Europa e norte da África (Complexo Do Pecém, 2022d).

Embora haja fatores favoráveis para a instalação do *hub* de H2V, é necessário abordar esta oportunidade com precaução, pois a indústria de H2V é intensiva no uso de água, visto que, quando se utiliza eletrólise, seus dois principais insumos são água e eletricidade (Beswick *et al.*, 2021). Esta cautela justifica-se pelo fato de o estado do CE sofrer de escassez

hídrica (Souza Filho, 2018), conforme pontuam Woods, Bustamante e Aguey-Zinsou (2022) ao afirmar que regiões com vasto potencial produtivo de eletricidade eólica e solar sofrem de problemas com falta de água. Como prova disso, recentemente, entre os anos de 2012 e 2016, o CE vivenciou uma seca prolongada, que evidenciou a necessidade de uma melhor gestão hídrica estadual em casos de secas severas, aplicando práticas como a otimização da operacionalização dos reservatórios, a diversificação das fontes hídricas alternativas de abastecimento e a promoção do uso racional de água (CEARÁ, 2018). Historicamente, é possível citar as secas de 1877 e 1878, de 1887 a 1890, de 1915, de 1919, de 1932, de 1958, de 1970, de 1981 a 1983 e de 1998, que culminaram em colapsos na produção econômica, nos sistemas urbanos e no sistema de saúde e ocasionaram migrações e grande sofrimento para as populações do Estado (Souza Filho, 2018).

Ainda sobre o caso da água no CE, no estudo setorial especial sobre recursos hídricos realizado para embasar o planejamento estratégico de longo prazo do Governo do Ceará, a plataforma Ceará 2050, Souza Filho (2018) aponta ameaças aos recursos hídricos cearenses, como o aumento das incertezas na oferta hídrica devido às mudanças do clima; empresas intensivas no uso da água mais vulneráveis devido à secas mais prolongadas; processo de urbanização que requer gestão de água em ambiente urbano, maior eficiência de águas locais e serviços de água e esgoto; e ampliação dos conflitos sociais relativos à água em função do agravamento da escassez. Estas ameaças podem minar a segurança hídrica do Estado (Souza Filho, 2018). A segurança hídrica pode ser definida como o uso da água para aumentar o bem-estar econômico, aumentar a equidade social, avançar em direção à sustentabilidade em longo prazo ou reduzir os riscos relacionados à água (Hokstra; Buurman; Ginkel, 2018).

Portanto, para que a indústria de H2V possa ser implantada em um Estado que não possui abundância de água, é necessário considerar possíveis soluções para a evitar a escassez hídrica e para garantir a segurança hídrica, como a utilização de água de reúso e a dessalinização de água do mar (Cavaliere; Perrone; Silvello et al., 2021; Woods; Bustamante; Aguey-Zinsou, 2022; Xie *et al.*, 2022). Por isso, realizar modelagens e simulações técnicas ou econômicas de projetos antes de sua implantação pode evitar custos adicionais e permitir a sua análise por diferentes pontos de vista (Abbasi *et al.*, 2021). Além disso, em sistemas complexos, como as cadeias de suprimento de água, é possível observar uma dinâmica de *feedbacks*, de interdependências e de relações descontínuas e não lineares entre os elementos do sistema (Sahin; Stewart; Helfer, 2015).

Portanto, a metodologia de dinâmica de sistemas (DS) é adequada para o estudo

dos possíveis cenários relativos a uma cadeia hídrica, pois a DS é uma abordagem pautada no dinamismo e desequilíbrio da realidade, aplicável na modelagem de sistemas dotados de complexidade e capaz de capturar o comportamento humano e as tomadas de decisão em um nível micro (Radzicki, 2009). As vantagens de aplicar a DS residem na possibilidade de simular o comportamento de um sistema a fim de que seja possível desenvolver diretrizes, em aprender a gerir o sistema em questão com eficiência (Bala; Arshad; Noh, 2017), na integração entre diversas áreas do conhecimento e na aplicação do diagrama de estoques e fluxos de forma quantitativa, a fim de gerar projeções a respeito do comportamento do sistema ao longo do tempo (Duggan, 2016).

Esses aspectos da DS podem ser observados no trabalho de Insuasty-Reina, Osorio-Gómez e Manotas-Duque (2022), que modelaram um sistema para analisar as emissões de CO₂ geradas a partir da inserção da produção de hidrogênio por meio de gaseificação de carvão mineral na matriz energética colombiana. A partir da aplicação da DS, foi possível simular cenários e compará-los quanto ao uso do carvão como fonte de energia para a produção de hidrogênio na Colômbia e ao nível de poluentes emitidos na atmosfera em cada um dos cenários estabelecidos (Insuasty-Reina; Osorio-Gómez; Manotas-Duque, 2022).

Por fim, este estudo possui a justificativa acadêmica de contribuir com os estudos sobre o *nexus* água-energia por meio da dinâmica de sistemas em um estado brasileiro onde mais da metade de sua energia é gerada por meio de fontes renováveis, e que está investindo recursos para o estabelecimento de um *hub* de H2V, mas sofre de escassez hídrica. Quanto a justificativa gerencial, espera-se que este trabalho contribua munindo tomadores de decisão do planejamento estratégico do *hub* de H2V no Ceará com informações sobre a produção de H2V a partir de fontes não convencionais e suportar o processo de regulamentação do H2V. Por último, como justificativa social, o presente trabalho pretende ser uma ferramenta útil de simulação de cenários e proposição de diretrizes que permitam a melhoria da qualidade de vida da população cearense a partir do estudo das fontes não convencionais de água para a viabilização da produção de H2V no Ceará.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho é composto pela introdução, que salienta a importância de investigar as fontes de abastecimento hídrico para um *hub* de H2V em território semiárido, apresenta a pergunta de pesquisa, objetivos gerais e específicos e justifica a importância de estudar as fontes de abastecimento hídrico para um *hub* de H2V no Ceará. O referencial teórico expõe a teoria

sobre o *nexus* água-energia, importante para entender a interrelação entre esses dois recursos e descreve as cadeias de produção do H2V e da amônia verde; apresenta as principais fontes de água não convencionais cotadas para abastecimento de *hubs* de H2V; e explica os aspectos teóricos mais importantes para entendimento da abordagem dinâmica de sistemas.

A metodologia caracteriza a pesquisa realizada, expõe as etapas e as ferramentas utilizadas para responder à pergunta de pesquisa e cumprir os objetivos geral e específicos. A seção Análise dos resultados apresentam o resultado das entrevistas, o Diagrama de retroalimentação causal e o diagrama de estoque e fluxo, duas das principais ferramentas da abordagem dinâmica de sistemas. A partir do diagrama de estoque e fluxo é possível simular cenários para a preferência por dessalinização de água do mar e simular cenários que permitem a produção de H2V na quantidade pretendida pelo Governo do Estado do Ceará e pelas empresas. A seção de Discussão avança na teoria exposta no referencial teórico no que tange aos possíveis cenários e consequências ocasionadas pelas escolhas de fontes de abastecimento hídrico do *hub* de H2V. Por fim, a conclusão resume os principais achados da pesquisa, aponta a importância da abordagem dinâmica de sistemas para estudar sistemas complexos, reconhece as limitações desta pesquisa e sugere estudos futuros para endereçar as lacunas encontradas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico desta investigação é construído sobre a intrincada relação entre os recursos hídricos e energéticos, explorando o Nexus Água-Energia e sua importância em ascensão no cenário acadêmico e na gestão eficiente de recursos naturais, conforme destacado por Fortes et al. (2022). A interconexão entre água e energia é crucial para assegurar acesso confiável e sustentável a ambos os recursos, uma temática que tem sido alvo de crescente atenção em estudos contemporâneos, como evidenciado por Fortes et al. (2019). O Ceará, com suas particularidades e desafios, é analisado quanto à viabilidade da produção de H2V considerando o seu abastecimento hídrico, um vetor energético inovador que se alinha com o paradigma da transição energética. A metodologia da abordagem dinâmica de sistemas é apresentada como uma ferramenta adequada para elucidar as complexas interações entre desenvolvimento sustentável, economia circular e o recurso água. Dessa forma, este arcabouço teórico serve como alicerce para a investigação proposta, integrando conceitos fundamentais que orientam a análise das potenciais fontes de água para a produção de H2V no Ceará.

2.1 Nexus Água-Energia, Transição energética e o hidrogênio verde

O *Nexus* Água-Energia tornou-se um tema relevante para acadêmicos e gestores na última década. Entre 2010 e 2019, 1.181 artigos foram publicados sobre o tema (Ding *et al.*, 2020). O interesse no *Nexus* Água-Energia ocorre pelo aumento na preocupação da garantia de acesso confiável à água e à energia limpa, portanto, os estudos no campo buscam entender e gerenciar a relação entre a aplicação do recurso água para produção de energia e entre a aplicação de energia para a produção de água (Fontenelle *et al.*, 2022). Isso é considerado um dos maiores desafios para os próximos anos (Teotônio *et al.*, 2020). As principais perturbações no *Nexus* Água-Energia são devido ao processo de urbanização (Wang; Kou; Zhal, 2022), mudanças climáticas (Teotônio *et al.*, 2020; Hamiche, Stambouli; Flazi, 2016), o aumento da demanda global por estes recursos (Rao *et al.*, 2017), crescimento populacional e desenvolvimento tecnológico (Wu *et al.*, 2020).

Essa dinâmica pode ser observada no sistema elétrico brasileiro, que esteve vulnerável devido às secas prolongadas entre os anos de 2010 e de 2020. Essas secas culminaram em escassez de água para a população e para o sistema energético, sendo necessário acionar termoeletricas para evitar um colapso nos sistemas hídrico e energético brasileiro e assim mitigar as consequências da falta de água no sistema energético. Os sistemas hídrico e

elétrico brasileiro estão paulatinamente tornando-se cada vez mais vulneráveis, especialmente devido às Mudanças climáticas (Semertzidis; Spataru; Bleischwitz, 2018).

Outra preocupação endereçada quanto ao *Nexus* Água-Energia é a escassez de água, que pode ocasionar conflitos entre os setores produtivos de um país (Teotónio *et al.*, 2020). Por exemplo, Teotónio *et al.* (2020) projetaram os impactos econômicos dos efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade de água para uso em setores industriais de Portugal. Considerando o cenário de mudanças climáticas severas e a competição entre setores de energia hidrelétrica, outras indústrias intensivas no uso de água (agricultura, pesca, distribuição e suprimento de água, indústria de alimentos e bebidas e indústria de papel) e indústrias menos intensivas no uso de água (indústria de produtos não minerais, equipamentos elétricos, maquinários e equipamentos), se inferiu que haverá uma redução de 3,2% no Produto Interno Bruto (PIB) em Portugal e que os setores das indústrias intensivas no uso de água terão seus lucros e níveis de produção reduzidos, enquanto que o impacto nas indústrias menos intensivas no uso de água será relativo ao aumento dos custos de eletricidade, sendo a indústria de papel a principal afetada (Teotónio *et al.*, 2020).

Outro estudo entre setores da economia de Portugal foi conduzido por Fortes *et al.* (2022), especificamente sobre os efeitos da competição por recursos hídricos entre os setores de agricultura e de energia hidrelétrica em Portugal a partir da redução de disponibilidade hídrica devido aos impactos das mudanças climáticas. O trabalho mostrou que até 2050, as mudanças climáticas podem implicar num aumento de 12% da necessidade de água para irrigação na bacia do rio Tejo e de 19% para a bacia do rio Douro. As mudanças climáticas também impactarão negativamente no setor de hidrelétricas, pois espera-se que haja uma menor geração de energia, algo entre 26% e 56% a menos em relação ao histórico observado, principalmente no verão e na primavera. Portanto, os autores sugerem que para evitar efeitos indesejados das mudanças climáticas sobre os setores da agricultura e energia, é crucial aumentar a produção de energia por meio de painéis fotovoltaicos e o armazenamento da energia gerada em baterias, além de realizar acordos adequados para a gestão de águas entre fronteiras e reduzir as perdas de água nos sistemas de irrigação (Fortes *et al.*, 2022).

Desse modo, observa-se que a transição energética para um sistema de energia renovável pode ser uma oportunidade para resolver algumas perturbações no *Nexus* Água-Energia (Lohrmann; Child; Breyer, 2021). Transição energética é um conceito com impactos profundos na sociedade, pois envolve competições por poder e mudanças socioculturais nas instituições, rotinas e crenças das comunidades (Loorbach; Frantzeskaki; Avelino, 2017). A TE deve ser marcada não apenas pela expansão da infraestrutura de uma fonte de energia renovável

na matriz energética, mas sim pelo declínio na utilização de combustíveis fósseis para geração de eletricidade e pelo aumento compensatório da geração de eletricidade por meio de fontes renováveis (York; Bell, 2019).

Portanto, o processo de transição energética é extremamente complexo, pois influencia e é influenciado por (1) aspectos socioeconômicos, no que tange à redução da pobreza e da desigualdade, ao crescimento econômico e geração de empregos; (2) aspectos de segurança energética territorial e ao câmbio mundial de energia; (3) aspectos ambientais, como mitigação das mudanças climáticas; (4) aspectos geopolíticos (Hecher *et al.*, 2016; Miller; Richter; O’leary, 2015; Sievers *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2019); e (5) avanços tecnológicos (Cantarero, 2020). Em vista disso, é importante equilibrar o desenvolvimento econômico, o acesso universal e confiável à energia e a sustentabilidade ambiental (SINGH *et al.*, 2019), pois o desequilíbrio entre essas dimensões desencadeia em prejuízos socioeconômicos (Mamidi; Marisetty; Thomas, 2021).

Isso posto, é importante buscar uma economia mais limpa em detrimento da economia baseada em combustíveis fósseis (Dawood; Anda; Shafiullah, 2020). Desse modo, o H₂ produzido a partir de energias renováveis, o H₂V, surge como um vetor energético³ tecnicamente viável tanto para aplicações em pequena escala de suprimento de energia quanto para aplicações de exportação de quantidades massivas de energia em forma química (Abdin *et al.*, 2020). É importante salientar que uso de H₂ não é algo recente, visto que sua utilização ocorre há 200 anos (Imasiku *et al.*, 2021), sendo aplicado principalmente como um intermediário em processos químicos. As principais aplicações do H₂ são para o refino de petróleo bruto e para a fabricação de amônia e ureia (Abdin *et al.*, 2020).

No futuro, com o avanço da produção de H₂V em escala, espera-se que o H₂ seja adotado pelas indústrias de fabricação de ferro e de aço, pelas indústrias químicas, pelo setor de transportes, pelas redes de gás (Abdin *et al.*, 2020), pelo setor de fabricação de semicondutores e de produção de metais especiais. A adoção massiva do H₂V nesses esses setores tem o objetivo de descarbonizar essas indústrias, que são intensivas em emissão de CO₂ (Cavaliere; Perrone; Silvello, 2021). Por esses motivos, o interesse atual da academia, de políticos e de empresários pelo H₂V é pautado nas recentes inovações no seu processo produtivo, principalmente relativos ao ganho de produção em escala, e no aumento de

³ Vetor de energia é “uma substância rica em energia que facilita a translocação e/ou armazenamento de energia [...] com a intenção de utilizá-la a uma distância no tempo e/ou espaço do local de produção primária” (ABDIN *et al.*, 2020, p. 2).

possibilidades de fontes primárias de eletricidade para início do processo produtivo (Al-Sharafi *et al.*, 2017; Noussan *et al.*, 2021).

2.1.1 A cadeia produtiva de hidrogênio

A obtenção de H_2 pode ocorrer a partir da reforma a vapor utilizando gás natural, petróleo ou carvão, de processos biológicos, como a fermentação de biomassa, da gaseificação do carvão e da eletrólise da água, apesar de esse último ser o processo menos viável historicamente devido sua alta demanda energética (Abdin *et al.*, 2020). A principal vantagem da produção de H_2 a partir da eletrólise da água é que não há de emissão de GEE durante o processo produtivo propriamente dito, pois utiliza-se energia elétrica proveniente de fontes renováveis para a separação da molécula de água (Ball; Weeda, 2015). A utilização de fontes de energia renováveis no processo, como a solar e a eólica, é estimulado devido à redução dos custos de geração de eletricidade por meio dessas fontes, tornando, portanto, a produção de H_2 viável (Abdin *et al.*, 2020).

O H_2 pode ser classificado a partir de cores que designam a fonte primária de energia utilizada em seu processo produtivo. Por exemplo, o hidrogênio cinza é produzido a partir de combustível fóssil e, conseqüentemente, há grande liberação de CO_2 na atmosfera, o hidrogênio azul, é caracterizado pela captura do dióxido de carbono produzido, e verde, em que as fontes energéticas primárias são fontes de energia renovável, como solar, eólica ou biomassa (Abad; Dodds, 2020; Noussan *et al.*, 2021; Tholen *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2022). O quadro 1 resume os tipos de classificação de produção de H_2 e suas principais características.

Quadro 1- Classificação de produção de H_2 e suas principais características.

Classificação	Tecnologia	Fonte	Produto	Custo (\$/kg de H_2)	Nível de emissão de CO_2
Hidrogênio marrom	Gaseificação	Carvão marrom (lignita)	$H_2 + CO_2$	1,2 – 2,1	Alta
Hidrogênio preto	Gaseificação	Carvão preto (Betuminoso)	$H_2 + CO_2$	1,2 – 2,1	Alta
Hidrogênio cinza	Reforma	Gás natural	$H_2 + CO_2$	1 – 2,1	Média
Hidrogênio azul	Gaseificação + captura de carbono	Gás natural	$H_2 + CO_2$ (85% - 95% capturado)	1,5 – 2,9	Baixa
Hidrogênio verde	Eletrólise	Água	$H_2 + O_2$	3,6 – 5,8	Mínima

Fonte: adaptado de Kumar e Lim (2022).

Quanto ao processo produtivo propriamente dito, no caso do hidrogênio cinza,

espera-se que seu custo de produção cresça devido à incidência de impostos relativos à emissão de carbono e ao desencorajamento da utilização de fontes fósseis de energia para isso (Zhou *et al.*, 2022). Quando à produção de H₂V, espera-se que se torne mais acessível financeiramente a cada ano devido aos avanços do processo de aprendizagem tecnológico e industrial em relação a melhorias nas diversas etapas da cadeia de valor do hidrogênio (Ball; Weeda, 2015; Zhou *et al.*, 2022). A equação estequiométrica⁴ da eletrólise da água (Kumar; Lim, 2022) e os quatro tipos de tecnologias disponíveis para a eletrólise da água estão dispostos no quadro 2.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens das principais tecnologias de eletrólise da água.

Equação estequiométrica da eletrólise da água		
$1H_2O + \text{eletricidade } (237,2 \text{ kJ mol}^{-1}) + \text{calor } (48,6 \text{ kJ mol}^{-1}) \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$ (1)		
Tecnologia	Vantagem	Desvantagem
Eletrólise alcalina da água	• Tecnologia bem estabelecida; • Comercializada para aplicações industriais; • Não necessita de metais nobres em seus catalisadores; • Baixo custo relativo.	• Densidades de corrente limitadas • Cruzamento dos gases; • Eletrólito líquido altamente concentrado.
Membrana de troca aniônica	• Não necessita de metais nobres em seus catalisadores; • Eletrólito líquido de baixa concentração.	• Estabilidade limitada; • Em desenvolvimento.
Membrana de troca de prótons	• Tecnologia comercializada; • Opera densidades de corrente mais altas; • Alta pureza dos gases; • Projeto de sistema compacto; • Resposta rápida.	• Custo dos componentes da célula; • Eletrocatalisadores de metais nobres; • Eletrólito ácido.
Eletrólise de água de óxido sólido	• Alta temperatura de trabalho; • Alta eficiência.	• Estabilidade limitada; • Em desenvolvimento.

Fonte: Kumar e Lim (2022).

Tecnologias de eletrolisadores de água em baixas temperatura, como o PEM, AWE e o AEM, necessitam de um nível alto de pureza na água. Esse fato adiciona custos e complexidades ao processo; e limitações de projeto. Caso esses requerimentos não sejam cumpridos, nota-se um desgaste de materiais e dos componentes do eletrolisador (Becker *et al.*, 2023). A fim de cumprir esses requisitos, é possível condicionar a água segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM), que provê padrões para água reagente, de acordo

⁴ Estequiometria é o cálculo da quantidade das substâncias envolvidas numa reação química.

com a designação D1193-06/2018 (Astm International, 2018). Os tipos de água segundo os padrões da ASTM estão expostos na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de pureza de água segundo ASTM.

Tipo	Grau	$\mu\text{S/cm}$ (máx.) ^E	$\text{M}\Omega$ cm (mín.) ^F	pH ^G	Carbono Orgânico Total (TOC) $\mu\text{g/L}$ (máx.)	Sódio $\mu\text{g/L}$ (máx.)	Cloreto $\mu\text{g/L}$ (máx.)	Sílica total $\mu\text{g/L}$ (máx.)	Contagem de bactérias heterotróficas ^K	Endotoxina em unidades de endotoxina por mL^{L}
I		0,0555	18	-	50	1	1	3		
	A	0,0555	18	-	50	1	1	3	10/1000	0,03
	B	0,0555	18	-	50	1	1	3	10/100	0,25
	C	0,0555	18	-	50	1	1	3	100/10	-
II		1	1	-	50	5	5	3		-
	A	1	1	-	50	5	5	3	10/1000	0,03
	B	1	1	-	50	5	5	3	10/100	0,25
	C	1	1	-	50	5	5	3	100/10	-
III		0,25	4	-	200	10	10	500		-
	A	0,25	4	-	200	10	10	500	10/1000	0,03
	B	0,25	4	-	200	10	10	500	10/100	0,25
	C	0,25	4	-	200	10	10	500	1000/100	-
IV		5	0,2	5 a 8	-	50	50	-	-	-
	A	5	0,2	5 a 8	-	50	50	-	10/1000	0,03
	B	5	0,2	5 a 8	-	50	50	-	10/100	0,25
	C	5	0,2	5 a 8	-	50	50	-	100/10	-

Fonte: adaptado de Astm International (2018).

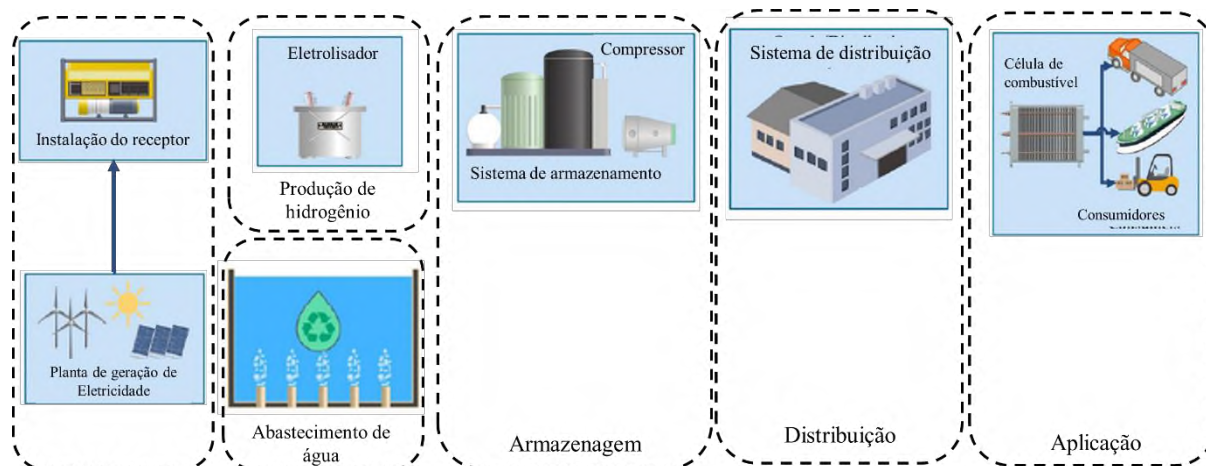
Nota: E – condutividade elétrica a 25 °C; F – resistividade elétrica a 25 °C; G - pH a 25 °C, não aplicável a água de alta resistividade.

Em geral, grupos de pesquisa sobre H2V utilizam água do tipo I segundo a norma D1193-06/2018 da ASTM International (Becker *et al.*, 2023) ou da água tipo 2, segundo a norma da International Organization for Standardization 3696/1987, em relatório do Joint Research Centre da Comissão Europeia de Ciência e Serviços de Conhecimento (Tsotridis; Pilenga, 2021), cuja condutividade é menor ou igual a 1 $\mu\text{S/cm}$. É na garantia dessa qualidade de água ultrapura que reside o principal desafio para a produção de H2V em relação ao insumo água (Becker *et al.*, 2023).

Para que a produção de H2V se torne viável, uma série de desafios devem ser sobrepujados, como avanços tecnológicos no processo produtivo, altos custos de transporte por gasodutos ou navios devido à baixa densidade do H₂ (Falcone; Hiete; Sapio, 2021), barreiras de regulamentação e também no estabelecimento das fontes de água adequadas para satisfazer o processo produtivo da indústria a fim de atender a demanda mundial por H2V (Beswick *et al.*, 2021; Shi; Liao; Li, 2020; Woods; Bustamante; Aguey-Zinsou, 2022). Este último, principalmente, vem sendo negligenciado, no entanto, entender os possíveis impactos negativos

da indústria de H2V para o ecossistema e para a disponibilidade de água local é imprescindível (Noussan *et al.*, 2021). A figura 1 representa a cadeia de H2V completa e aponta a inserção da água no processo produtivo na segunda camada.

Figura 1 - Representação completa da cadeia de valor do H2V.



Fonte: (Macia *et al.*, 2021).

Portanto, para que o H2V seja sustentável é necessário endereçar preocupações a respeito do uso da água no seu processo produtivo e dos impactos, principalmente ambientais, que a escolha da fonte hídrica que alimentará a indústria de H2V terá (Shi; Liao; Li, 2020). Simões *et al.* (2021) identifica nove fontes hídricas com potencial para servir à indústria de H2V em Portugal, sendo elas: (1) água do mar; (2) água de estuários; (3) águas superficiais, encontradas em rios e lagos; (4) água subterrânea; (5) água pluvial; (6) água da rede pública; (7) água de esgoto urbano, (8) água de esgoto industrial; (9) água do resfriamento de torres. O Quadro 3 expõe essas fontes potenciais de água para o H2V e informações sobre o tratamento necessário para este uso.

Quadro 3 - Fontes de água e tratamento necessário para uso na indústria de H2V.

Fonte de água	Principais poluentes e parâmetros de tratamento	Operações de tratamento unitário necessários
Águas superficiais: rios e lagos.	Sólidos suspensos, DBO.	Peneiramento fino, coagulação/filtração + bombeamento por osmose reversa com elevação moderada.
Águas subterrâneas	Sólidos dissolvidos.	Depende da composição. Pode ser necessário remover alguns íons que também podem ser assegurados via Osmose Reversa. Os custos de bombeamento podem ser altos (assumindo NPSH - Altura Líquida de Sucção Positiva de 200m).
Efluente industrial tratado	Sólidos suspensos, DBO, DQO, toxicidade.	Tratamento terciário (coagulação + filtração) + Osmose Reversa.

Efluente urbano tratado	Sólidos suspensos, DBO, DQO, toxicidade.	Tratamento terciário (coagulação + filtração) + Osmose Reversa.
Água do mar	Salinidade entre 36 e 37%.	Peneiramento fino + Membrana para dessalinização (osmose reversa). A elevação e a distância de bombeamento podem ser altas.
Estuário	Salinidade entre 33 e 34%, algas e sólidos suspensos.	Peneiramento fino + Membrana para dessalinização (osmose reversa). A elevação e a distância de bombeamento podem ser altas.
Rede de suprimento de água	Sólidos dissolvidos.	Osmose Reversa. A quantidade necessária talvez seja muito alta e talvez não haja disponibilidade.
Resfriamento de torres	Sais dissolvidos e sólidos suspensos.	Coleta e condensação da água + Osmose Reversa.
Água da chuva	Sólidos suspensos, DBO e TSS.	Filtração fina + osmose reversa. Requer armazenamento e bombeamento.

Fonte: adaptado de Simões et al. (2021).

Nota: DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO = Demanda Química de Oxigênio; TSS = Sólidos Suspensos Totais.

No estado do Ceará, as águas superficiais e as águas da chuva são utilizadas para abastecer toda a cadeia de suprimentos do Estado. Plantas de dessalinização e de tratamento de efluentes são as únicas fontes de abastecimento não convencional sugeridas como possíveis soluções para complementar a oferta hídrica do CE. O Plano de Ações Estratégicas dos Recursos Hídricos do Ceará (PAERHCE) com vigência entre 2018 e 2027 prevê a utilização de água de reúso proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA) para abastecer o CIPP, onde o *hub* de H2V será instalado no Ceará, apesar de não prever a produção de H2V à época (Ceará, 2018). Enquanto a dessalinização de água do mar é sugerida pelo PAERHCE para abastecimento humano (Ceará, 2018).

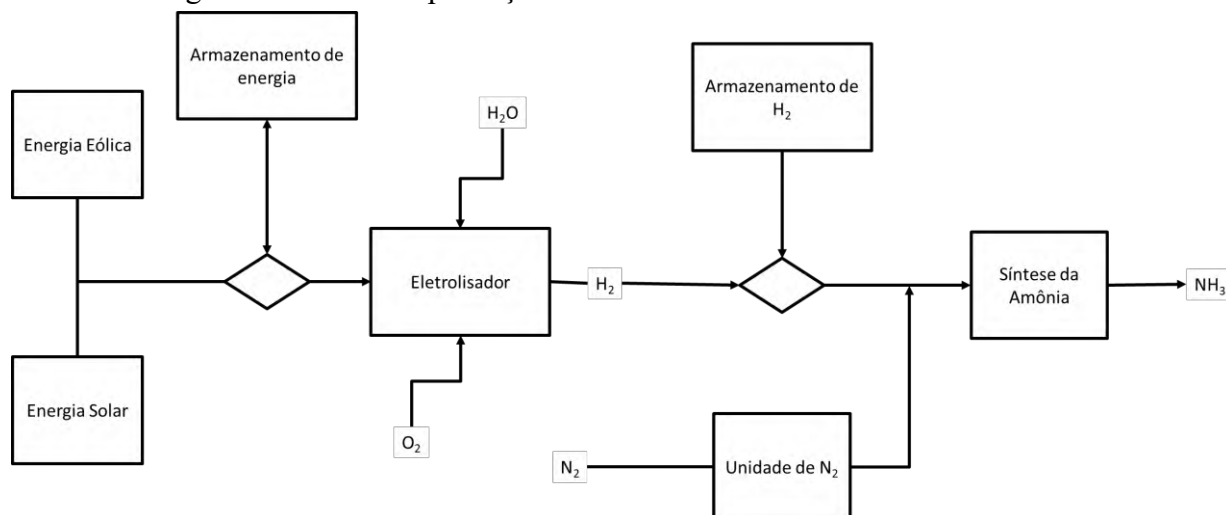
2.1.2 A cadeia produtiva de amônia verde

Um dos gargalos da cadeia de valor do H2V é o armazenamento e o transporte da molécula em forma de gás, visto que para produção em massa e para transporte do H₂ em longas distâncias, fornecimento elétrico direto e armazenamento de bateria não são soluções economicamente viáveis (Macfarlane *et al.*, 2019). Desse modo, opções de transporte em forma líquida emergem por navios emergem como soluções. As principais são o hidrogênio em sua forma líquida (LOHC) e a amônia verde (GNH₃). As principais desvantagens do transporte do LOHC são o alto custo para que o H₂ passe do estado gasoso para o líquido e a falta de maturidade técnica quando esta é comparada com a técnica de produção de amônia (Macfarlane *et al.*, 2020).

Portanto, pelo menos a curto e médio prazo, a opção mais viável para o transporte de H₂V é transformar o H₂ produzido em GNH₃ por meio do método Haber-Bosch, comercialmente maduro e conhecido há pelo menos um século (Macfarlane *et al.*, 2020). Apesar de a amônia ser um gás corrosivo e tóxico para o ser humano, há grande expertise na sua produção, transporte e uso, além de regulamentações própria para seu manejo. Atualmente, a maior parte da amônia é produzida por meio de combustíveis fósseis e aplicada a indústria de fertilizantes (Egerer *et al.*, 2023).

Além de a amônia ser mais fácil de transportar do que o H₂V em sua forma gasosa ou líquida, há uma série de aplicações diretas possíveis para a NH₃ além das usuais, como combustível de navios, ônibus e aeronaves e como geradores e turbinas de energia. Atualmente, quase que toda a produção de NH₃ é consumida pela indústria de fertilizantes (Macfarlane *et al.*, 2020). A figura 2 expõe a cadeia de produção de GNH₃.

Figura 2 - Cadeia de produção de GNH₃.



Fonte: Pozo e Cloete (2022).

A GNH₃ é uma forma tecnicamente viável de envio do vetor energético H₂V (Egerer *et al.*, 2023; Macfalan *et al.*, 2019). Dentro deste processo, são necessários 1,5 m³ de água para cada tonelada de GNH₃ produzida devido às necessidades de resfriamento do sistema (Macfarlane *et al.*, 2020). Contudo, o principal gargalo na cadeia de valor da GNH₃ é a quantidade de navios adequados para o transporte do vetor. Mundialmente, 170 navios podem ser utilizados para o transporte da GNH₃, dos quais 40 são dedicados exclusivamente para isso (Brown, 2019). Em geral, a capacidade de carga de amônia desses 40 navios é de 22.500 m³, tendo alguns poucos exemplares com capacidade de 38.000 e 60.000 m³ de amônia (Aldridge, 2023). Nesse caso, 1 m³ de amônia representam 771,3 quilogramas da substância.

2.2 Principais fontes não convencionais de água

Nesta seção serão abordadas as duas fontes não convencionais de água com maior possibilidade de utilização para o aumento do balanço hídrico do estado do Ceará segundo o PAERHCE (Ceará, 2018) e como fonte de abastecimento do *hub* de H2V.

2.2.1 Dessalinização de água do mar

Fenômenos de escassez hídricas estão tornando-se cada vez mais recorrentes (Omerspahic *et al.*, 2022). Apenas 1% da água disponível no mundo é apropriada para uso doméstico e industrial (Abdelkareem *et al.*, 2018) e há uma expectativa de que até 2050, 75% da população mundial sofra de escassez hídrica (Zhang *et al.*, 2022). A dessalinização de água do mar emerge como uma solução para aumentar o potencial hídrico (Darre; Toor, 2018; Elsaïod *et al.*, 2020), visto que 66% da superfície terrestre é coberta por água salgada (Abdelkareem *et al.*, 2018). No mundo, a água de dessalinização do mar é principalmente destinada para o abastecimento humano e para a indústria, representando respectivamente 60% e 30% do uso total (Jones *et al.*, 2019).

As principais barreiras para a instalação de uma planta de dessalinização de água do mar são os altos custos de investimento inicial, no que tange aos gastos de capital (CAPEX – sigla em inglês) e alto consumo de eletricidade, no que tange aos gastos operacionais (OPEX – sigla em inglês) (Darre; Toor, 2018). Outro fator que encarece as operações de plantas de dessalinização é o tratamento de seu subproduto, a salmoura, que pode ocasionar diversos impactos ecológicos por causa de seu alto nível de salinidade (Panagopoulos; Haralambous; Loizidou, 2019). Nesse sentido, para evitar impactos muito profundos na biota marinha, a diluição da salmoura é realizada, contudo, o menor distúrbio no nível de salinidade normal do mar pode afetar o ecossistema marinho (Darre; Toor, 2018).

Há alguns métodos disponíveis de dessalinização de água do mar, sendo eles por membrana ou por destilação térmica. O processo de osmose reversa da água do mar é o mais difundido e ocorre por meio de bombas de alta-pressão, que forçam a água através de uma membrana semipermeável, separando a água dessalinizada da salmoura, subproduto rico em sal e outras impurezas. Apesar de ser, historicamente, um processo de alto consumo de energia, paulatinamente, está tornando-se cada vez mais eficiente devido ao desenvolvimento de

membranas mais resistentes, estáveis e eficientes, aos dispositivos de recuperação de energia e à otimização geral dos sistemas de osmose reversa (Cavaliere; Perrone; Silvello et al., 2021).

Quanto à eficiência desse processo, a taxa de recuperação de água do mar depende da quantidade de sal presente na água do início do processo e da tecnologia aplicada no processo, tendo, em média, uma taxa de recuperação de 42% (Jones et al. 2019). A taxa de recuperação da água do mar, em %, pode ser calculada por meio da divisão entre a quantidade de água dessalinizada (Q_p), e a quantidade de água do mar do início do processo (Q_f), conforme é possível observar na equação 2 (Panagopoulos; Haralambous; Loizidou, 2019):

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (2).$$

Portanto, o maior desafio de uma planta de dessalinização é lidar com rejeito salinizado, pois além de ser caríssimo tratar, está muito associado a impactos ambientais negativos. Estima-se uma produção mundial diária de cerca de 142 milhões de m³ de rejeito salinizado, sendo Arábia Saudita, Kuwait, Qatar e Emirados Árabes Unidos responsáveis por 55% do total produzido (Jones et al., 2019). Este rejeito pode conter variados tipos de produtos químicos resultados do processo de dessalinização e até mesmo metais pesados (Darre; Toor, 2018). As características da salmoura proveniente do processo de osmose reversa são dispostas no quadro 4.

Quadro 4 - Características gerais da salmoura do processo de osmose reversa.

Parâmetro	Caracterização
Salinidade	65 a 85 gramas de sal para 1 litro de salmoura.
Anti-incrustante	2 partes por milhão.
Floculantes/coagulantes	Dosagem de coagulantes entre 1 e 30 mg/l (geralmente sais de ferro III); Dosagem de coagulantes auxiliares entre 0,1 e 5 mg/l.
Metais pesados	Equipamento metálico feito de aço inoxidável resistente à corrosão; o concentrado pode conter baixos níveis de ferro, cromo, níquel e molibdênio se for usado aço de baixa qualidade.
Sólidos totais dissolvidos (TDS) mg/L	≤ 70 mg/L.
Produtos químicos de limpeza (presentes se as soluções de limpeza forem despejadas em águas superficiais)	Alcalino (pH 11-12) ou ácido (pH 2-3) Soluções com aditivos tais como: detergentes, agentes complexantes, oxidantes e biocidas.

Fonte: Gomes *et al.* (2023).

O despejo da salmoura no mar pode decorrer em alterações nos níveis de riqueza de biodiversidade, conforme mostra a revisão sistemática dos impactos do despejo de salmoura no mar sobre as comunidades de fitoplanktons e zooplanktons realizada por Gomes *et al.* (2023). Os autores concluem que a tecnologia de osmose reversa para dessalinização de água do mar é a mais relacionada com modificações da salinidade. As principais modificações no ambiente marinho ocasionadas pelo despejo de salmoura são redução da produtividade primária do ambiente, perda de biodiversidade e mudança na estrutura das comunidades de fitoplanktons devido ao aumento de espécies tolerantes ao aumento da salinidade e redução de espécies menos tolerantes (GOMES *et al.*, 2023).

O ambiente do Golfo Pérsico é marcado por baixos níveis de precipitação e altos níveis de evaporação (Sharifinia *et al.*, 2019) assim como o Ceará (Souza Filho, 2018). Por isso, no Golfo Pérsico, a produção de água por dessalinização é extremamente utilizada, produzindo-se mais 20 de milhões de m³ por dia (Quesne *et al.*, 2021). Testes de campo e de laboratório no Golfo Pérsico indicam que a salmoura pode ter impactos nocivos em zoobentos, equinodermos, algas marinhas e recifes de corais. As principais consequências ecológicas do despejo de salmoura são a redução de espécies sensíveis, da abundância de plâncton, da abundância de epifauna de substrato duro e das taxas de crescimento de algas marinhas (Sharifinia *et al.*, 2019). Quesne *et al.* (2021) concluem que o despejo de salmoura em combinação com as mudanças climáticas pode elevar a temperatura média da costa do Golfo Pérsico em pelo menos 3 graus Celsius, o que implicará em consequências severas para a pesca e para o estilo de vida das comunidades costeiras.

No caso do Ceará, a pesca artesanal é meio de subsistência para diversas famílias. Um estudo realizado em duas comunidades de pesca, Curral Velho e Cumbe, investigou os resultados socioeconômicos dessas duas comunidades. Como resultados, o estudo mostra que os pescadores trabalham cerca de 5 horas por semana e entre 4 e 6 dias por semana. Durante a semana de pesca, o faturamento dos pescadores é de, em média, 25 reais/hora. Os autores concluem que esse tipo de negócio não é só viável do ponto de vista econômico, como consegue competir com a monocultura do camarão (Queiroz *et al.*, 2020).

Outro estudo sobre a pesca artesanal cearense foi realizado nas localidades de Mucuripe, Batoque e Prainha do Canto Verde entre os anos de 2017 e 2019 e monitorando 234 jangadas. Em Mucuripe, a média mensal de pesca foi de 224 Kg e seis espécies pescadas por jangada, enquanto Prainha do Canto Verde teve em média 3,6 espécies diferentes pescadas por jangada (Marques; Cruz; Feitosa, 2021). Esses estudos demonstram que a pesca artesanal é

importante meio de subsistência para os pescadores. Caso os impactos do despejo de salmoura na biota marinha ocorram no Ceará, é possível que toda uma comunidade perca um dos seus principais meios de subsistência.

Os resultados de um estudo realizado em comunidades rurais e assentamentos que utilizam dessalinizadoras de água para dessalinizar água subterrânea no Rio Grande do Norte, estado que faz fronteira com o Ceará, mostram que o descarte da salmoura acarreta o aumento do pH, da saturação base e da condutividade elétrica dos solos (Anders *et al.*, 2020). Em um estudo conduzido em Taiwan com o objetivo de investigar a percepção de *stakeholders* a respeito do funcionamento de uma planta de dessalinização de água do mar., os resultados apontam que o grupo mais preocupado a respeito da operação da dessalinizadora e da descarga de resíduos no mar são pescadores, que defendem que a operação e o despejo de salmoura sejam localizados em áreas distantes das que são usadas para pesca a fim de reduzir o impacto na atividade (Liu; Ye; Sheu, 2022).

Além disso, a dessalinização é um processo intensivo em emissão de GEE devido ao alto requerimento elétrico (Darre; Toor, 2018; Elsaïod et al., 2020; Pinto; Marques, 2020). Em geral, são utilizadas fontes de combustíveis fósseis para alimentação das plantas. Contudo, fontes renováveis como geração de energia estão sendo propostas para plantas de dessalinização mais modernas (Abdelkareem et al., 2018). Em resumo, o consumo energético depende do tipo de processo de dessalinização, da qualidade da fonte da água, da capacidade da planta e do sistema operante (Elsaïod et al., 2020).

Por outro lado, a produção de água a partir da dessalinização de água do mar também possui possibilidades de inserção de economia circular. O NaOH é uma substância muito empregada em plantas de dessalinização e de alto custo. Por isso, um estudo propõe agregar ao processo de osmose reversa da dessalinização de água do mar, um processo de eletrodiálise com membrana bipolar, cujo objetivo é recuperar parte do NaOH. Do ponto de vista energético, a operação se mostrou viável para uso comercial. Além disso, alimentar o processo de EDMB com painéis fotovoltaicos influencia na redução de 54,7% da pegada de carbono do processo (Herrero-González *et al.*, 2022).

Quanto à recuperação de minerais presentes na salmoura, é importante tratar a salmoura para retirar elementos que podem impactar na eficiência do processo de recuperação de recurso. Por isso, o estudo de Figueira *et al.* (2023) propõe utilizar nanofiltração e precipitação de cálcio como pré-tratamento da salmoura. No estudo, os autores verificam o CAPEX e o OPEX do cenário 1, em que a nanofiltração precede a etapa de precipitação de cálcio, e o cenário 2, em que a precipitação de cálcio precede a nanofiltração. Os resultados

apontam que o cenário 1 possui menor custo nivelado, sendo este de aproximadamente 1,6 €/m³ (Figueira *et al.*, 2023).

O principal método de recuperação de minerais da salmoura é a adsorção. Suas principais vantagens são: baixo custo, fácil operação e alta capacidade em recuperação de recursos. Além disso, é um processo eficiente na remediação da salmoura e emprega subprodutos naturais, como sementes de frutas, na adsorção de materiais. Ainda assim, a recuperação de minerais é complexa, pois substâncias como Potássio, Magnésio e Cálcio, que se apresentam em quantidade altas na água do mar, são de difícil precipitação e cristalização (Kumar *et al.*, 2021).

As membranas utilizadas no processo de osmose reversa possuem uma vida útil entre 5 e 10 anos. O *status quo* da disposição dessas membranas é o aterro sanitário. Contudo, iniciativas de reúso das membranas estão surgindo como propostas de adicionar economia circular a esse produto. Na Espanha há uma iniciativa de utilizar membranas em fim de vida útil para plantas de dessalinização de OR no tratamento terciário de efluentes para produzir água de reúso para agricultura (Landaburu-Aguirre *et al.*, 2016). Outra oportunidade de reúso para as membranas das plantas de dessalinização por OR é utilizá-las no processo de tratamento do chorume em aterros sanitários. García-Pacheco *et al.* (2022) testaram a aplicação das membranas de segunda mão e os resultados do estudo apontaram a viabilidade operacional das membranas por um período entre 10 e 27 meses. Em média, membranas de OR novas utilizadas no tratamento do chorume possuem vida útil de 12 a 36 meses (García-Pacheco *et al.*, 2022).

2.2.2 O tratamento de efluentes sanitários e a produção de água de reúso

De maneira simplificada, os processos de tratamento de efluentes almejam separar a água dos poluentes, que serão amontados em resíduos sólidos (Salgot; Folch, 2018). Esses poluentes podem ser formados por uma diversidade de fontes de água poluída, como a água de efluente doméstico, água de efluente industrial e água de chuva. Isso implica em uma diversidade de contaminantes a serem tratados, como microrganismos, sais, amônia, pesticidas, resíduos químicos tóxicos e metais pesados (Jasim, 2020). Nesse contexto, os produtos químicos utilizados no tratamento da água e os metais pesados acumulados no lodo são um dos principais impactos negativos do processo (Kamble *et al.*, 2019).

A presença de micropoluentes orgânicos, nanomateriais, produtos desinfetantes e produtos de embelezamento pessoal e farmacêuticos são cada vez mais encontrados em testes de qualidade da água. Para auxiliar na identificação dos micropoluentes presentes no efluente,

testes toxicológicos podem ser realizados a fim de entender melhor o coquetel de poluentes presentes naqueles efluentes (Salgot; Folch, 2018). Os micropoluentes são contaminantes não completamente biodegradáveis e que não podem ser removidos por tecnologias de tratamento convencionais, por isso, sua presença é um desafio para a comunidade científica. Exemplos deles são medicamentos, substâncias químicas agrícolas, aditivos industriais e produtos de higiene pessoal (Silva *et al.*, 2017).

Portanto, a complexidade do tratamento dependerá também da origem efluente (Crini; Lichfouse, 2019). Além disso, há diferentes tecnologias que podem ser aplicadas (Guerra-Rodríguez *et al.*, 2020). A fim de remover os micropoluentes, é possível usar tecnologias de membranas de separação e processos de oxidação avançada (Silva *et al.*, 2017). Desse modo, as ETEs podem ser classificadas de acordo com o tipo de tecnologia e a intensidade no uso dos recursos necessários para o processo de tratamento dos efluentes. Os processos de tratamento são divididos em físico-químicos, em bioquímicos, considerando também os microbiológicos, e quanto à velocidade do processo. É válido salientar que a decisão sobre o tipo de tecnologia e intensidade a serem empregadas na ETE variam de acordo com os requisitos necessários para os quais a água de reúso será direcionada (Salgot; Folch, 2018). Os principais tipos de tratamento podem ser consultados no quadro 5.

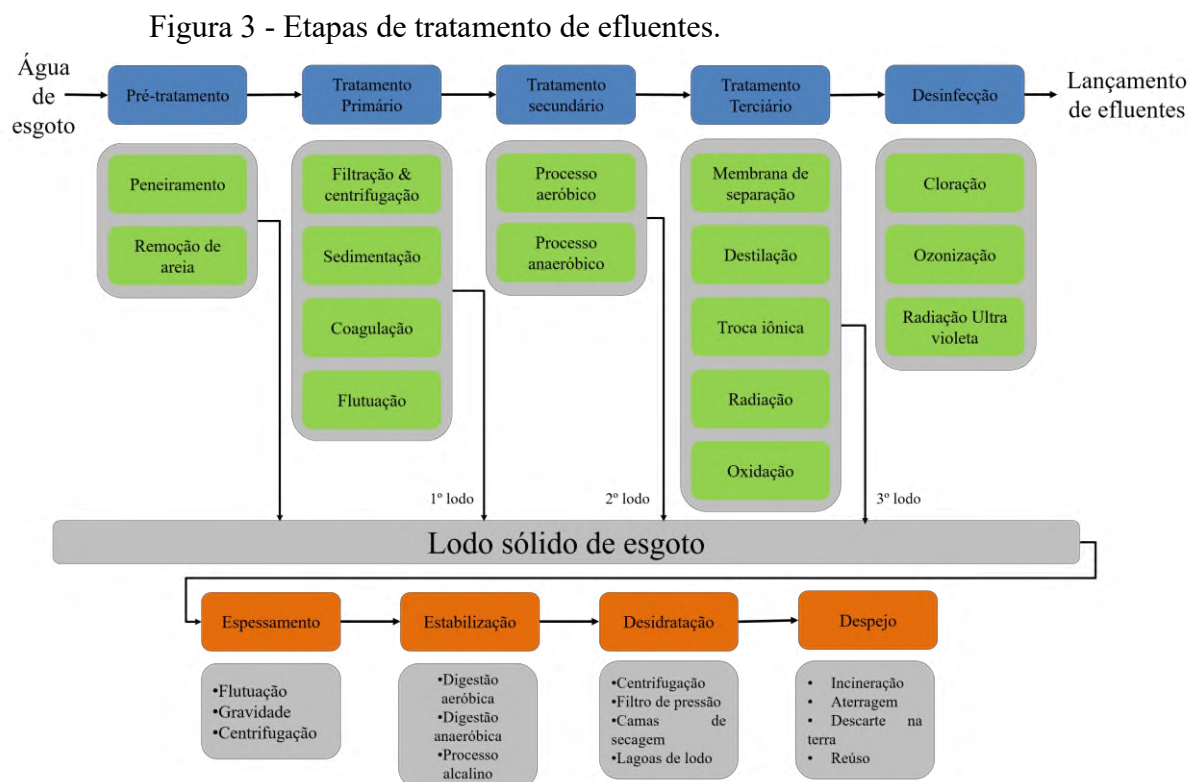
Quadro 5 – Tipos de tratamento para recuperação de água a partir de efluentes.

Tipo de tratamento/Processos de tratamento	Físico	Químico	Microbiológico	Outros	Combinação de tecnologias
Secundário	Sedimentação	Coagulação-floculação	Lagoas de maturação	-	Reatores de membrana biológica
	Coagulação-floculação				
	Filtração	Tecnologias de biofilme fixo	Sistemas extensivos		
	Dessalinização (uso de membranas)				
Terciário	Radiação ultravioleta	Cloração	-	Infiltração-percolação	Cloração + ultrafiltração, membranas + cloração
	Radiação gama	Ácido Peracético			
	Osmose reversa, ultrafiltração ou nanofiltração	Ozônio			

Fonte: adaptado de Salgot e Folch (2018).

Apesar de o tratamento secundário prover uma água que pode ser reutilizada em alguns casos, a depender da exigência que o processo ao qual a água de reúso será encaminhada, o tratamento terciário é indicado para casos em que um nível maior de pureza da água é requerido (Salgot; Folch, 2018), como é o caso da água destinada à produção de H₂V, que

requer uma água de extrema pureza, visto que a vida útil dos eletrolisadores pode reduzir caso haja outros elementos presentes no insumo além das moléculas de H_2O (Becker *et al.*, 2023). A figura 3 expõe as etapas tratamento de efluentes.



Fonte: Yadav *et al.* (2021).

É de extrema importância ressaltar que a purificação da água para o H₂V é um processo caro e pode representar 22% do balanço de usina (BoP – sigla em inglês) que comporta um eletrolisador de 1 MW com pilhas PEM (Mayyas *et al.*, 2019). Em relação às Despesas de Capital (CAPEX – sigla em inglês) e às Despesas de Operação (OPEX – sigla em inglês), em uma ETE de capacidade de processamento de 1.200 m³ de efluente por dia, o custo do CAPEX é de cerca de 2 milhões de USD e de OPEX cerca de 2 USD por m³ de efluente tratado. Em geral, a literatura reporta que as plantas possuem a osmose reversa como principal tecnologia de tratamento físico terciário (Becker *et al.*, 2023).

As duas tecnologias de purificação de água para abastecer eletrolisadores com água de qualidade, ou seja, água com resistividade elétrica maior que 1 MΩ cm, trabalhadas por Becker *et al.* (2023) são a osmose reversa e a resina de troca iônica. A osmose reversa é um método eficiente para a retirada de sais presentes na água (Silva *et al.*, 2017). A resina de troca iônica troca vários cátions e ânions com outros íons imobilizados em grânulos de resina sólida, geralmente sendo H⁺ ou OH⁻. Há quatro tipos de resinas de troca iônica, sendo elas divididas

em catiônica fraca, aniônica fraca, catiônica forte e aniônica forte, em que as duas últimas, em geral, são empregadas quando é necessária uma completa desmineralização (Becker *et al.*, 2023).

As ETEs são extremamente importantes, pois podem ser consideradas como uma possível solução para reduzir os revezes ocasionados pela escassez hídrica e vulnerabilidade social (Jafarinejad, 2020; Maragon *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2022) e ajudam a minimizar os impactos à saúde humana e ao ciclo hidrológico decorrentes das próprias atividades humanas (Chen *et al.*, 2020; Jafarinejad, 2020), visto que previnem o envio de água contaminada diretamente ao meio ambiente (Jafarinejad, 2020; Kalya; Alver, 2022). Por um lado, podem ser consideradas como promotoras do desenvolvimento sustentável e da proteção ambiental (Tušer; Oulehlová, 2021). As principais aplicações para a água de reúso e seus principais desafios estão dispostos no quadro 6.

Quadro 6 - Principais aplicações para a água de reúso e principais problemas.

Tipo de uso	Problema	Em relação a	Uso final/comentários
Agricultura	Salinidade	Solo e plantações	Caro de ser reduzido e poucos padrões
	Adoecimento de plantas	Patógenos de plantações	Pode afetar plantações
	Toxicidade	Acumulação de substâncias tóxicas	Transmissão à consumidores
Usos urbanos (exceto ingestão)	Poluição do ambiente urbano	Aerossóis, escoamento e saúde animal	Primordialmente para irrigação, mas também para limpeza e usos industriais
Indústria	Salinidade	Corrosão	Resfriamento, limpeza e matéria-prima de processos
	Risco à saúde humana	Aerossóis e patógenos	-
Lazer	Risco à saúde humana	Aerossóis e ingestão	Irrigação de parques, campos de esportes e abastecimento de piscina
Recuperação de cursos de água	Poluição ambiental	Patógenos, nutrientes, substâncias tóxicas	Aumento de água nos corpos de água vizinhos
Recuperação de água subterrânea	Poluição	Químicos, poluição física e microrganismos	Água para usos diversos
Uso potável	Poluição de lençóis freáticos	Água para ingestão segura	Reúso direto, ingestão de água

Fonte: Salgot e Folch (2018, p. 71).

Contudo, por outro lado, a operação de ETEs emite GEE (Hao *et al.*, 2019) e demandam uma quantidade considerável de energia elétrica (Cardoso *et al.*, 2021; Capodaglio; Olsson, 2020; Kamble *et al.*, 2019). Esses impactos negativos são altamente influenciados pelo tamanho da planta, pelo seu fator de capacidade (Cardoso *et al.*, 2021) e pelas etapas e tecnologias empregadas para tratar a água a fim de atingir os requerimentos necessários para seu uso, por exemplo, para a produção de H₂V, são necessárias etapas e tecnologias que

produzam uma água de alta pureza (Becker *et al.*, 2023).

Por exemplo, quanto às emissões de GEE, caso se aplique a técnica de Reator de Batelada Sequencial (RBS), são liberados cerca de 374 g de CO_2/m^3 de efluentes processados, enquanto para o CH_4 , é liberado em torno de 0,50 g/ m^3 de efluente processado. Caso se aplique o processo anaeróbico/anóxico/óxico, estima-se que sejam liberados 0,18 g de CH_4/m^3 de efluente tratado. Os valores para N_2O são de 0,97 g/ m^3 de efluente tratado para o processo anaeróbico/anóxico/óxico e 4,20 g/ m^3 de efluentes tratados para o processo de RBS (Nguyen *et al.*, 2019).

Em um estudo conduzido por Hernández-Chover, Bellver-Domingo e Hernández-Sancho (2018) a respeito de eficiência da economia de escala em ETEs de tratamento secundário de efluentes urbanos na região de Valencia, Espanha, com 217 estações utilizando parâmetros de custo de operação e gestão quantificados em euro por ano (energia, funcionários, reagentes e manutenção) e a quantidade de poluentes removidos quantificados em Kg por ano (Sólidos Suspensos – SS – e Demanda Química de Oxigênio – DQO) expôs que quanto maior o tamanho da planta, maior sua eficiência em todos os parâmetros. As ETEs foram agrupadas por sua população equivalente⁵ e três grupos foram formados, o grupo 1, com variação entre 500 população equivalente e menor que 8.000 população equivalente, o grupo 2, que varia entre 8.000 p.e e 50.000 população equivalente, e o grupo 3, de ETEs com população equivalente maiores que 50.000. A eficiência média no grupo 3 foi de 90%, enquanto nos grupos 1 e 2 foram de 48% e 75%, respectivamente. Por fim, a energia é o parâmetro que mais contribui o aumento dos custos operacionais e o número mínimo de população equivalente para que a ETE possua uma operação eficiente é de 3.000 (Hernández-Chover; Bellver-Domingo; Hernández-Sancho, 2018).

Lin, Tran e Jung (2022) aferiram a viabilidade tecnológica e econômica da combinação de tecnologias de tratamento de efluentes provenientes de uma empresa petroquímica em Taiwan segundo os padrões de qualidade de água para consumo de Taiwan. As tecnologias analisadas foram: (1) tratamento primário, realizado à época, (2) microfiltração com eletrodialise reversa, (3) ultrafiltração somada à osmose reversa, e (4) microfiltração, somada à ultrafiltração e à osmose reversa. Para realizar a análise de viabilidade econômica, os custos levantados foram relativos a custos iniciais, como equipamento e sítio, custos operacionais, como funcionários, produtos químicos, eletricidade e manutenção, depreciação

⁵ Utilizado para determinar a população equivalente a uma determinada carga industrial, isto é, que população produziria a mesma carga poluidora de uma determinada indústria.

de equipamentos, custos de perda e benefício de fluxo de caixa, e por fim, custos das membranas. Como principal resultado, os autores expõem que o tratamento com UF e OR é o mais viável, tanto do ponto de vista tecnológico a fim de cumprir os padrões base quanto econômico, sendo 26,7% mais barato que o tratamento primário e o que proporciona um volume de 362,7% de água tratada a mais que o tratamento primário (Lin; Tran; Jung, 2022).

No caso das estações de tratamento de efluentes e produção de água de reúso, os principais fatores alarmantes são as emissões de GEE, a possibilidade de o efluente causar eutrofização, os riscos socioecológicos apresentados pelos compostos de desregulação endócrina presentes no efluente mal tratado e os riscos de contaminação por metais pesados em excesso no lodo. Considerando esses fatores, um estudo procedeu o levantamento da sustentabilidade ambiental de cinco ETEs que envolvem tratamento primário, secundário e terciário. Os resultados desse estudo indicam que os processos responsáveis pela pico de emissão de GEE são o tratamento biológico na segunda etapa do tratamento secundário e o consumo de eletricidade do tratamento terciário. Quanto aos compostos de desregulação endócrina, a maior parte foi retirada, contudo essas substâncias merecem uma atenção especial durante o processo de tratamento de efluentes. Por fim, o estudo mostra que altas concentrações de mercúrio foram encontradas no lodo. Portanto, a presença de metais pesados em excesso no lodo faz com que esse resíduo necessite de uma destinação bem planejada (Chen *et al.*, 2021).

Por outro lado, o tratamento convencional de efluentes é importante de ser realizado, pois reduz a poluição hídrica. Adicionar estratégias de recuperação de energia como a digestão anaeróbia e a recuperação de recursos, como a água de reúso, são importantes para reduzir os impactos ambientais relacionadas ao tratamento de efluentes (Hao *et al.*, 2019). No Ceará, a recuperação de energia iria requerer investimentos para converter a tecnologia de processamento biológico das ETEs, que utiliza uma rota tecnológica aeróbia. Contudo, a produção de água de reúso é uma oportunidade para aumentar o balanço hídrico do Ceará.

Outro fator de poluição ocasionado pelas ETEs ocorre quando o tratamento é ineficiente. Isso resulta na produção de água cinza, uma água com bastante contaminantes retornando ao meio ambiente. Além disso, para que a água possa ser reutilizada em atividades como agricultura ou geração de energia, é importante que a descontaminação seja eficiente, tornando o nível de poluentes o menor possível (Khan *et al.*, 2022). Quanto à aceitação social da água de reúso, um estudo investigou os determinantes da aceitação social da água de reúso nos Emirados Árabes Unidos a partir da resposta de 1.426 pessoas. Os resultados mostram que há uma alta aceitação social quanto a aplicação da água de reúso para atividades com baixo contato humano, enquanto ações com alto contato humano com água de reúso possui menores

níveis de aceitação. Dois fatores contribuem mais para a rejeição social, sendo eles o risco percebido de contaminação e o fator psicológico de nojo às águas residuais. Os resultados também mostram que esses dois fatores são influenciados pelo acesso à informação de qualidade, portanto, para aumentar a aceitação social, informar com transparência para os consumidores a respeito da qualidade da água de reúso (Chfadi; Gheblawi; Thaha, 2021).

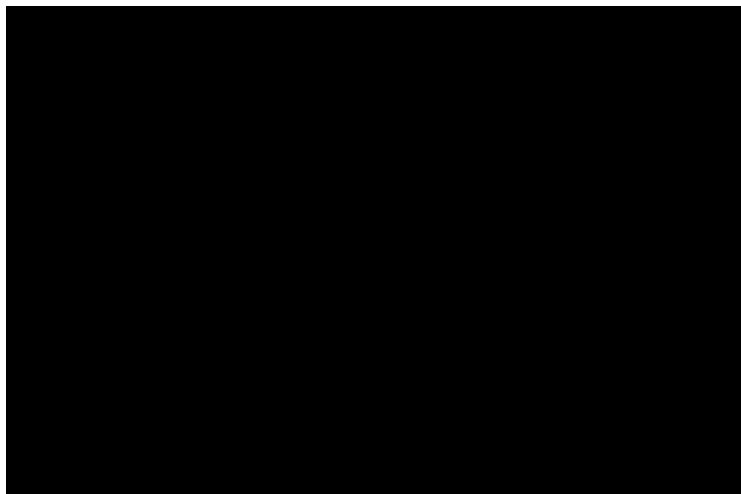
Resultados semelhantes para um estudo que investigou a percepção de 244 nigerianos a respeito da utilização de água de reúso em propósitos diversos. Os resultados apontam que as pessoas estão conscientes dos benefícios econômicos e ambientais de utilização de água de reúso, mas preferem que os usos sejam para descarga de residências, geração de eletricidade, construção de prédios ou lavagem de carros. O uso potável da água de reúso é a última preferência entre os respondentes. Os respondentes também demonstraram estarem mais dispostos a aceitarem a aplicação da água de reúso caso a sua qualidade tenha a chancela de médicos ou professores universitários da região (Akpan; Omole; Bassey, 2020).

2.3 Economia circular, desenvolvimento sustentável na cadeia do recurso água

O H2V é considerado um vetor do desenvolvimento social e industrial (Falcone; Hiete; Sapiro, 2021). Contudo, é necessário ter cautela, pois caso a cadeia de produção do H2V não seja bem planejada, há a possibilidade de surgirem impactos ambientais e sociais tão severos quanto os impactos ocasionados por fontes de energia baseada em combustíveis fósseis, o *business as usual* (Sovacool *et al.*, 2019). Por isso, a economia circular surge como um caminho adequado para promover o desenvolvimento sustentável em várias indústrias (Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019).

A economia circular é um sistema regenerativo em que a entrada e o desperdício de recursos, as emissões e o vazamento de energia são reduzidos a partir da desaceleração, fechamento ou estreitamento dos circuitos de matéria e energia por meio de manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, recondicionamento, reciclagem ou um projeto planejado para o longo prazo (Geissdoerfer *et al.*, 2017). A economia circular é uma mudança da economia linear, que possui como base a lógica de coletar, produzir e descartar, para uma lógica embasada no reaproveitamento máximo do recurso que seria desperdiçado na economia linear (Nikolaou; Tsagarakis, 2021). A figura 4 expõe graficamente a diferença entre a economia linear e economia circular utilizando o recurso água como exemplo.

Figura 4 - Diferença de abordagem entre economia linear e economia circular (à direita).



Fonte: adaptado de Zhang e Liu (2022).

Portanto, a partir da figura 4 é possível perceber que principal foco da economia circular é aumentar a eficiência no uso dos recursos a fim de atingir um melhor equilíbrio e harmonia entre a economia, o meio ambiente e a sociedade (GHISELLINI, CIALANI; ULGIATI, 2016), o que aproximaria a economia circular da sustentabilidade (Winans; Kendall; Dang, 2017). Essa aproximação ocorre devido algumas similaridades, como a necessidade de cooperação entre *stakeholders*, serem campos de estudos multi e interdisciplinares, apresentarem oportunidade de cocriação de valor e papel central exercido por empresas devido a suas capacidades e a seus recursos (Geissdoerfer *et al.*, 2017) e, por isso, esses conceitos são entendidos por alguns autores como conceitos idênticos (Nikolaou; Jones; Stefanakis, 2021).

Contudo, há diferenças importantes de serem consideradas, como é o caso de a economia circular ter um objetivo mais focalizado no fechamento de circuitos, na eliminação de desperdícios, no melhor aproveitamento de recursos e ter maior foco no âmbito econômico e ambiental, enquanto os efeitos da economia circular no âmbito social são indiretos. Por outro lado, a sustentabilidade é um conceito mais abrangente, possui objetivos múltiplos dependentes do interesse dos agentes e a tentativa de valorizar igualmente os sistemas ambientais, econômicos e sociais (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

O estudo de Schroeder, Anggraeni e Weber (2019) buscou identificar em que extensão as práticas de economia circular são importantes para atingir os objetivos do desenvolvimento sustentável. Os resultados por meio de análise qualitativa de documentos demonstram que as práticas de economia circular estão mais fortemente relacionadas com os seguintes ODS: ODS 6, sobre água potável e saneamento, ODS 7, sobre energia limpa e

acessível, ODS 8, sobre trabalho decente e crescimento econômico, ODS 12, consumo e produção responsáveis, e ODS 15, sobre a vida terrestre. Portanto, os autores concluem que a economia circular pode ser utilizada como uma caixa de ferramentas para atingir vários ODS. Por fim, os autores indicam a necessidade de estudos empíricos para comprovar essa relação (Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019).

O estudo de Lahane e Kant (2022) investigou e analisou práticas de economia circular que podem ajudar a atingir os ODS a partir da aplicação do conceito de cadeia de suprimentos circular em uma fábrica de equipamento de veículos automotores na Índia. Dentre os ODS derivados de práticas de economia circular para o estudo de caso, os mais bem classificados são os relativos à mitigação da geração de resíduos e o aumento da sustentabilidade ambiental por aspectos de remanufatura e reparo e a eficiência na utilização de recursos (Lahane; Kant, 2022). Enquanto o ODS derivado de práticas de economia circular com menor nível de influência é a promoção da saúde e bem-estar. Esse resultado corrobora com o trabalho de Geissdoerfer *et al.* (2017) ao diferenciar Desenvolvimento Sustentável e economia circular.

A economia circular, de modo geral, é considerada uma forma promissora de diminuir as emissões de CO₂ a partir da redução do consumo energético, portanto, uma forma de mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Fortes *et al.*, 2019). O estudo de Knäble *et al.* (2022) corrobora com a afirmação de Fortes *et al.* (2019) e será explicada em seguida. A economia circular possui uma ordem hierárquica de priorização de um grupo de ações, conhecida como as fontes de valor da economia circular. São elas: (1) recursos renováveis, como as fontes de energia elétrica solar e eólica, (2) reúso e compartilhamento, o que evita a produção adicional, (3) Reparo e remanufatura, que envolve o conserto ou a reutilização de partes ainda úteis de produtos desgastados em outra cadeia de suprimentos, e (4) a reciclagem. No estudo de Knäble *et al.* (2022), os autores verificaram a influência das fontes de valor da economia circular nas dimensões social, ambiental e econômica do desenvolvimento sustentável. Neste estudo, foram analisados dados provenientes de 25 países da União Europeia durante o período de 2010 a 2019 por meio da técnica estatística de dados em painel. Os resultados apontam uma forte influência da economia circular nas três dimensões do desenvolvimento sustentável (Knäble *et al.*, 2022).

Em relação a influência de cada uma das fontes de valor sobre as dimensões da Desenvolvimento Sustentável, os resultados mostram que o consumo de energias renováveis possui um efeito significativo na redução da emissão de GEE e na redução do desemprego, contudo não possui efeito significativo no aumento direto do Produto Interno Bruto e, apesar

disso, conclui-se que as energias renováveis possuem um papel importante para o desenvolvimento sustentável. A fonte de valor reuso e compartilhamento mostraram efeito significativo apenas sobre a redução das emissões de GEE. A fonte de valor reparo e remanufatura mostraram efeitos significativos tanto na redução das emissões de GEE, na redução das taxas de desemprego e no aumento do produto interno bruto dos países da União Europeia. Por fim, a fonte de valor reciclagem é a mais complexa, visto que os resultados indicaram que seu efeito depende do setor e do material que está sendo reciclado, portanto seu impacto sobre o desenvolvimento sustentável pode variar, a não ser que a reciclagem seja alimentada por energias renováveis (Knäble *et al.*, 2022).

Portanto, a economia circular é considerada um ótimo caminho rumo ao Desenvolvimento Sustentável. Contudo, a fim de que seja possível transacionar da economia linear para a economia circular, políticas e ações são necessárias (Morseletto, 2020). A União Europeia, em seu plano de transição para a economia circular, que possui o objetivo de fazer a Europa mais limpa e competitiva, estabelece 7 cadeias de valor de recursos prioritárias, sendo elas: eletroeletrônicos, baterias e veículos, embalagens, plásticos, têxteis, construção e alimento, água e nutrientes (União Europeia, 2020).

Quanto a água, esse recurso emerge como foco para aplicação da economia circular no mundo, pois é, provavelmente, o único recurso que não há alternativas de substituição (Sauvé *et al.*, 2021). Por isso, é importante aplicar os objetivos da EC no setor de suprimento hídrico por meio de uma gestão mais sustentável desse recurso e um despejo e um tratamento mais racional das águas residuais (Smol; Adam; Preisner, 2020). O quadro 7 expõe ações que alinham os princípios da EC ao setor de água.

Quadro 7 - Princípios da economia circular alinhados ao setor hídrico.

Princípio	Ações
Redução	Prevenção da geração de efluentes a partir da redução de uso de água e da redução da poluição das fontes de água.
Restauração	Aplicação de tecnologias para remover poluentes da água e do lodo.
Reuso	Reuso da água de efluentes como uma alternativa para o suprimento de água para usos não potáveis.
Reciclagem	Recuperação de água a partir da água de efluentes para usos potáveis.
Recuperação	Recuperação dos nutrientes e da energia presente nos resíduos da água.
Repensar	Repensar como aplicar recursos para criar uma economia sustentável livre de resíduos e emissões.

Fonte: Smol, Adam e Preisner (2020).

O potencial de aplicar a EC na cadeia de suprimentos hídrica reside no fato de minimizar a utilização de água bruta pela indústria, sendo abastecida por uma água recuperada,

fazendo com que o sistema hídrico seja mais circular (Zyl; Jooste, 2022). Portanto, aplicar a lógica circular para esse recurso é importante, pois muita pressão é posta sobre a água (Castellet-Viciano; Hernández-Chover; Hernández-Sancho, 2022), devido às mudanças climáticas, ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico (Zyl; Jooste, 2022). A recuperação da água do efluente e o descarte seguro nos corpos hídricos são bons exemplos de economia circular, pois baseiam-se no objetivo de restauração e contribuem para a redução da poluição no meio ambiente. Além disso, as ETEs possuem um apelo social, pois despejar água sem poluentes nos corpos hídricos é uma questão de saúde pública (Salgot; Folch, 2018).

Contudo, outros usos podem ser dados para a água que foi recuperada. Assim, ela deixaria de encaixar-se no objetivo de recuperação para encaixar-se no objetivo de reúso. A água de reúso é possível de ser aplicada em vários setores, inclusive para o abastecimento de um *hub* de H2V (Eneng; Lulofs; Asdak, 2018; Sauvé *et al.*, 2021; Smol; KoneczNA, 2021; Zyl; Jooste, 2022). Aplicar a lógica da economia circular no *hub* de H2V seria uma forma de fomentar o desenvolvimento sustentável da cadeia de valor desse vetor energético. Estudos preocupados com os impactos negativos da cadeia de H2V estão sendo publicados e endereçar essas preocupações é fundamental para garantir uma transição energética justa e sustentável (Dillman; Heinonem, 2022; Müller *et al.*, 2023; Scita; Raimondi; Noussa, 2020).

Um exemplo prático da aplica  o da água de reúso    no setor agrícola de Milão, na Itália, que ocorre desde 2004. A aceita  o pública da aplica  o de água de reúso no setor agrícola de Milão aumentou devido    melhoria da qualidade do solo e das planta  es e ao processo de tratamento de água ser realizado com transparência    popula  o. Além disso, os agricultores não pagam pelos custos de tratamento da   gua, sendo eles cobertos pela prefeitura de Milão (Mannina; Gulhan; Ni, 2022). Contudo, para que a indústria de tratamento de efluentes caminhe em dire  o ao Desenvolvimento Sustentável,    necessário atentar-se ao lodo produzido durante o processo de limpeza da   gua. Na China, 46,8% do lodo    incinerado ou enviado para aterros sanitários, enquanto 29,3% são utilizados como recurso para aplica  o no solo, seguindo a lógica da EC (Wei *et al.*, 2020).

No que tange    dessaliniza  o de água do mar, o *status quo* de sua opera  o segue a lógica linear, visto que água    extraída do mar, separa-se a água para uso e a salmoura, a água    direcionada para outros processos enquanto a salmoura, ou seja, o resíduo,    despejado no ambiente marinho (Zyl; Jooste, 2022). Por isso, inserir práticas de economia circular seria importante para tornar a essa alternativa tecnológica mais sustentável. O estudo de Figueira *et al.* (2023) sugere uma técnica de recupera  o de recurso minerais presentes em grande

quantidade na salmoura, como o Boro, o Magnésio e o Lítio, e importantes para setores industriais da União Europeia. Herrero-González e Ibañez (2022) sugerem a recuperação do hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, que pode ser utilizada nas indústria têxtil, nas indústrias de produtos de limpeza e como catalisador na produção do biodiesel.

No que tange as membranas de osmose reversa utilizadas na dessalinização de água do mar, Landaburu-Aguirre *et al.* (2016) sugere novas aplicações, ao invés de direcioná-las para aterros sanitários, como geralmente é realizado. Por último, um estudo que objetiva integrar a dessalinização de água do mar com a produção de água de reúso é a utilização de membranas de segunda mão de processo de osmose reversa da dessalinização de água do mar na recuperação da água presente no chorume (García-Pacheco *et al.*, 2022).

Há possibilidades de inserir a economia circular em vários processos da produção de água por meio de fontes não convencionais. Por concepção, a água de reúso possui fundamentos de economia circular bem claros em seus processos, mas não é por isso se deve desconsiderar os possíveis impactos negativos ambientais e sociais do lodo. A dessalinização de água do mar por concepção e estado da arte segue uma lógica de economia linear, por isso, é importante considerar inserir circularidade em seu processo produtivo.

2.4 A abordagem de dinâmica de sistemas

A origem da abordagem dinâmica de sistemas advém da teoria do controle e foi formulada por Forrester com o objetivo de construir modelos computacionais capazes de avaliar uma estrutura e suas interações e, a partir disso, prover um *framework* de estratégias e de *trade-off* que podem ser testados (Bala; Arshad; Noh, 2017). Assim, o primeiro objeto de estudo de dinâmica de sistemas foi a simulação de problemas em uma cadeia de suprimentos industrial (Dangerfield, 2014a).

Dessa forma, nessa abordagem, sistemas são entendidos como um conjunto de elementos que se afetam entre si por meio de entradas e saídas. Esses sistemas são dinâmicos justamente porque as saídas não são somente influenciadas pelas entradas atuais, mas também pelos valores passados que esse elemento assumiu (Davies; Schmitz, 2015), em que eles podem conter aspectos biológicos, econômicos, sociais, tecnológicos e políticos, por exemplo (Bala; Arshad; Noh, 2017; Dangerfield, 2014a; Duggan, 2016; Radzicki, 2020).

Uma de suas ferramentas é o diagrama de retroalimentação causal (*Causal Loop Diagram* – CLD em inglês), que possui o objetivo de comunicar o comportamento do sistema e não de simulá-lo, como é o caso da ferramenta Diagrama de Estoque e Fluxo (*Stock and Flow Diagram* – SFD em inglês). Portanto, o CLD é uma ferramenta que facilita o entendimento da estrutura do sistema e como a retroalimentação ocorre entre as variáveis. Compreender como o sistema se retroalimenta é um fator chave para o entendimento do comportamento desse sistema. O quadro 8 mostra como deve-se proceder a leitura de um CLD.

Quadro 8 - Interpretação de um CLD.

Símbolo	Interpretação formal	Interpretação informal
$X \rightarrow^+ Y$	Tudo permanecendo igual, se X aumentar, Y também irá aumentar. Se X diminuir, Y também diminuirá.	Quanto mais X aumenta, mais Y aumenta. Quanto mais X diminui, mais Y diminui.
$X \rightarrow^- Y$	Tudo permanecendo igual, se X aumentar, Y irá diminuir. Se X diminuir, Y aumentará.	Quanto mais X aumenta, mais Y diminui. Quanto mais X diminui, mais Y aumenta.

Fonte: adaptado de Sterman (2000).

No caso do SFD, a ferramenta de estoques, fluxos e *feedbacks*, busca compreender como os fluxos variam nos sistemas, capturando os valores esperados que, no mundo real, são não lineares (Gonçalves, 2022), portanto é adequada para lidar com não linearidade, rotações repetidas ao longo do tempo e interações complexas (Bala; Arshad; Noh, 2017; Radzicki, 2020). O processo de modelagem pretende fazer um recorte da realidade que precisa ser entendida e gerenciada e a partir disso produz uma representação externa e explícita desta realidade na forma de um modelo (Duggan, 2016). A partir da aplicação da dinâmica de sistemas, é possível simular o comportamento do sistema e estabelecer ações assertivas para resolução de problemas complexos, tais como aquecimento global e transição energética para matrizes menos poluentes (Bala; Arshad; Noh, 2017; Radzicki, 2020). Portanto, o ponto-chave que rege a aplicação de dinâmica de sistemas em situações de complexidade é focar no entendimento da parte da realidade importante para os *stakeholders* que precisam do modelo, pois isto implica no discernimento do fenômeno e na oportunidade de mudar, gerir e controlar o sistema de interesse (Duggan, 2016).

A composição básica de todo modelo SFD é a seguinte: (1) estoques, que são variáveis responsáveis por capturar o acúmulo ou desacúmulo do sistema de fluxos durante o tempo; (2) fluxos, que preenchem ou drenam os estoques em um processo chamado de integração; (3) *feedbacks*, que representam a transmissão e o retorno da informação a respeito do montante de informação ou material que foi acumulado no sistema de estoque; e (4) fatores limitantes, que barram o crescimento ou decrescimento infinito dos estoques, podendo ser

transição do sistema energético fóssil dependente para uma matriz completamente renovável e utilizou a abordagem de dinâmica de sistemas, pois esta permite a integração entre diferentes perspectivas e disciplinas, bem como a retroalimentação entre diferentes subsistemas. No caso do MEDEAS, incorporou-se aspectos biofísicos, sociais, tecnológicos e econômicos a fim de atingir o objetivo do projeto (Capellán-Pérez *et al.*, 2020).

Em um dos trabalhos resultantes do desenvolvimento do projeto MEDEAS, Nieto *et al.* (2020) propuseram uma modelagem macroeconômica global sob efeitos de restrições energéticas até 2050. Os cenários propostos são o *Business as Usual* e o crescimento verde. O cenário *Business as Usual* não considera políticas para atingir os objetivos climáticos do acordo de Paris, como a promoção do florestamento e a redução gradativa da utilização do petróleo para geração de eletricidade e calor. O cenário Crescimento Verde é pautado na aplicação de políticas para atingir o objetivo do Acordo de Paris de barrar o aumento da temperatura média global em 2 graus Celsius (°C) juntamente com o crescimento do PIB. Os resultados mostram que não há como o PIB crescer em casos de restrições de recursos biofísicos, portanto, não há como o sistema energético suprir a demanda crescente por energia sem que haja o aumento da oferta por meio de fontes renováveis. Portanto, não aplicar políticas de mitigação de MC barraria o desenvolvimento sustentável (Nieto *et al.*, 2020).

Outro estudo aplicando a dinâmica de sistemas foi conduzido na Austrália apresentando um modelo relativo à previsão da demanda e oferta de água para a região de Queensland e o impacto de dessalinizadoras e barragens na segurança hídrica da região, considerando a tendências de demanda de água, variabilidade climática e crescimento populacional durante um período de 100 anos. Os autores concluíram que as dessalinizadoras podem contribuir positivamente para reduzir a lacuna entre a demanda e a oferta de água, principalmente em anos de seca. Também foi possível concluir que a construção de barragens ao invés de dessalinizadoras implicaria no aumento do custo unitário do m³ de água quando se considera longos ciclos de vida, especialmente por causa da alta variabilidade pluviométrica. Por fim, afirma-se que por esse modelo ser embasado na abordagem de dinâmica de sistemas, pode ser aplicado não somente para Queensland ou Austrália, mas para qualquer situação que considere o *nexus* entre oferta hídrica, demanda hídrica e clima (Sahin; Stewart; Helfer, 2015).

O estudo de Jeong e Adamowski (2016) desenvolve um modelo socio-hidrológico pautado na dinâmica de sistemas, combinando um modelo hidrológico

conceitual determinístico e um modelo social, que incorpora população; uso da terra; economia; tecnologia; e políticas de água de reúso para a região central da Coreia do Sul durante o período de 2010 até 2059, com o objetivo de verificar o impacto da utilização de água de reúso na agricultura do local. Os cenários propostos envolvem a utilização ou não de água de reúso na agricultura. O modelo expõe que a urbanização aumenta a quantidade de água de reúso para a agricultura e consequentemente, aumenta o nível de água subterrânea. Além disso, a utilização de água de reúso reduz a quantidade de água subterrânea utilizada na agricultura e aumenta os benefícios socioeconômicos (JEONG; ADAMOWSKI, 2016).

Insuasty-Reina, Osorio-Gómez e Manotas-Duque (2022) propuseram um modelo de dinâmica de sistemas para analisar as emissões de CO₂ que serão geradas no processo de produção de H₂ azul a partir do carvão quando este vetor energético compuser a matriz energética da Colômbia. O modelo sugere que a produção de H₂ a partir do processo de gaseificação do carvão é uma alternativa interessante, pois essa tecnologia permite a captura e armazenagem do CO₂. O cenário base, em que a produção de H₂ não é realizada, expõe que a demanda elétrica do País só pode ser suprida até 2031 caso não haja aumento das capacidades instaladas da matriz energética atual. Os demais cenários mostram uma redução nas emissões de CO₂ ao longo do sistema em qualquer cenário que haja produção de H₂, seja o maior ou menor nível de produção do H₂, seja com a captura máxima ou mínima do CO₂ (Insuasty-Reina; Osorio-Gómez; Manotas-Duque, 2022).

Por meio dos estudos apresentados, é possível afirmar que a dinâmica de sistemas é uma abordagem interessante de ser utilizada nesta pesquisa dado que é possível analisar sistemas complexos, as interações entre seus processos e o impacto de cada uma delas ao longo do tempo através da simulação de modelos (Insuasty-Reina; Osorio-Gómez; Manotas-Duque, 2022). Aplicação da abordagem de dinâmica de sistemas perpassa por alguns passos, que são: (1) identificação/definição do problema, (2) construção do modelo conceitual, (3) formulação do modelo, (4) análise e validação do modelo, (5) design e análise de ações e (6) implementação (Bala; Arshad; Noh, 2017; Barlas, 1996; Sterman, 2000).

2.4.1 Dinâmica de sistemas aplicada ao hidrogênio verde

Alguns estudos aplicam dinâmica de sistemas para sugerir ações que permitam o desenvolvimento da indústria de H2V. O trabalho de Huang, Li e Wu (2022) desenvolve um modelo de dinâmica de sistemas combinado com o método de Lotka-Volterra, cujo objetivo é prever a demanda de hidrogênio na China com o foco em três setores específicos: indústria de amônia sintética, refino de petróleo e mercado de veículos. O artigo pretende preencher a lacuna relacionada à falta de modelos abrangentes para previsões de longo prazo de H2V, especialmente em relação ao desenvolvimento de veículos a hidrogênio. Três cenários foram considerados: um cenário de referência sem veículos a hidrogênio, um cenário de competição com a entrada de veículos a hidrogênio no mercado e um cenário de saída de veículos a combustíveis fósseis. O modelo capturou o crescimento dos veículos, especialmente a substituição de veículos a combustíveis fósseis por elétricos (Huang; Li; Wu, 2022).

Nas análises dos subsistemas, observou-se que o volume de produção de diesel está em declínio, enquanto a produção de gasolina deve atingir o pico em breve. Paralelamente, a produção de amônia sintética mostrou um ponto de inflexão em 2016 devido às políticas de fertilizantes. Finalmente, a análise de demanda de hidrogênio revelou uma tendência de decréscimo, com um aumento esperado após 2029 devido ao crescimento de veículos a hidrogênio, com a demanda mínima de hidrogênio mantida em torno de 9,4 milhões de toneladas, influenciada principalmente pela demanda na produção de amônia sintética (Huang; Li; Wu, 2022).

O estudo de Kotze *et al.* (2022) investiga os investimentos necessários para a transição do setor de veículos pesados da Nova Zelândia do diesel para o hidrogênio, focando no H2V e nos custos presentes e futuros associados a esta transição. Utilizando a abordagem de dinâmica de sistemas, os autores sugerem nove módulos, que envolvem desde o custo nivelado de produção do hidrogênio até o custo total de propriedade de caminhões movidos a hidrogênio. Um módulo chave calcula a preferência de mercado por caminhões com célula a combustível, baseando-se em fatores como custo e disponibilidade. Outros módulos importantes incluem a análise de caminhões a diesel e suas emissões associadas, bem como a demanda por hidrogênio gerada pela transição para caminhões com célula a combustível. O modelo também examina a capacidade necessária de produção de hidrogênio e os requisitos de eletricidade relacionados. Por fim, o modelo incorpora um módulo chamado dashboard, cujo objetivo é o monitoramento da resposta do sistema sob diferentes condições e utiliza distribuições triangulares para análises de sensibilidade (Kotze *et al.*, 2022).

O estudo conclui que a transição do setor de veículos pesados da Nova Zelândia para caminhões com células de combustível de hidrogênio requer investimentos entre 1,59 e

2,58 bilhões de Dólares Neozelandeses para a produção de hidrogênio e entre 4,14 e 7,65 bilhões para a eletricidade necessária. Estes investimentos possibilitariam a substituição de 71% a 90% da frota de veículos pesados por caminhões a hidrogênio até 2050. O estudo sublinha a importância de comparar esses custos com os de tecnologias alternativas de descarbonização, visando uma estratégia mais eficiente em termos de custo (Kotze *et al.*, 2022).

O artigo de Li et al. (2022) propõe um modelo de dinâmica de sistemas para avaliar o impacto das políticas de subsídio no desenvolvimento da indústria de H2V na China. O estudo simula as mudanças na capacidade instalada, retorno sobre investimento, redução de emissões de carbono, e gastos governamentais sob diferentes cenários de subsídio. Os resultados mostram que as políticas de subsídio influenciam significativamente o desenvolvimento da indústria de H2V, e uma combinação flexível de políticas de subsídio é recomendada para alinhar com o progresso tecnológico e os gastos com subsídios.

A pesquisa revela que aumentar a intensidade dos subsídios durante períodos de tecnologia de produção imatura e altos custos de produção pode estimular um crescimento rápido no tamanho da indústria de hidrogênio verde. O estudo também observa que a redução do preço da eletricidade para a produção de hidrogênio pode efetivamente promover o crescimento da capacidade instalada de hidrogênio verde. No entanto, nos primeiros 10 anos, a redução do preço da eletricidade não impulsiona rapidamente o crescimento da capacidade instalada de hidrogênio verde, devido à baixa intensidade dos subsídios governamentais, curto prazo e alta taxa de imposto (Li *et al.*, 2022).

A pesquisa conclui que as políticas de subsídios do governo para investimento, produção, preço da eletricidade para produção de hidrogênio e taxa de imposto de renda preferencial promovem o desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde em diferentes graus. No entanto, devido à limitação da quantia de subsídios para o preço da eletricidade na produção de hidrogênio, o efeito é fraco. Os subsídios proporcionais ao valor do investimento inicial mostram um efeito promocional mais forte nos primeiros 0-5 anos, mas também resultam em maiores despesas governamentais (Li *et al.*, 2022).

O estudo de Wang et al. (2022) explora a eficácia de acoplar o mercado de hidrogênio verde, o mercado nacional de comércio de carbono e o mercado de eletricidade na China. A abordagem de dinâmica de sistemas é utilizada para simular como esse acoplamento pode influenciar o preço do carbono, a geração de energia térmica e a produção de H2V. Os resultados indicam que o acoplamento pode estimular um aumento no preço do carbono, controlar a geração de energia térmica e aumentar a produção de H2V. Além disso, o estudo sugere que ajustes nos mecanismos de certificação de H2V, eliminação de unidades obsoletas e

mecanismos de leilão de cotas podem ajudar a formar um mecanismo eficaz de precificação do carbono, contribuindo para a sustentabilidade e desenvolvimento de energia limpa.

Os resultados indicam um aumento nos preços de carbono e Certificação Chinesa de Redução de Emissão, refletindo um potencial significativo para crescimento no contexto do mercado nacional de carbono. Observa-se uma tendência ascendente na produção de H₂V, considerada vital para a armazenagem e utilização de energia renovável e para alcançar a neutralização do carbono. O estudo também destaca que a eliminação de unidades térmicas obsoletas e a introdução de um mecanismo de leilão podem otimizar a estrutura do mercado de energia e apoiar a meta de neutralização do carbono (Wang *et al.*, 2022).

O estudo de Wu e Huang (2023) apresenta uma avaliação da confiabilidade de sistemas integrados de eletricidade e gás, considerando a inclusão do H₂. A pesquisa utiliza a modelagem de dinâmica de sistemas para simular diferentes cenários e avaliar o impacto do hidrogênio nas dinâmicas de fluxo de energia. Os resultados da pesquisa demonstram que a implementação do Energia para Hidrogênio e Metano aprimorou significativamente a confiabilidade dos sistemas integrados de eletricidade e gás e maximizou a utilização de energia renovável. Nos sistemas de teste, o modelo de Energia para Hidrogênio e Metano reduziu a Probabilidade de Perda de Reserva e Energia Não Suprida em até 99,72% e 99,93%, respectivamente (Wu; Huang, 2023).

Outro resultado importante é que os modelos de fluxo de gás dinâmico aprimoraram a confiabilidade dos sistemas integrados de eletricidade e gás. Nos sistemas de teste, houve reduções significativas em índices como Probabilidade de Perda de Carga, Probabilidade de Perda de Gás, Energia Não Suprida de Energia e Energia Não Suprida de Gás - variando de 0,53% a 24,63%. A adição de H₂ afetou negativamente a confiabilidade dos sistemas de gás natural devido às propriedades físicas do hidrogênio. Com o aumento das frações de hidrogênio de 0% para 20%, observou-se um aumento nos índices Probabilidade de Perda de Reserva e Energia Não Suprida de Gás, variando entre 2,45% e 3,03% nos sistemas de teste. Por outro lado, o impacto do H₂ nos sistemas de energia variou conforme o caso, com variações menores nos índices LOLP e EDNS (Wu; Huang, 2023).

Este estudo se insere em um contexto em que a produção de hidrogênio verde (H₂V) a partir de fontes renováveis é reconhecida como uma solução promissora para enfrentar os desafios globais relacionados às mudanças climáticas e à transição para uma matriz energética mais limpa. No entanto, para entender completamente o impacto e os caminhos para a produção de H₂V, é essencial considerar várias facetas interconectadas desse processo.

Em uma revisão da literatura, identificamos estudos recentes que também exploram

aspectos relevantes do H2V usando abordagens de dinâmica de sistemas. Por exemplo, Huang, Li e Wu (2022) focam em prever a demanda de hidrogênio em setores específicos, especialmente veículos a hidrogênio, na China, enquanto Kotze et al. (2022) investigam os investimentos necessários para a transição do setor de veículos pesados para o hidrogênio na Nova Zelândia. Além disso, Li et al. (2022) analisam o impacto das políticas de subsídio na indústria de H2V na China, enquanto Wang et al. (2022) exploram o acoplamento do mercado de hidrogênio verde, mercado nacional de comércio de carbono e mercado de eletricidade na China. Wu e Huang (2023) avaliam a confiabilidade de sistemas integrados de eletricidade e gás com a inclusão do H2.

Embora esses estudos sejam relevantes e contribuam para a compreensão do H2V, é importante destacar que esta dissertação se diferencia ao focar especificamente nos desafios associados ao fornecimento hídrico na produção de H2V, com uma ênfase especial na dessalinização e no reúso de água tratada. Além disso, este trabalho enfatiza a necessidade de um planejamento holístico que considere não apenas avanços tecnológicos, mas também implicações ambientais e sociais, visando garantir a sustentabilidade a longo prazo dessa indústria. Assim, enquanto os estudos anteriores abordam diferentes aspectos do H2V, esta dissertação oferece uma análise abrangente e singular da produção de H2V, priorizando o equilíbrio entre energia limpa e gestão sustentável dos recursos hídricos."

2.5 Síntese sobre o referencial teórico

O referencial teórico, ao abordar o *Nexus* Água-Energia, solidifica sua importância crescente na literatura acadêmica e na gestão de recursos hídricos e energéticos, conforme evidenciado por Ding et al. (2020). A busca por garantir acesso confiável à água e energia limpa é um fator determinante para o aumento de estudos nessa área, conforme destacado por Fontenelle et al. (2022). No contexto do Ceará, a análise das fontes de água não convencionais emerge como crucial para a viabilidade da produção de hidrogênio verde. O entrelaçamento entre desenvolvimento sustentável, economia circular e o recurso água é um pilar essencial para responder à indagação central deste estudo. A abordagem dinâmica de sistemas, por sua vez, é apresentada como uma ferramenta valiosa para desvelar essa complexa interação e identificar a fonte hídrica mais adequada para o *hub* de H2V no Ceará. Portanto, o arcabouço teórico fornecido serve como alicerce para a investigação proposta, integrando os conceitos do *Nexus* Água-Energia, fontes não convencionais de água, desenvolvimento sustentável, economia circular e dinâmica de sistemas no intuito de discernir sobre as fontes de água adequadas para

a produção de H2V no estado do Ceará.

3 METODOLOGIA

A pesquisa adota uma abordagem dinâmica de sistemas, combinando métodos qualitativos e quantitativos, com ênfase em aspectos exploratórios e descritivos. A metodologia envolve revisão bibliográfica, entrevistas e análise de documentos, incluindo estudos de impacto ambiental, planos estratégicos e legislações. Isso permitiu identificar fatores-chave no sistema de abastecimento hídrico de um hub de H2V, com a intenção de simular sua evolução ao longo do tempo por meio da dinâmica de sistemas. Enquanto isso, a gestão dos recursos hídricos no Ceará, especialmente no CIPP, é examinada devido à escassez de água na região. O CIPP é apresentado como um local viável para a instalação do hub de H2V no Ceará, dado seu potencial logístico e incentivos fiscais. A pesquisa busca entender como os fatores ambientais, sociais e tecnológicos influenciam o abastecimento hídrico de um *hub* de H2V e identificar estratégias para garantir a segurança hídrica em um contexto de crescente demanda industrial e escassez de água.

3.1 Tipologia da pesquisa

Esta pesquisa embasa-se na abordagem dinâmica de sistemas, que combina procedimentos qualitativos e quantitativos, e possui foco exploratório e descritivo. O estudo envolve revisão bibliográfica, entrevistas e análise de documentos, como estudos de impacto ambiental, planos estratégicos e legislações (Babbie, 2013). Essa estrutura permitiu identificar fatores-chave no sistema de abastecimento hídrico de um *hub* de hidrogênio verde para simular a evolução desses fatores ao longo do tempo por meio da abordagem dinâmica de sistemas (Stermann, 2000).

3.2 Gestão dos recursos hídricos no Ceará, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém e o hidrogênio verde

Os recursos hídricos são mundialmente escassos e sofrem pressões das mudanças climáticas, das atividades humanas, do desenvolvimento socioeconômico (Wang *et al.*, 2020). Em relação aos reservatórios de água, esses também estão sujeitos à variabilidade climática, que afeta o nível de água normalmente disponível (Frota *et al.*, 2022). Os recursos hídricos no estado do Ceará devem ser geridos seguindo as características do estado, que são as altas taxas

de evaporação, evaporando 2 m³ de água para 1 m² de água estocada no reservatório (Souza Filho, 2018), variabilidade interanual e sazonal no que tange às precipitações e solos rasos. Além disso, 90% do território cearense é localizada em território do semiárido nordestino (Studart *et al.*, 2021), conforme a figura 6.

Figura 6 - Localização do Ceará e região do semiárido brasileiro.



Fonte: SUDENE (2023).

A gestão hídrica do estado do Ceará é realizada pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos, que gerencia as 12 regiões hidrográficas. A Região Metropolitana de Fortaleza é abastecida pela bacia Metropolitana, que recebe água da bacia do Jaguaribe por meio do Eixão das Águas e da transposição do rio São Francisco por meio do Canal do Trabalhador (Frota *et al.*, 2022). Vinculada a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos atua no monitoramento meteorológico cearense, na avaliação dos impactos da variabilidade climática sobre os recursos

hídricos e agricultura, no desenvolvimento de sistemas de apoio à tomada de decisão para os recursos hídricos e na construção de planos de contingência de secas para reservatórios (Fundação Cearense De Meteorologia E Recursos Hídricos, 2023).

A gestão desses recursos é importante porque o estado do Ceará é escasso em água. A gestão é especialmente necessária em anos de seca, visto que a incidência de conflitos administrativos e judiciais pela água aumenta, sobretudo na região do Jaguaribe devido à transferência das águas dessa bacia, cuja água é usada para irrigação, em suma, para a Região Metropolitana de Fortaleza, a fim de suprir as necessidades humanas da região demográfica mais densa do estado do Ceará e suprir a demanda de água da indústria ali localizada, inclusive o CIPP (Frota *et al.*, 2022). Os conflitos pela água ocorrem ao longo de todo o Ceará. Em um estudo empírico identificou doze conflitos bem documentados espalhados pelas bacias cearenses, cujos principais gatilhos são o acesso a água, a quantidade de água, a qualidade da água, a alocação da água e a governança da água (Studart *et al.*, 2021). As regiões hidrográficas do estado do Ceará são expostas a seguir na figura 7.

Figura 7 - Regiões hidrográficas do estado do Ceará.



Fonte: adaptado de Companhia De Gestão De Recursos Hídricos (2018).

A falta de água é histórica para o estado do Ceará, contudo, os eventos extremos de seca estão se intensificando nos últimos anos. Por exemplo, durante o período de 2012 a 2015, o semiárido nordestino vivenciou a pior seca das últimas décadas, impactando negativamente a economia e a sociedade, expondo as pessoas a um contexto de insegurança hídrica e alimentar (Marengo; Torres; Alves, 2017; Marengo *et al.*, 2018). Portanto, a expectativa é de que água

bruta seja um recurso cada vez mais escasso nessa região, conforme apontam projeções climáticas, que preveem a redução nas precipitações e o aumento da temperatura. Isso implicará numa maior taxa de evaporação dos reservatórios e açudes e que, por fim, afetará a segurança hídrica do estado do Ceará, que não terá água disponível para os diversos usos, como sua aplicação na agricultura, na indústria, para o bem-estar populacional e entre outros (Marengo; Torres; Alves, 2017).

Por isso, a disponibilidade de água e como a indústria de H₂V afetará a gestão de recursos hídricos é um tema extremamente relevante de ser discutido, acima de tudo porque é uma indústria cuja matéria-prima principal é um dos recursos mais escassos do estado do Ceará. A relação entre a quantidade de água necessária como entrada no processo para a quantidade de hidrogênio produzida pode variar do ponto de vista estequiométrico, sendo uma relação de 9 Kg de água para 1 kg de H₂V produzido (Shi; Liao; Li *et al.*, 2020) ou variar de acordo com as especificações dos fabricantes de eletrolisadores, podendo oscilar entre 10,01 e 22,40 Kg de água para cada 1 kg de H₂ (Simões *et al.*, 2021). Caso se considere toda a pegada hídrica da produção de H₂V, esses valores podem chegar a 43 L de água para cada 1 Kg de H₂V produzido (Shi; Liao; Li *et al.*, 2020).

Quanto ao local onde o *hub* será instalado, O CIPP está localizado no município cearense de São Gonçalo do Amarante e é uma *joint venture*⁶ formada pelo Governo do Estado do Ceará, no Brasil, e pelo Porto de Roterdã, na Holanda (Complexo Do Pecém, 2022a). O CIPP surgiu a partir da necessidade de atender as demandas empresariais e criar um ambiente propício para o desenvolvimento das indústrias de base no CE, como siderurgia e geração de energia elétrica. O primeiro ato para concepção do complexo foi um levantamento ecobatimétrico da costa do Estado do Ceará, mais especificamente na Ponta do Pecém, realizado em 1995 pelo Grupamento de Navios Oceano Hidroceanográficos da Marinha do Brasil (Complexo Do Pecém, 2022c).

O CIPP tem como proposta o desenvolvimento do Estado a partir da concepção de um equipamento com alta capacidade logística, vantagens locais e incentivos fiscais para atrair investimento internacional, que é a ZPE (Lima Jr.; Mota; Alves, 2021). Além disso, conexões comerciais são importantes visto que os principais mercados consumidores do H₂V produzido no CIPP seriam os países europeus, por meio da relação com o porto de Roterdã,

⁶ Modelo estratégico de parceria comercial ou aliança entre empresas, visando desde uma simples colaboração para fins comerciais e/ou tecnológicos até a fusão de sociedades em uma única empresa, não implicando a perda da identidade e individualidade como pessoas jurídicas das participantes.

China, Japão e Coréia do Sul (Complexo Do Pecém, 2022c).

Dessa forma, o CIPP é colocado como o local mais viável no Estado do CE para a instalação do hub de H2V no Ceará, visto não somente questões de infraestrutura necessária para receber as plantas de eletrolisadores, mas também condições de logística para exportação do H2V produzido e logística para comercialização dentro do próprio CIPP, havendo a possibilidade de criar um mercado interno de H2V. Contudo, é válido salientar que a cooperação entre as empresas do CIPP é considerada incipiente, pois há uma lacuna de confiança entre elas (Abreu; Mota; Paula, 2020).

3.3 Coleta de dados: instrumentos de coleta e métodos de análise

Revisões bibliográficas sobre o *Nexus Energia-Água* e a transição energética; a cadeia produtiva de H2V, a cadeia produtiva de GNH_3 ; fontes não convencionais de água; economia circular, desenvolvimento sustentável e o recurso água; e dinâmica de sistemas; análises documentais e entrevistas foram realizadas com o intuito de fundamentar a construção do estudo e identificar o problema relacionado ao abastecimento hídrico de um *hub* de H2V no Ceará. Em seguida, entrevistas e análise de documentos subsidiaram a concepção e formulação do modelo do estudo. Ao todo, foram realizadas 8 entrevistas, que estão disponíveis nos apêndices deste trabalho. O quadro 9 expõe as entrevistas.

Quadro 9 – Entrevistas do estudo

Entrevista	Perfil	Objetivo	Aplicação	Duração (minutos)
E1	Ex-coordenador de um projeto governamental focado em H2V, e atual Coordenador de Energia em uma associação industrial	Compreender o planejamento estadual da produção de H2V quanto ao recurso água.	04/11/2022	39
E2	Pesquisadora em hidrologia envolvida na gestão hídrica estadual.	Compreender aspectos do balanço hídrico do estado do Ceará.	07/12/2022	51
E3	Pesquisador em tratamento de efluentes com foco em reutilização e recuperação de recursos.	Entender a viabilidade da água de reúso para abastecimento do CIPP.	10/05/2023	45
E4	Presidente de um complexo industrial e portuário.	Compreender aspectos promotores e barreiras para a produção de H2V.	19/05/2023	50
E5	Engenharia química associada a uma empresa de água e esgoto de uma região estadual.	Compreender aspectos da gestão de abastecimento hídrico de uma região.	07/06/2023	60
E6	Coordenador da câmara de dessalinização e reúso em uma associação nacional de engenharia.	Compreender as vantagens e barreiras para a dessalinização de água do mar e para a produção de água de reúso no Brasil.	14/07/2023	40

E7	Especialista em engenharia com foco em hidrogênio verde e fertilizantes N e P.	Levantar informações sobre as principais variáveis tecnológicas que influenciam a produção de H2V.	24/07/2023	56
E8	Pesquisador em Ecologia Marinha, e estudos de Impactos Ambientais no meio aquático.	Mapear as questões chave quanto aos aspectos ambientais e sociais relativos à dessalinização de água do mar.	27/07/2023	50

Fonte: dados da pesquisa (2023)

Quanto à análise documental, os documentos selecionados para isso são descritos a seguir. Com o intuito levantar informações gerais sobre a produção de H2V no Estado do Ceará, foram analisados os Diários Oficiais do Estado do Ceará e *websites* do governo do Estado do Ceará e das empresas que assinaram Memorandos de Entendimento. Os Diários Oficiais do Estado do Ceará são disponibilizados no *website* da Casa Civil do Governo do Estado do Ceará e os filtros utilizados para a busca foram o período de 01/01/2020 até o dia 05/06/2023, a frase escolhida foi “hidrogênio verde” e a opção marcada no *site* foi “exatamente a frase”. A busca resultou em 20 diários oficiais publicados que, em algum momento, decidem algo sobre H2V, como o estabelecimento de uma equipe multidisciplinar e estratégica para avançar com as questões do H2V no Ceará, estabelecimento de parcerias entre o governo do Estado do CE e organizações privadas e os ME de investimento de plantas de H2V no Estado do CE.

Além disso, foram analisados o Plano de Gestão Estratégica e de Negócios da CAGECE (2019 – 2023) (PGECE) e o Plano de Ações Estratégicas dos Recursos Hídricos do Ceará (2018 – 2027). A análise desses documentos teve como objetivo investigar diretrizes de atuação do Governo do Estado no âmbito da gestão dos recursos hídricos (CEARÁ, 2018). O PAERHCE possui vigência de 2018 a 2027 e foi confeccionado pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará com participação de suas instituições vinculadas, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos e a Superintendência de Obras Hidráulicas. Também contribuíram para a elaboração do PAERHCE, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará.

A Lei estadual Nº 16.033 de 20/06/2016, que dispõe sobre a política de reúso de água não potável no âmbito do Estado do Ceará, também foi analisada para permitir a compreensão dos aspectos legais da produção e utilização de água de reúso no Estado do Ceará. Tanto o PAERHCE, o PGECE e a Lei Nº 16.033 de 2016 apontam a água de reúso como opção viável para uso industrial. Análise do Estudo de Impacto Ambiental e do Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) da Empresa Fortescue Future Industries e do *hub* de Hidrogênio Verde no CIPP permitiram entender como o sistema de produção de H2V está sendo

planejado no Ceará. Por fim, uma visita técnica ao CIPP e à planta piloto de produção de H2V da EDP realizada no dia 31/03/2023 subsidiaram a compreensão prática da cadeia produtiva do H2V.

Após a concepção e formulação do modelo, foi possível realizar simulações e identificar o comportamento das variáveis ao longo do tempo, por um período entre os anos de 2026 e 2036. Ferramentas da dinâmica de sistemas, o CLD e SFD, foram aplicadas para estudo do sistema, sugerindo ações de abastecimento hídrico de um *hub* de H2V no Ceará. O *software* utilizado para viabilizar a modelagem foi o Stella Professional, fornecido pela empresa Isee Systems.

Um quadro síntese cujo objetivo é expor como os objetivos específicos guiaram o trabalho de investigação das possíveis fontes de abastecimento hídrico de um *hub* de H2V no Ceará é apresentado. No quadro é possível identificar as fases de aplicação da abordagem dinâmica de sistemas, quais instrumentos foram utilizados para viabilizar essa fase, as principais referências que subsidiam os processos e uma consideração que resume os principais achados. O quadro 10 está disposto a seguir:

Quadro 10 – Amarração metodológica baseada em dinâmica de sistemas.

Objetivo específico atendido	Fase	Instrumentos	Referências	Considerações
a) identificar as possíveis fontes de água para abastecimento do hub de H2V no Ceará.	Identificação do problema	Bibliografia científica	Australia (2022); Fortes <i>et al.</i> (2022); Salgot e Folch (2018) e Simões <i>et al.</i> (2021).	Destaca a importância de considerar a água como recurso crítico para em <i>hub</i> de H2V e ressalta a dessalinização de água do mar e a água de reúso como principais fontes de abastecimento hídrico para um <i>hub</i> de H2V.
		Análise Documental	Diários Oficiais do Estado do Ceará e <i>websites</i>	Estima quantidade de H2V a ser produzida no Ceará.
			PAERHCE, PGECAGECE e Lei estadual Nº 16.033 de 20/06/2016	Demonstra que a água é uma questão sensível para o Ceará e que a água de reúso e a dessalinização de água do mar são alternativas para abastecimento hídrico industrial no Estado.
		Entrevista	E1, E2, E5	
b) montar um diagrama de retroalimentação causal que demonstre as relações entre as variáveis presentes no sistema de abastecimento hídrico de um hub de H2V no Ceará; c) formular um modelo matemático de estoques e fluxos que represente a produção de hidrogênio verde por meio de diferentes fontes hídricas de abastecimento no Ceará.	Construção e formulação do modelo	Entrevista	E3 e E6.	Expõe aspectos da viabilidade operacional, social e ambiental da dessalinização e reúso de água para abastecimento de um <i>hub</i> de H2V.
			E4.	Explica sobre a concepção da cadeia de valor do H2V e sobre o planejamento do abastecimento hídrico para o <i>hub</i> de H2V no Ceará
			E7.	Destaca o panorama geral da produção de H2V no Brasil e como as alternativas tecnológicas influenciam no âmbito ecológico e social.
			E8	Expõe os possíveis impactos que a dessalinização de água do mar pode ocasionar no sistema ecológico e social.
		Análise documental	EIA/RIMA do <i>hub</i> de H2V no CIPP e da Fortescue e bibliografia científica.	Levantamento de dados técnicos dos projetos de instalação e operação de plantas de H2V no CIPP.
		Visita técnica	Visita técnica a uma planta piloto de produção de H2V.	Expôs aspectos tecnológicos e práticos que devem ser considerados na produção de H2V.
d) propor a fonte de abastecimento hídrico mais viável para o abastecimento do hub de H2V no Ceará.	Análise e validação do modelo	CLD e SFD	Sterman <i>et al.</i> (2000) e Duggan (2016)	Apontam a relação entre as variáveis e como o sistema pode se comportar ao longo do tempo.
	Design de ações	SFD	Sterman <i>et al.</i> (2000)	Identifica a fonte hídrica de abastecimento de um <i>hub</i> de H2V no Ceará quanto à disponibilidade da água e a quantidade de resíduos gerados.

Fonte: dados da pesquisa (2023)

Através de uma combinação de revisões bibliográficas, análises documentais, entrevistas e uma visita técnica, proporcionou uma rica base de dados para a montagem do sistema de produção de H2V em um *hub* do Ceará. A implementação de ferramentas avançadas, como o CLD e o SFD evidenciam fatores relevantes para a gestão do sistema de abastecimento hídrico para um *hub* de H2V no Ceará.

4 RESULTADOS - FASES DE APLICAÇÃO DA ABORDAGEM DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Nesta subseção são apresentadas as fases de aplicação da abordagem dinâmica de sistemas utilizada para investigar possíveis fontes de água não convencionais para a produção sustentável de hidrogênio verde no Ceará por meio de dinâmica de sistemas. As etapas são: (1) identificação do problema, (2) construção do modelo, (3) formulação do modelo, (4) análise e validação do modelo e (5) *design* de ações.

4.1 Fase 1: identificação do problema e levantamento de dados para subsidiar as etapas posteriores

Os principais fatores para a produção de H2V incluem a transição energética e sustentabilidade, segurança energética e preço. O Brasil é um importante ator na cadeia de valor do H2V devido a sua rede estável e baixas taxas de emissão de GEE, neutralidade em conflitos, comprometimento em relações comerciais internacionais e potencial de aumento de produção de energia renovável. No entanto, a falta de regulamentação técnica do H2V pela União Europeia é um entrave para a formalização de acordos comerciais do produto. Os principais impasses são decorrentes de discussões sobre a composição da rede elétrica e a quantidade de carbono indireto emitido durante o processo produtivo do H2V.

Hoje o mercado de H2V é puxado por uma demanda potencial da Europa, que vinha num processo de transição energética e com a guerra da Ucrânia, por uma questão de segurança energética, acelerou [...]. Para garantir que o H2V comece a ser produzido, é necessário ter um preço competitivo, um produto sustentável e que venha de fornecedores confiáveis. [...] Contudo, contratos não são fechados porque a Europa ainda não definiu o que é H2V (E4);

O Brasil possui um sistema de transmissão de energia integrado que permite a recepção de energia renovável de várias regiões. Ao contrário do Chile, que tem sistemas isolados de energia solar e eólica, o Brasil pode acoplar várias fontes, facilitando a produção contínua de hidrogênio verde. Essa capacidade de operação contínua e sem intermitência é uma vantagem única do Brasil (E7).

O Ceará tem cerca de 30 ME assinados com empresas privadas que pretendem investir na produção de H2V no CIPP. Além disso, em visita técnica ao CIPP, foi informado que quatro empresas possuem contrato assinado com o CIPP e estão em fase de confecção ou aprovação de projetos de engenharia e de impacto ambiental. Essas empresas e as expectativas de início de produção de H2V são: (1) Casa dos Ventos em 2026, (2) EPD em 2027 e (3) Fortescue e AES Brasil em 2028. Isso coloca o Ceará em um estágio compatível com o restante do mundo, visto que as iniciativas globais ou estão em fase de estudos de viabilidade ou em

assinaturas de memorando, o que adiciona um caráter de risco e incerteza para a materialização de contratos para a produção do H2V (IRENA, 2022).

Dos 20 Diários Oficiais do Estado do Ceará coletados, apenas o ME com a empresa Qair Brasil especifica valores para a planta de H2V (CEARÁ, 2021). Para encontrar informações sobre projetos de H2V no Ceará, foram consultados websites institucionais do Governo do Estado do Ceará, das empresas e o EIA/RIMA da Fortescue Future Industries (Fortescue). Contudo, além da Qair, foi possível coletar dados de produção de H2V anual da Transhydrogen, Enegix, Casa dos Ventos, Cactus Green Energy (Cactus), Fortescue e AES Brasil. A tabela 2 mostra a quantidade de H2V que as empresas pretendem produzir no Ceará em toneladas por ano.

Tabela 2 - Valores de produção de H2V no Ceará segundo Memorandos e EIA/RIMA da Fortescue.

Empresa	Quantidade (ton./ano)	Referência	Empresa	Quantidade (ton./ano)	Referência
Qair	296.000	CEARÁ (2021)	Cactus	200.000	Cactus (2022)
Transhydrogen	500.000	Transhydrogen (2022)	Fortescue	305.000	Fortescue (2023)
Enegix	615.000	Enegix (2021)	AES Brasil	141.000	AES Brasil (2022)
Casa dos Ventos	365.000	CIPP (2022a)	Total	2.422.505	-

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O valor anual de cerca de 2,5 milhões de toneladas de H2V produzidos diz respeito a informações coletadas por meio de variadas fontes, contudo, o EIA/RIMA da Fortescue, em consta que há dados mais atuais da produção projetada de H2V por ano para o CIPP, sendo ela de 900.000 toneladas (Fortescue, 2023), valor 2,7 vezes menor que o somatório apresentado na tabela 2. De todo modo, esses valores representam uma quantidade de água considerável para uma localidade que historicamente sofre de escassez hídrica. A tabela 3 compila a quantidade de água necessária para H2V por ano.

Tabela 3 - Fontes hídricas e quantidade necessária de água para produção de H2V.

Pressupostos	Fonte hídrica	Água necessária (m ³ /ano)	Referência
Total de H2V produzido: 900.000 toneladas por ano; Eletrolisador: pilhas PEM no começo de vida e sistema de resfriamento evaporativo.	Água superficial	59.220.000	Austrália (2022)
	Água subterrânea	82.440.000	
	Água de reúso	113.310.000	
	Água do mar	118.890.000	
Total de H2V produzido: 900.000 toneladas por ano;	Água superficial	13.500.000,00	

Eletrolisador: pilhas PEM no começo de vida e sistema de resfriamento sem perda de calor.	Água subterrânea	15.840.000,00	Austrália (2022) e E8
	Água de reúso	22.770.000,00	
	Água do mar	22.860.000,00	

Fonte: dados da pesquisa (2023)

É notório que a depender da tecnologia de resfriamento, o consumo de água pode tornar-se maior. As duas únicas formas de garantir acesso a água durante o ano são por meio da estocagem de água nos reservatórios e por meio da perfuração de poços, pois os rios cearenses são naturalmente intermitentes; há alta variabilidade anual de chuvas no Estado do Ceará, o que torna a previsão de precipitação extremamente desafiadora; e há alta taxa de evaporação. Portanto, depreende-se que não é possível utilizar águas dos reservatórios cearenses para abastecer o *hub* de H2V, apesar de as operações do CIPP serem abastecidas pelo Castanhão, maior reservatório do Ceará. Contudo, a AES Brasil considera adquirir água de um fornecedor local (Fortescue, 2023).

Os rios no Ceará são intermitentes e a única forma de ter água é armazenando água do período chuvoso. No CE, cerca de 80% do solo é cristalino, então a água subterrânea é limitada e salobra. [...] Durante a seca, a água do Castanhão foi destinada substancialmente para Fortaleza. Isso causou a falência de pequenos negócios, principalmente de agricultura que dependiam da água, e o empobrecimento da região do Castanhão (E2).

Isso expõe o impacto significativo que a falta de água pode ocasionar para a população cearense, caso o abastecimento de água do *hub* de H2V não seja bem planejado. A discussão sobre a aplicação da água de reúso no Ceará é um tema discutido há pelo menos uma década, sendo tratado pela Lei Nº 16.033 de 20/06/2016, que incentiva essa fonte para uso industrial. O governo do Ceará e o CIPP estão promovendo o abastecimento do *hub* de H2V por meio de água de reúso, uma iniciativa prevista no PAERHCE para fornecer água de reúso prioritariamente para atividades industriais do Ceará. A Estação Produtora de Água de Reúso (EPAR) será gerenciada pela empresa Utilitas Pecém, abastecida por 10 ETEs localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza e serão responsáveis por fazer o tratamento secundário dos efluentes e enviará água para a EPAR, que fará o tratamento terciário, condicionando o efluente em uma água de mesmo nível de qualidade que a água bruta fornecida pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. A EPAR será gerenciada pela Utilitas Pecém, empresa fruto de uma parceria público-privada entre PB Construções e a CAGECE. A Utilitas Pecém atua no CIPP desde 2021 na coleta, tratamento e lançamento dos efluentes industriais no mar, possuindo capacidade de vazão de 600 m³/h e com capacidade instalada para lançar até 1.500 m³/h.

Quanto ao consumo de água pela Região Metropolitana de Fortaleza, este varia entre 10 m³ e 15 m³ por segundo a cada mês. Contudo, apenas 3 m³ por segundo são capturados

e tratados. Desses 3 m³ por segundo, as 10 ETEs que direcionarão água para a EPAR são capazes de capturar 1,15 m³ por segundo, havendo a possibilidade de que essa capacidade instalada se expanda até 1,6 m³ por segundo. Comparativamente ao processo de dessalinização de água do mar, a produção de água de reúso é um processo menos caro, por isso seria vantajoso do ponto de vista econômico. Outra vantagem é o baixo impacto ambiental de seu resíduo, o lodo, quando comparado ao impacto ocasionado pela salmoura, rejeito do processo de dessalinização da água do mar. Os entrevistados complementam:

Por exemplo, a água de Fortaleza vem da região do Jaguaribe. E, na época da seca, depois de 2011, o Jaguaribe não teve mais água. E foi nesse contexto que surgiu a ideia da EPAR, da Água de reúso (E5);

A CAGECE possui estações descentralizadas que serão conectadas para tratar o esgoto na EPAR. Algumas dessas unidades estão suficientemente próximas para fornecer água em uma certa quantidade para o *hub* possa iniciar a operação. O custo de produção da água de reúso da Aquapolo é de 10 reais por metro cúbico, enquanto aqui o custo pode ser pouco mais da metade disso. Embora seja mais caro do que a água da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (água bruta), não estamos buscando competir com a água para consumo humano. Com o aumento da cobertura de esgoto na Região Metropolitana de Fortaleza, faz sentido aproveitar esse recurso (efluente) disponível (E4). Como estratégia de backup, é considerado utilizar água bruta.

Captar alguns efluentes das estações da CAGECE, fazer um enquadramento desses efluentes de acordo com um certo nível de qualidade e caso seja necessário cada planta fará um processo adicional de acordo com sua necessidade. O lodo pode ser reaproveitado ao invés ser enviado para aterros sanitários, mas as possibilidades de reaproveitamento dependem da rota tecnológica (E3).

Se a gente pensar em um efluente sanitário, a quantidade de sais é muito menor do que a de água do mar. Então o consumo energético é menor também, mas o reúso de efluentes depende muito dos contaminantes presentes e de onde vem o efluente (E6); Dada a escassez de água doce na região do Nordeste do Brasil, eu não tenho dúvidas de que a água de reúso é a opção mais interessante de ser adotada, sem dúvidas. Em termos gerais, o custo de tratamento de um metro cúbico de água doce, seja de um rio ou lago, ou de água de reúso, é de cerca de dois dólares. No entanto, se você optar por usar água do mar e dessalinizá-la, esse custo pode aumentar para cinco ou seis dólares por metro cúbico (E7). A localização do PECÉM, perto de uma região metropolitana como o Ceará, permite o uso de água de reúso, uma vantagem em comparação com lugares como o deserto do Atacama no Chile, onde a única opção é usar água do mar devido à falta de grandes cidades.;

O reúso de água é, sem dúvida, a melhor alternativa. Ele não apenas reduz a poluição, mas também permite o uso industrial da água. Em relação aos impactos da dessalinização, eles são incertos por uma série de razões. Portanto, o reúso de água se destaca como a opção mais viável e sustentável (E8).

A efeitos de comparação entre o preço de água de reúso, cerca de 5 reais por m³, e o preço de água bruta vendido pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos às indústrias, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos estabelece na resolução N°01/2022, de 28 de janeiro de 2022, que o preço por m³ de água bruta destinada para a indústria é de R\$ 3,28 com o fornecimento de água com captação e adução completa a ser realizado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos ou de R\$ 0,952 por m³ com o fornecimento de água com captação e adução completa ou parcial, por parte do usuário a partir de mananciais, tipo rios, açudes e

canais. A resolução, de modo geral, dispõe sobre a cobrança pelo uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos de domínio do estado do Ceará ou da união, por delegação de competência. (Ceará, 2022c). Apesar de a utilização de água de reúso representar uma solução interessante para o abastecimento do hub de H2V, algumas oportunidades de aplicação da EC se perdem, pois nenhuma das 10 ETEs que direcionarão água para a EPAR foram projetadas com tratamento anaeróbio e nem recebem efluentes o bastante para que a produção de energia a partir do lodo, o biogás, seja aplicada.

As ETEs do Ceará não possuem escala para produzir biogás [...]. Quanto ao custo, a água de reúso encarece devido à limpeza e à troca das membranas e da quantidade de energia empregada no processo (E3);

O reúso possui limitação quantitativa. Por outro lado, a água do mar é abundante, por isso há uma tendência maior pela dessalinização de água do mar (E6);

A dessalinização de água do mar é considerada como uma opção real para abastecimento das plantas de H2V, principalmente para as empresas *Fortescue* e Qair Brasil, que possuirão plantas próprias de dessalinização (Fortescue, 2023). A quantidade de água disponível para o processo de dessalinização é uma das maiores vantagens da dessalinização de água do mar, além disso, você não depende de outros atores, como o Governo, para ter disponibilidade de água. Além disso, a solução de água dessalinizada parece ser mais simples, caso a demanda por H2V aumente. Os entrevistados complementam:

A dessalinização de água do mar pode ser menos complexa do que a implantação e combinação de ETEs. Além disso, a disponibilidade hídrica é maior e, caso seja necessário aumentar a produção no futuro, isso pode ser mais fácil do que com as ETEs, que dependem de uma população maior para gerar mais efluentes (E6);

Água do mar não falta, mas de qualquer maneira, teríamos que dimensionar os impactos ambientais (E1);

A tendência parece ser a dessalinização, pois o reúso de água depende do Governo, que pode ser lento e ineficiente. As empresas podem não querer esperar pelo Governo e optar pela dessalinização porque depender do Governo pode acarretar maiores custos (E8);

Se consideramos apenas variáveis econômicas, a dessalinização de água do mar é menos viável, mas talvez devêssemos pensar sobre o que impede as empresas de considerar a água de reúso. Pode haver dificuldades ou riscos associados aos contratos com o poder público ou inseguranças jurídicas na legislação. Portanto, a resposta pode não estar apenas no lado econômico-financeiro, mas também no chamado “custo Brasil” (E7).

Um fator importante de ser considerado é o impacto que o rejeito da dessalinização pode ocasionar, caso ele não receba o devido tratamento. Portanto, é importante que o tratamento do resíduo seja considerado no projeto de engenharia, em ambas as fontes não convencionais de água, mas o resíduo da dessalinização de água do mar, a salmoura, emergiu como algo mais preocupante do que o lodo para alguns dos entrevistados, pois a salmoura pode ocasionar perda da biodiversidade marinha. Além disso, uma planta de dessalinização de água do mar pode afetar outros usos do ambiente marinho. O EIA/RIMA da *Fortescue* afirma que serão despejados no mar 66 quilogramas/m³ em uma vazão de 0,7 m³/seg. O consumo energético de uma planta de dessalinização de água do mar é o principal gargalo:

Para que a dessalinização de água do mar seja vantajosa, é preciso de um maior volume para poder se compensar o investimento (E4).

O rejeito possui uma salinidade muito alta, quase o dobro do valor normal da água do mar, pode afetar os ecossistemas marinhos, além de ser rico em metais pesados e

outros elementos tóxicos. A salmoura, devido à sua densidade, tende a afundar e impactar os ecossistemas do fundo do mar, que são ricos em biodiversidade, incluindo recifes de corais, bancos de gramas marinhas e bancos de algas calcárias. Esses ecossistemas são vitais para várias espécies, como o peixe-boi e a lagosta. É importante notar que a costa marinha do Ceará é dinâmica e isso pode influenciar na dispersão da salmoura, diluindo a concentração em alguns lugares, mas aumentando a salinidade em outros. Portanto, é crucial considerar esses impactos ao avaliar as opções de dessalinização, principalmente porque muitas pessoas sobrevivem da pesca (E8);

Movimentos sociais podem se opor à dessalinização devido ao impacto na carcinicultura e na pesca. As maiores barreiras para a dessalinização podem ser ambientais e sociais, algo que é discutido na Espanha e em Israel (E2);

O processo de dessalinização deve considerar um sistema de dispersão da salmoura no oceano para não afetar significativamente a vida marinha. A dessalinização da água do mar tem um custo energético alto. No entanto, plantas mais antigas consumiam cerca de 4 kWh/m³, mas as plantas atuais consomem em torno de 2,8 kWh/m³ (E6);

Os motivos para a preferência da água de reúso em detrimento da água de dessalinizadora são: (1) disponibilidade a curto prazo, visto que a Região Metropolitana de Fortaleza consome uma quantidade de água compatível com as necessidades do *hub* de H2V, pelo menos em uma primeira fase; (2) viabilidade operacional, pois o abastecimento do CIPP por esse tipo de água é estudado e discutido há pelo menos uma década (CEARÁ, 2018; CAGECE, 2019); (3) viabilidade financeira, dado que o investimento em uma dessalinizadora necessitaria de uma larga escala de m³ para compensar o custo em comparação com o investimento em uma EPAR; (4) tecnologia, uma vez que remover a condutividade de efluentes do que de água do mar é mais acessível; e (5) impactos ambientais, visto que os impactos negativos de uma planta de dessalinização são maiores do que os de uma EPAR.

Contudo, manter a produção de água sob controle da empresa, não dependendo do governo como fornecedor do insumo hídrico, e ter uma disponibilidade quase que infinita de água para produção de H2V parecem ser motivos suficientes para que o investimento em plantas de dessalinização de água do mar ocorra. Isso está presente no EIA/RIMA do *hub* de H2V do CIPP, em que se expõe que o consumo de água do mar para o processo de eletrólise será de 6,5 milhões de metros cúbicos por ano, enquanto o de água de reúso será de 650 mil metros cúbicos por ano (CIPP, 2023). No CIPP, a planta piloto de produção de H2V da EDP está em operação. O mercado de atuação principal da EDP é a produção de energia elétrica por meio da combustão de carvão mineral. Para operar, a empresa utiliza água bruta, que é comprada da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. Parte dessa água é recuperada e reutilizada em diversos outros fins, sendo um deles o abastecimento parcial ou total da planta de piloto de H2V.

Indo além da questão da fonte não convencional de água para o abastecimento do *hub* de H2V, alguns comentários emergiram a partir da estratégia cearense em priorizar apenas

o mercado internacional, enquanto o mercado nacional brasileiro pode ser abastecido pela amônia verde Cearense.

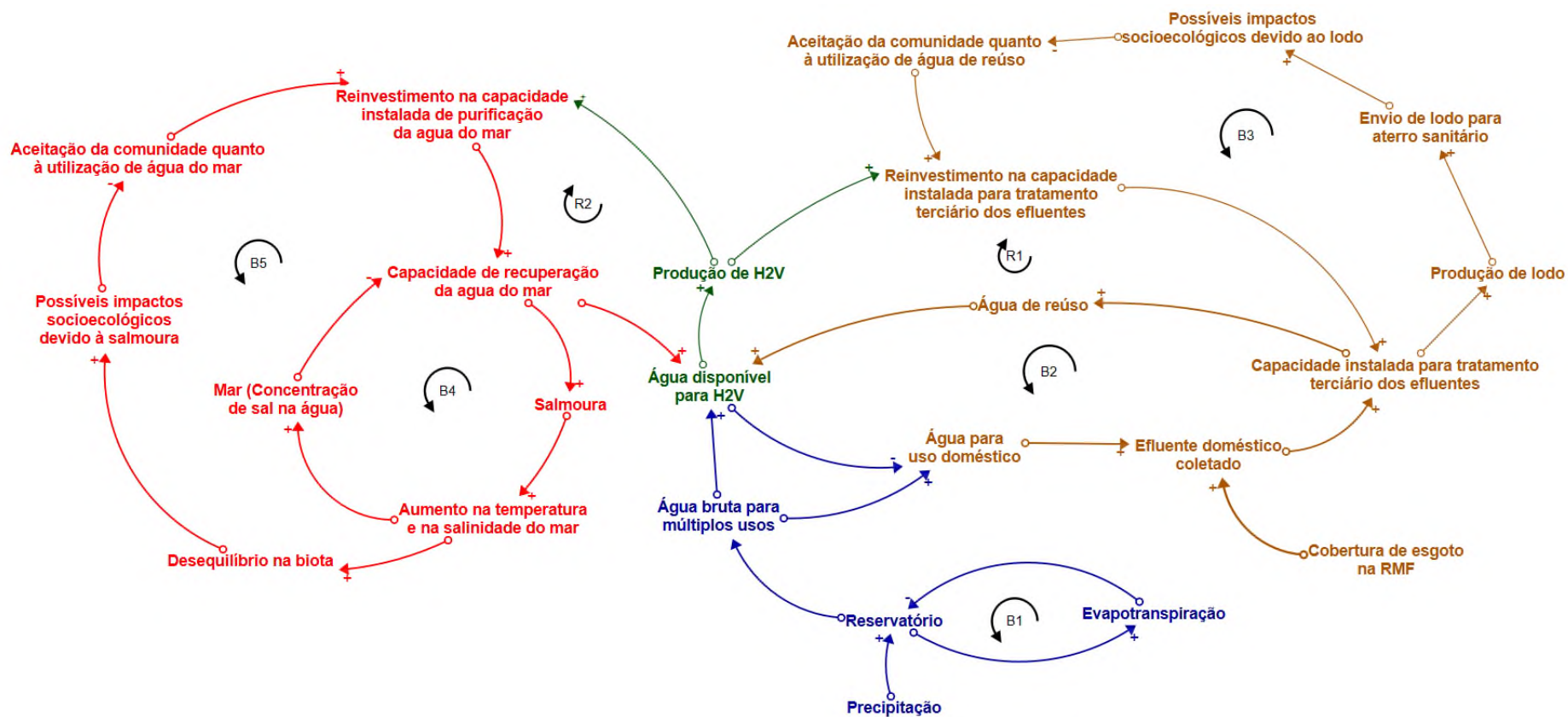
Para uma indústria de hidrogênio verde sustentável no Brasil, é crucial gerar demanda interna. Isso pode ser feito através da produção de fertilizantes verdes, ajudando a limitar a expansão agrícola e evitar o desmatamento. Além disso, a utilização de fertilizantes verdes no Brasil pode reduzir a dependência de importações da Rússia e da China. A produção de fertilizantes verdes a partir de hidrogênio verde pode ser uma solução para esse desafio (E7).

A partir das entrevistas, infere-se que a água é um recurso escasso no Ceará, que a utilização de água bruta para o abastecimento de um *hub* de H2V pode ter implicações socioeconômicas severas, piorando os indicadores em épocas de seca e que as fontes de abastecimento hídrico não convencionais cotadas para abastecer um *hub* de H2V no Ceará são a dessalinização de água do mar e a água de reúso.

4.2 Fase 2: construção do modelo.

A partir da análise dos documentos e das entrevistas foi possível identificar as variáveis mais importantes relativas a cada fonte hídrica para o abastecimento do *hub* de H2V e quais os impactos socioecológicos associados a cada rota tecnológica. A figura 8 apresenta o CLD elaborado, em que é possível observar os três módulos em cores diferentes e como as variáveis de cada um desses módulos se relacionam.

Figura 8 - CLD do mapeamento de fontes hídricas para a produção de H2V no Ceará.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

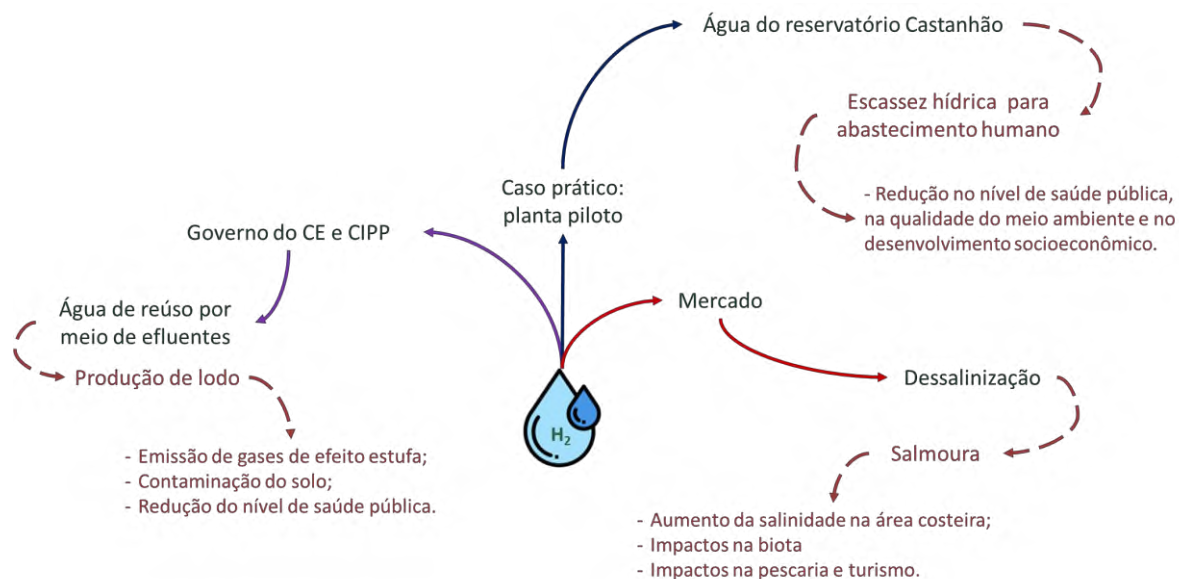
A partir do CLD, observa-se como as três fontes de abastecimento hídrico podem ser consideradas para o abastecimento do *hub* de H2V e que impactos podem suceder a partir da escolha tecnológica de fonte de abastecimento para o *hub* de H2V. No *loop* B1, que diz respeito a atual e única fonte de água disponível no Ceará para os diversos usos, há um balanço ocasionado pela evapotranspiração de água, o que implica em menos água bruta para múltiplos usos.

No *loop* B2, mapeou-se a possibilidade de menos água ser direcionada para uso doméstico caso ela seja enviada para a indústria de H2V. Outra variável importante nesse *loop* é a quantidade de esgoto coletado, pois um aumento na cobertura de esgoto da Região Metropolitana de Fortaleza acarretaria um aumento na oferta de efluentes. O *loop* R1 mostra que o aumento da produção de H2V pode influenciar no aumento da capacidade instalada de produção de água de reúso. O *loop* B3 equilibra o sistema de produção de água de reúso, visto que impactos socioecológicos decorrentes da operação da EPAR, como o aumento da emissão de GEE e maior necessidade de aterros sanitários, podem influenciar na redução da aceitação social dessa fonte não convencional de água. O aumento na produção de lodo ocasiona um aumento de riscos de vazamento do resíduo, que culminaria na contaminação do solo, o que pode contribuir para redução da saúde pública.

Por outro lado, no sistema de dessalinização de água do mar, o *loop* B4 expõe os efeitos de destinar a salmoura no mar, com um possível aumento na salinidade da água do mar, o que prejudica a retirada dos sais ou aumenta a necessidade de energia para o processo. O *loop* R2 reforça a lógica de que quanto maior for a produção de H2V, maior será o reinvestimento na capacidade instalada de dessalinização de água do mar. Em contrapartida, o *loop* B5 demonstra que um aumento nessa capacidade instalada pode acarretar impactos socioecológicos na biodiversidade marinha cearense, o que gera um distúrbio em atividades como turismo e pesca, que consequentemente reduzirá a aceitação da comunidade quanto ao uso de dessalinização de água do mar e reduzirá o reinvestimento nesse tipo de fonte não convencional de água.

O CLD elaborado captura uma diversidade de fatores que foram destacados nas entrevistas e nos documentos e representa de forma satisfatória as necessidades empíricas de um sistema socioecológico. A partir do CLD, este estudo propõe na figura 9 um *framework* das fontes hídricas de abastecimento do *hub* de H2V e dos possíveis impactos socioecológicos.

Figura 9 - Fontes hídricas para abastecimento do *hub* de H2V e possíveis impactos socioecológicos compilados.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

Apesar de o CLD ser bastante importante para entendermos o que acontecerá com o sistema caso uma das variáveis oscile, esta ferramenta não consegue capturar o que realmente acontece com o sistema. Por isso, a ferramenta SFD é importante para descrever o comportamento das variáveis ao longo do tempo (Stermann, 2000).

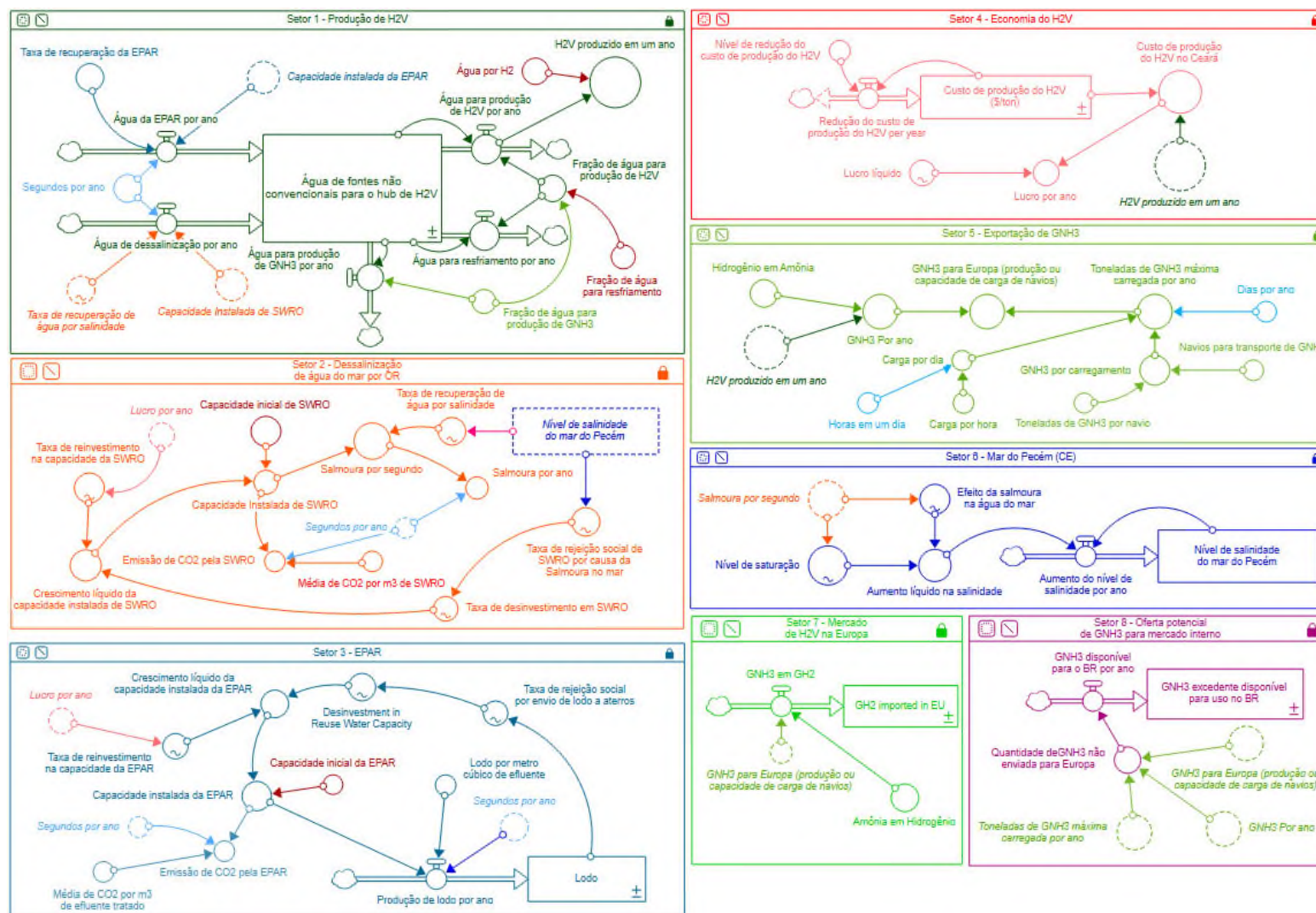
4.3 Fase 3: formulação do modelo.

A partir das entrevistas, da análise dos documentos e do CLD, foi possível formular um modelo capaz de descrever o sistema de operação de um *hub* de H2V no Ceará. As projeções são realizadas entre os períodos de 2026, início esperado de operação da planta de produção de H2V da Fortescue, e 2036. O modelo é composto por oito setores, sendo o setor 1, que captura a produção de H2V no *hub* (GHHP); o setor 2, que captura o sistema de dessalinização de água do mar por osmose reversa (SWRO), o setor 3, que captura o sistema de produção de água de reúso (RWPO), o setor 4, que captura o módulo econômico, o setor 5, captura a exportação de amônia verde, o setor 6, que captura os efeitos da deposição de rejeitos provenientes do processo de osmose reversa no mar, o setor 7, que captura a quantidade potencial de amônia verde enviada para a Europa; e o setor 8, que captura a oferta potencial de amônia verde que pode ser consumida no Brasil.

O modelo simula o *hub* de H2V no CIPP, localizado no Estado do Ceará, considerando a capacidade instalada de produção de água por meio de fontes não convencionais

e a quantidade de resíduo gerado nesse processo, a transformação do H₂V em GNH₃ para permitir sua exportação para a Europa e o excedente de produção da GNH₃ que pode ser direcionado para consumo no Brasil. O modelo de SFD apresentado neste subtópico permite a visualização de vários cenários de produção de H₂V de acordo com a escolha de algumas alternativas tecnológicas e provê uma melhor visualização da produção de H₂V a partir de fontes não convencionais de água. A figura 10 apresenta o modelo de SFD desenvolvido no estudo.

Figura 10 - Modelo de SFD para a produção de H2V a partir de fontes não convencionais de água.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

O modelo assume que a produção de H2V é determinada pelas seguintes variáveis:

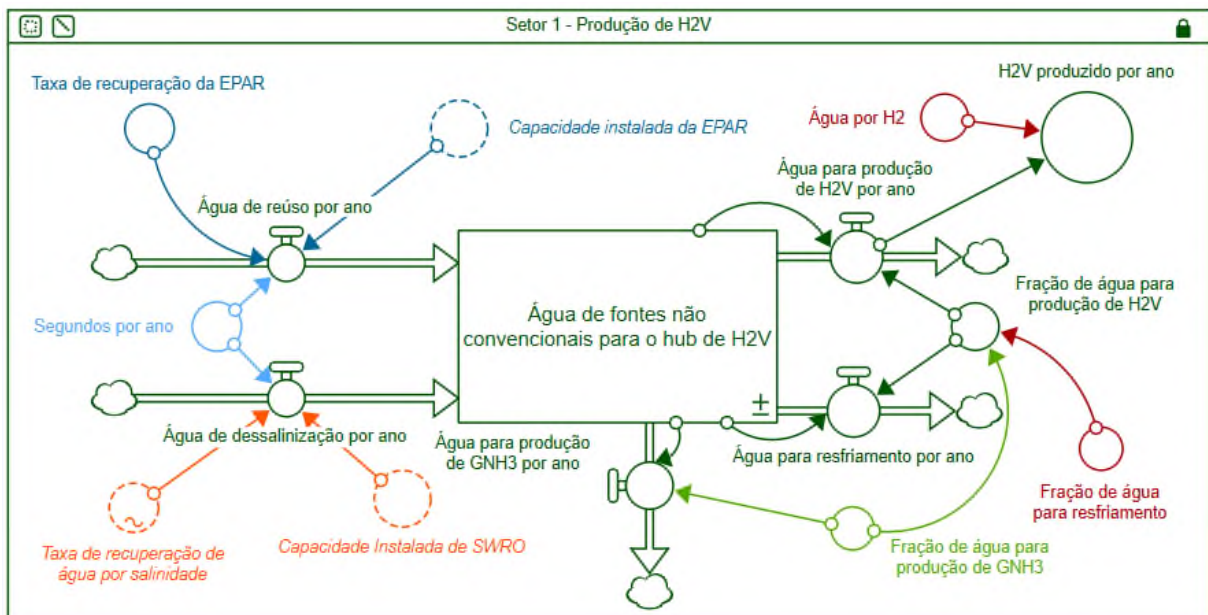
- capacidade inicial da planta de dessalinização de água do mar por osmose reversa (SWRO): proveniente de análise documental dos EIA/RIMA da Fortescue e do CIPP;
- capacidade inicial da EPAR: proveniente de análise documental dos EIA/RIMA da Fortescue e do CIPP;
- água por H₂: proveniente de Simões *et al.* (2021).
- fração de água para o resfriamento: proveniente de análise documental dos EIA/RIMA da Fortescue e do CIPP e entrevista E7.

Estas variáveis são destacadas em vermelho escuro na figura 10.

4.3.1 Setores do modelo de SFD do estudo

O setor 1 diz respeito a projeção de produção de o H2V, que é calculada a partir da quantidade de água disponível por meio da oferta de água de reúso e de água do mar dessalinizada e a partir dos usos para resfriamento, produção de H2V propriamente dita e produção de GNH₃. A figura 11 apresenta o setor 1 e as variáveis que o compõe.

Figura 11 - setor 1 – produção de H2V



Fonte: dados da pesquisa (2023).

As equações e parâmetros do setor 1 estão disponíveis na tabela 4:

Tabela 4 - Equações e parâmetros do setor 1.

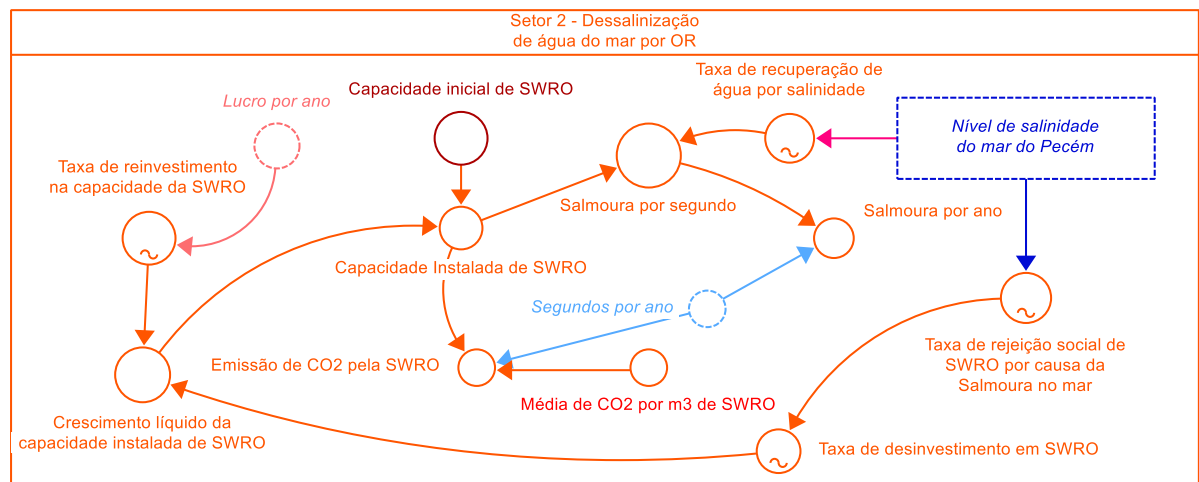
Sector 1 - Produção de H2V	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
Água da EPAR por ano	Capacidade instalada da EPAR*Taxa de recuperação da EPAR*Segundos por ano	m ³ de água/Ano	-
Água de dessalinização por ano	Segundos por ano*Taxa de recuperação de água por salinidade*Capacidade Instalada de SWRO	m ³ de água/Ano	-
Água de fontes não convencionais para o hub de H2V(t)	Água de fontes não convencionais para o hub de H2V (t - dt) + (Água da EPAR por ano + Água de dessalinização por ano - Água para resfriamento por ano - Água para produção de H2V por ano - Água para produção de GNH3 por ano) * dt	m ³ de água	-
Água para produção de GNH3 por ano	Água de fontes não convencionais para o hub de H2V*Fração de água para produção de GNH3	m ³ de água/Ano	-
Água para produção de H2V por ano	Água de fontes não convencionais para o hub de H2V*(Fração de água para produção de H2V)	m ³ de água/Ano	-
Água para resfriamento por ano	Água de fontes não convencionais para o hub de H2V*(1-Fração de água para produção de H2V)	m ³ de água/Ano	-
Água por H ₂	10	m ³ de água/ Toneladas de H ₂	Simões <i>et al.</i> (2021)
Fração de água para produção de GNH3	0,03	1/Ano	MacFarlane et al. (2020)
Fração de água para produção de H2V	1-Fração de água para resfriamento-Fração de água para produção de GNH3	1/Ano	-
Fração de água para resfriamento	0,79	1/Ano	Austrália (2022), E7, Fortescue (2023).
H2V produzido em um ano	Água para produção de H2V por ano/Água por H2	Toneladas de H ₂ /Ano	-
Segundos por ano	31.536.000	Segundos/Ano	-
Taxa de recuperação da EPAR	0,99	m ³ de água/ m ³ de efluentes	E3

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O setor 2 representa a dessalinização de água do mar por OR. A capacidade inicial de OR é a capacidade da planta de dessalinização da Fortescue. Além disso, o modelo contempla uma variável muito importante, que a quantidade de salmoura produzida por ano pelas plantas de dessalinização. A salmoura será despejada no mar, o que pode aumentar o nível de salinidade no mar do Pecém (CE). Esse possível aumento de salinidade do mar pode influenciar a taxa de recuperação de água das plantas de dessalinização e prejudicar a biota, o que implicará no aumento da rejeição do uso de água de dessalinização como fonte de abastecimento das plantas de H2V. Por outro lado, a venda do H2V impulsionará o reinvestimento nas plantas de H2V, o que aumentará a capacidade inicial. Além disso, o setor contempla a emissão de CO₂ devido a operação de planta de SWRO. A figura 12 expõe o setor

2.

Figura 12 – Setor 2 – Dessalinização de água do mar por Osmose Reversa



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A tabela 5 expõe as equações e os parâmetros do setor 2.

Tabela 5 - Equações e parâmetros do setor 2.

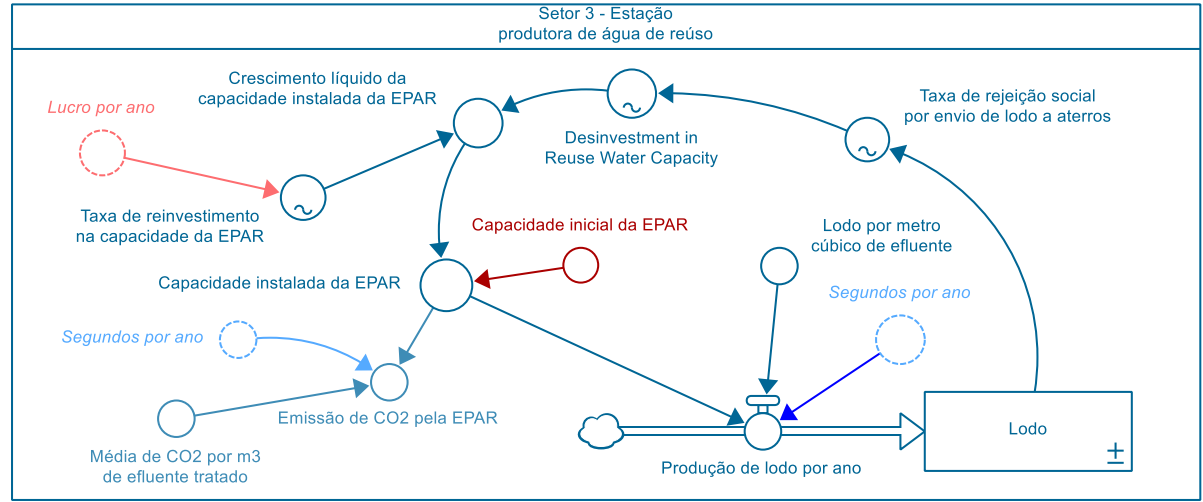
Setor 2 - Dessalinização de água do mar por OR	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
Capacidade inicial de SWRO	0,36	m ³ de água/segundos	Fortescue (2023)
Capacidade Instalada de SWRO	Capacidade inicial de SWRO+ STEP (Crescimento líquido da capacidade instalada de SWRO; 2028) + STEP (Crescimento líquido da capacidade instalada de SWRO; 2030) + STEP (Crescimento líquido da capacidade instalada de SWRO; 2032)	m ³ de água/segundos	Fortescue (2023) e E4
Crescimento líquido da capacidade instalada de SWRO	(Taxa de reinvestimento na capacidade da SWRO) - (Taxa de desinvestimento em SWRO)	m ³ de água/segundos	-
Emissão de CO2 pela SWRO	Média de CO2 por m3 de SWRO*Segundos por ano*Capacidade Instalada de SWRO	Toneladas de CO2 /Anos	-
Média de CO2 por m3 de SWRO	0,00355	Toneladas de CO2/ m ³ de água	Cornejo et al. (2014)
Salmoura por segundo	Capacidade Instalada de SWRO*(1-Taxa de recuperação de água por salinidade)	m ³ de água/segundos	-
Taxa de desinvestimento em SWRO	Gráfico (Taxa de rejeição social de SWRO por causa da Salmoura no mar)	m ³ de água/segundos	-
Taxa de recuperação de água por salinidade	Gráfico (Nível de salinidade do mar do Pecém)	Sem dimensão	Panagopoulos, Haralambous e Loizidou (2019)
Taxa de reinvestimento na capacidade da SWRO	Gráfico (Lucro por ano	m ³ de água/segundos	-

Taxa de rejeição social de SWRO por causa da Salmoura no mar	Gráfico (Nível de salinidade do mar do Pecém)	m ³ de água/segundos	E8
--	---	---------------------------------	----

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O setor 3 representa a produção de água de reúso. Também é importante notar a quantidade de lodo produzido, que provavelmente será enviada para um aterro sanitário, visto que o EIA/RIMA do *hub* de H2V no CIPP não contempla nenhum tratamento para esse lodo. A quantidade de CO₂ gerada no processo também é estimada no setor. O envio desse lodo para aterros sanitários provoca um aumento na rejeição social dessa fonte de água não convencional. Por outro lado, o mercado de H2V crescente fomentará o investimento na capacidade de produzir água de reúso por meio do tratamento de efluentes.

Figura 13 - Setor 3 – Estação produtora de água de reúso



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A tabela 6 mostra as equações e os parâmetros do setor 3.

Tabela 6 - Equações e parâmetros do setor 3.

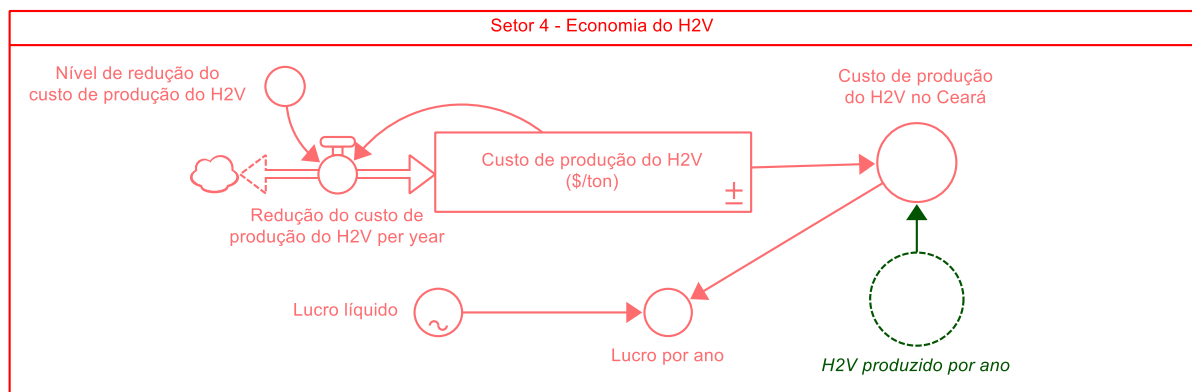
Setor 3 - EPAR	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
Capacidade inicial da EPAR	0,02	m ³ de efluentes/segundos	EIA/RIMA CIPP (2023)
Capacidade instalada da EPAR	Capacidade inicial da EPAR + STEP (Crescimento líquido da capacidade instalada da EPAR; 2026) + STEP (Crescimento líquido da capacidade instalada da EPAR; 2032)	m ³ de efluentes/segundos	CIPP (2023)
Crescimento líquido da capacidade instalada da EPAR	(Taxa de reinvestimento na capacidade da EPAR) - Desinvestimento na capacidade da EPAR	m ³ de efluentes/segundos	-
Desinvestimento na capacidade da EPAR	Gráfico (Taxa de rejeição social por envio de lodo a aterros)	m ³ de efluentes/segundos	-

Emissão de CO ₂ pela EPAR	Capacidade instalada da EPAR*Média de CO ₂ por m ³ de efluente tratado*Segundos por ano	Toneladas de CO ₂ /Ano	-
Lodo(t)	Lodo (t - dt) + (Produção de lodo por ano) * dt	Toneladas de lodo	-
Lodo por metro cúbico de efluente	0,01	Lodo/m ³ de efluente	-
Média de CO ₂ por m ³ de efluente tratado	0,000374	Toneladas de CO ₂ /m ³ de efluentes	Nguyen et al. (2019)
Produção de lodo por ano	Capacidade instalada da EPAR*Lodo por metro cúbico de efluente*Segundos por ano	Toneladas de lodo/Ano	-
Taxa de reinvestimento na capacidade da EPAR	Gráfico (Lucro por ano)	m ³ de efluentes/segundos	-
Taxa de rejeição social por envio de lodo a aterros	Gráfico (Lodo)	Sem dimensão	-

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O setor 4 esboça a redução do preço de produção do H2V por ano durante o período analisado. O lucro estimado é importante, pois espera-se que esta variável influenciará no aumento da capacidade de produzir água por meio de fontes não convencionais. A figura 14 expõe em detalhes o setor 4.

Figura 14 - Setor 4 - Economia do H2V



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A tabela 7 expõe as equações utilizadas no setor 4.

Tabela 7 - Equações e parâmetros do setor 4.

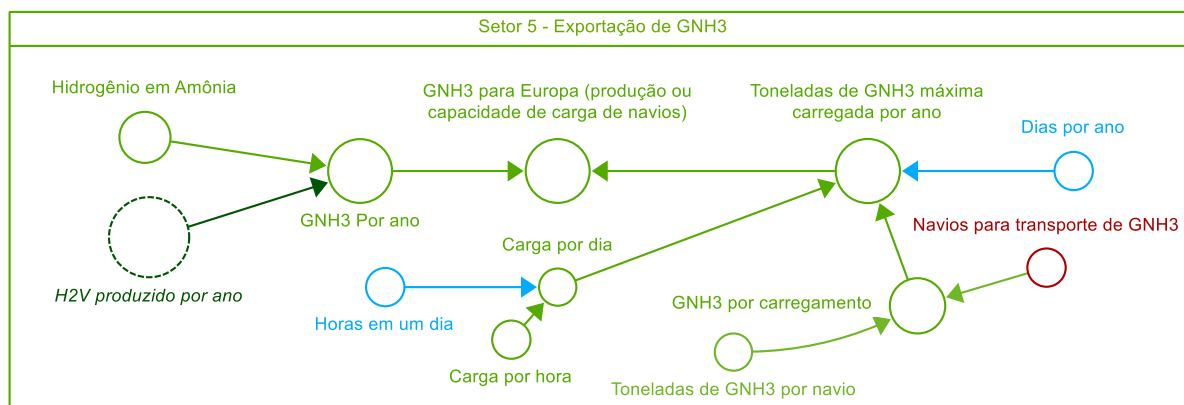
Setor 4 - Economia do H2V	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
"Custo de produção do H2V (\$/ton.)"(t)	"Custo de produção do H2V (\$/Ton)"(t - dt) + (Redução do custo de produção do H2V per Year) * dt	\$/ Toneladas de H ₂	Kumar e Lim (2022)
Custo de produção do H2V no Ceará	H2V produzido em um ano*"Custo de produção do H2V (\$/Ton)"	\$/Ano	-

Lucro líquido	Gráfico (TEMPO)	Sem dimensão	-
Lucro por ano	Lucro líquido*Custo de produção do H2V no Ceará	\$/Ano	-
Nível de redução do custo de produção do H2V	-0,05	1/Ano	-
Redução do custo de produção do H2V por ano	IF ("Custo de produção do H2V (\$/ton.)"<2500) THEN (0) ELSE (Nível de redução do custo de produção do H2V*"Custo de produção do H2V (\$/ton.)")	\$/Toneladas de H ₂ /Ano	-

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O setor 5 refere-se à exportação de GNH₃ para a Europa. Dois dos gargalos dessa cadeia de valor são a quantidade reduzida de navios aptos a fazer o transporte da amônia no mundo e a quantidade de docas para abastecimento dos navios no CIPP. Por isso, é possível que a produção de H2V ultrapasse a quantidade viável de exportação e essa amônia seja utilizada no mercado interno. O setor 5 concentra-se em calcular a quantidade de GNH₃ que pode ser enviada para a Europa.

Figura 15 - Setor 5 - Exportação de GNH₃



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A tabela 8 fornece as equações do setor 5.

Tabela 8 - Equações e parâmetros do setor 5.

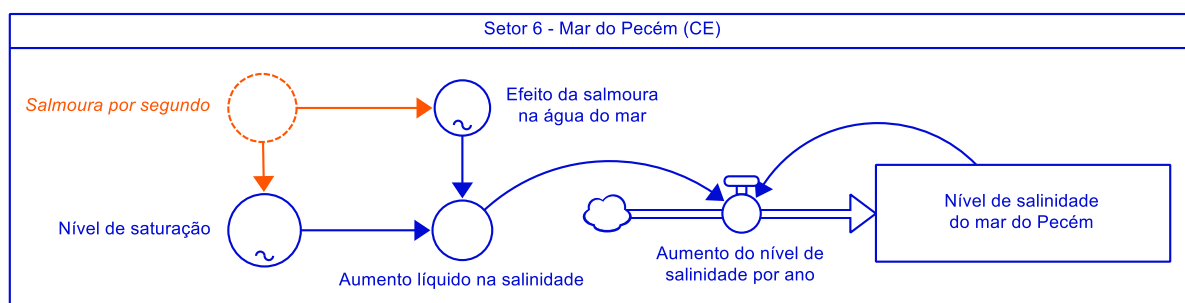
"Setor 5 - Exportação de GNH ₃ ":	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
Carga por dia	Carga por hora*Horas em um dia	Carga/Dia	-
Carga por hora	01/12	Carga/Hora	Fortescue (2023)
Dias por ano	365	Dia/Ano	-
"GNH ₃ para Europa (produção ou capacidade de carga de navios)"	MIN (GNH ₃ Por ano; Toneladas de GNH ₃ máxima carregada por ano)	Tonelada de NH ₃ /Ano	-

GNH3 Por ano	H2V produzido em um ano*Hidrogênio em Amônia	Tonelada de NH3 /Ano	-
GNH3 por carregamento	Toneladas de GNH3 por navio*Navios para transporte de GNH3	Tonelada de NH3 /Carga	-
Hidrogênio em Amônia	5,66	Tonelada de NH3 /Tonelada de H ₂	-
Horas em um dia	24	Horas/Dia	-
Navios para transporte de GNH3	40	Navio/Carga	Aldridge (2023)
Toneladas de GNH3 máxima carregada por ano	Carga por dia*GNH3 por carregamento*Dias por ano	Toneladas de NH ₃ /Ano	-
Toneladas de GNH3 por navio	17.356	Toneladas de NH ₃ /Navio	Aldridge (2023)

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O setor 6 diz respeito aos prováveis efeitos do despejo de salmoura no nível de salinidade do Pecém. O aumento da salinidade no mar do Pecém pode prejudicar a biota marinha do local e causar inúmeros impactos socioecológicos. Outro impacto também é a redução da taxa de recuperação da planta de dessalinização de água do mar, pois o aumento do nível de sal do mar torna o processo de dessalinização menos eficiente.

Figura 16 - Setor 6 - Mar do Pecém (CE)



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A tabela 9 fornece as equações do setor.

Tabela 9 - Equações e parâmetros do setor 6.

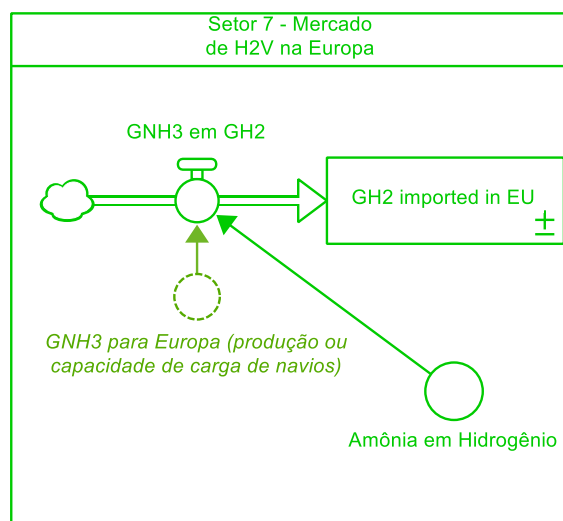
Setor 6 - Mar do Pecém (CE)	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
Aumento do nível de salinidade por ano	Nível de salinidade do mar do Pecém*Aumento líquido na salinidade	Quilogramas/m ³ de água/Ano	-
Aumento líquido na salinidade	Efeito da salmoura na água do mar-Nível de saturação	1/Ano	-
Efeito da salmoura na água do mar	Gráfico (Salmoura por segundo)	1/Ano	-
Nível de salinidade do mar do Pecém(t)	Nível de salinidade do mar do Pecém (t - dt) + (Aumento do nível de salinidade por ano) * dt	Quilogramas/m ³ de água	-

Nível de saturação	Gráfico (Salmoura por segundo)	1/Ano	-
--------------------	--------------------------------	-------	---

Fonte: dados da pesquisa (2023).

O setor 7 faz a conversão da GNH_3 exportada para a Europa em H_2V . Como ainda não foi decidido se o H_2V ou a GNH_3 serão utilizados, considerou-se a conversão.

Figura 17 - Setor 7 - Mercado de H_2V na Europa



Fonte: dados da pesquisa (2023).

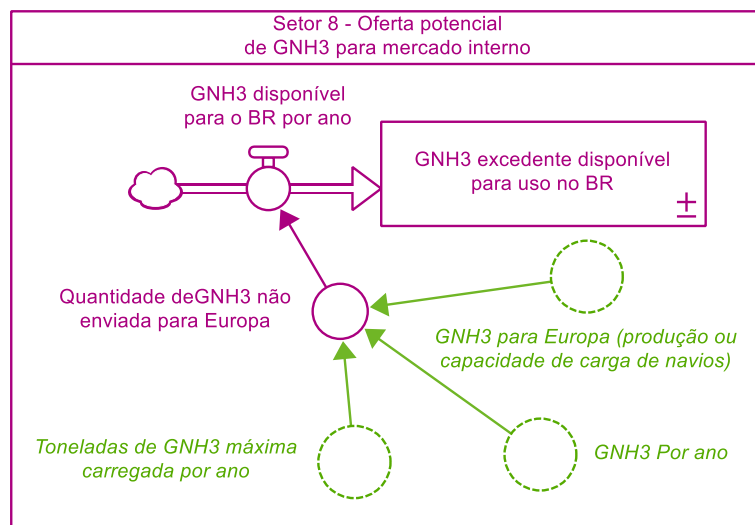
A tabela 10 fornece as equações e parâmetros desse setor.

Tabela 10 - Equações e parâmetros do setor 7.

"Setor 7 - Mercado de H_2V na Europa":	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
Amônia em Hidrogênio	1/5,66	Toneladas de H_2 /Toneladas de NH_3	-
H_2V importado pela Europa	$\text{H}_2\text{V importado pela Europa (t - dt) + (Amônia em Hidrogênio) * dt}$	Toneladas de H_2	-
GNH_3 em H_2V	$\text{Amônia em Hidrogênio} * \text{"GNH}_3 \text{ para Europa (produção ou capacidade de carga de navios)"}$	Toneladas de H_2 /Ano	-

Fonte: dados da pesquisa (2023).

Por fim, o setor 8 considera a quantidade excedente de amônia que pode ser produzida no Brasil e não pode ser enviada para Europa devido aos gargalos expostos no setor 5. Esse setor demonstra o potencial de amônia verde que pode ser utilizado pelo mercado interno brasileiro para suas mais diversas aplicações, principalmente para fomento do agronegócio.

Figura 18 – Setor 8 - Oferta potencial de GNH_3 para mercado interno

Fonte: dados da pesquisa (2023).

A tabela 11 fornece as equações e parâmetros do setor 8.

Tabela 11 - Equações e parâmetros do setor 8.

"Setor 8 - Oferta potencial de GNH_3 para mercado interno":	Equação/Parâmetro	Unidades	Referências
GNH ₃ disponível para o BR por ano	Quantidade de GNH ₃ não enviada para Europa	Toneladas de NH ₃ /Ano	-
GNH ₃ excedente disponível para uso no BR(t)	$\text{GNH}_3 \text{ excedente disponível para uso no BR } (t - dt) + (\text{GNH}_3 \text{ disponível para o BR por ano}) * dt$	Toneladas de NH ₃	-
Quantidade de GNH ₃ não enviada para Europa	IF (GNH ₃ Por ano > Toneladas de GNH ₃ máxima carregada por ano) THEN (GNH ₃ Por ano - GNH ₃ para Europa (produção ou capacidade de carga de navios)) ELSE 0	Toneladas de NH ₃ /Ano	-

Fonte: dados da pesquisa (2023).

A coleta de valores a partir da literatura, de entrevistas e da análise de documentos e a formulação do modelo permitiram simular a produção de H₂V a partir de fontes não convencionais de água.

4.4 Fase 4: análise e validação do modelo.

Esta subseção é dedicada à análise dos resultados do modelo e será dividida da seguinte forma: uma subseção para expor os cenários do modelo preferência por dessalinização de água do mar, ou seja, como o sistema de abastecimento hídrico do *hub* de H₂V no Ceará está

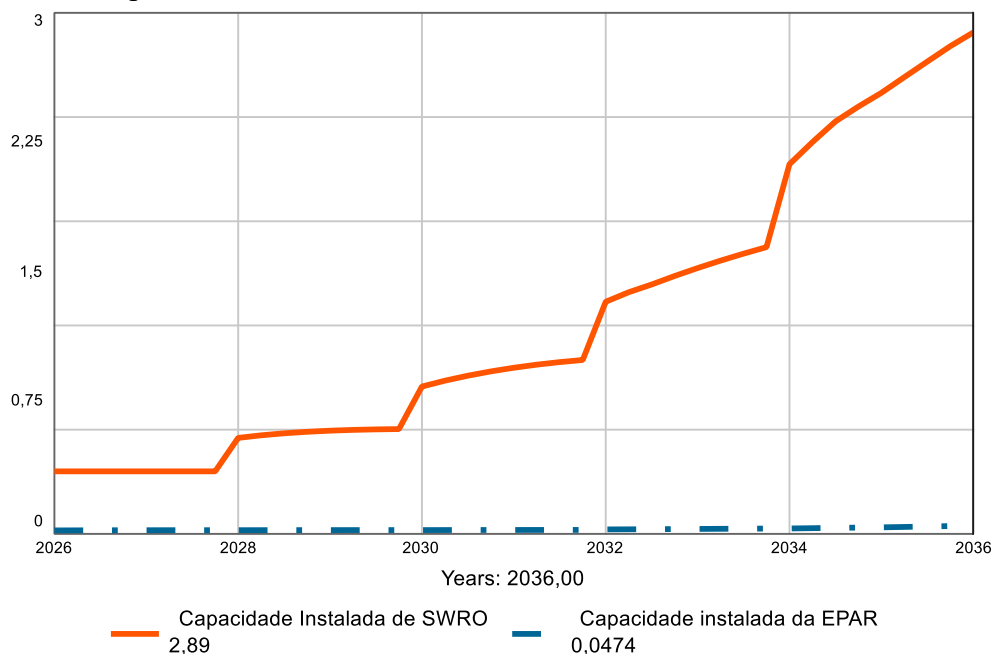
sendo planejado; uma subseção dedicada à validação do modelo de preferência por dessalinização de água do mar a fim de verificar quais as variáveis mais importantes dentro do sistema; e uma subseção que sugere apenas a utilização de água de reúso para abastecimento do *hub* de H2V.

4.4.1 Análise do modelo de preferência por dessalinização de água do mar

Essa subseção descreve os parâmetros do modelo coletados por meio de fontes da literatura, de análise documental e de entrevistas. O cenário padrão será chamado de preferência por dessalinização de água do mar. O cenário de preferência por dessalinização de água do mar descreve como a produção de H2V ocorrerá em um período de 10 anos, entre 2026 e 2036, considerando capacidade instalada inicial das fontes não convencionais de água. Para a capacidade inicial da planta de dessalinização por OR, foi escolhido o valor 0,36 m³/seg. Desse valor, 9% ou 0,03 m³/seg. serão utilizados na produção de H2V, 39% ou 0,14 m³/seg. serão utilizados no sistema de resfriamento e 52% ou 0,19 m³/seg. são salmoura, que será despejada no mar (Fortescue, 2023).

Quanto a capacidade inicial instalada da EPAR, o valor escolhido baseou-se no EIA/RIMA do *hub* de H2V, que estima a produção de água de reúso sendo 10% da produção de água por meio do processo de dessalinização de água do mar, que será de 6.500.000 m³ por ano. Portanto, a capacidade inicial da EPAR é de 0,02 m³/seg. (CIPP, 2023). Desse modo, não se espera uma grande evolução na capacidade instalada da EPAR para produzir água de reúso. As capacidades instaladas de dessalinização de água do mar e da EPAR evoluem conforme a figura 19.

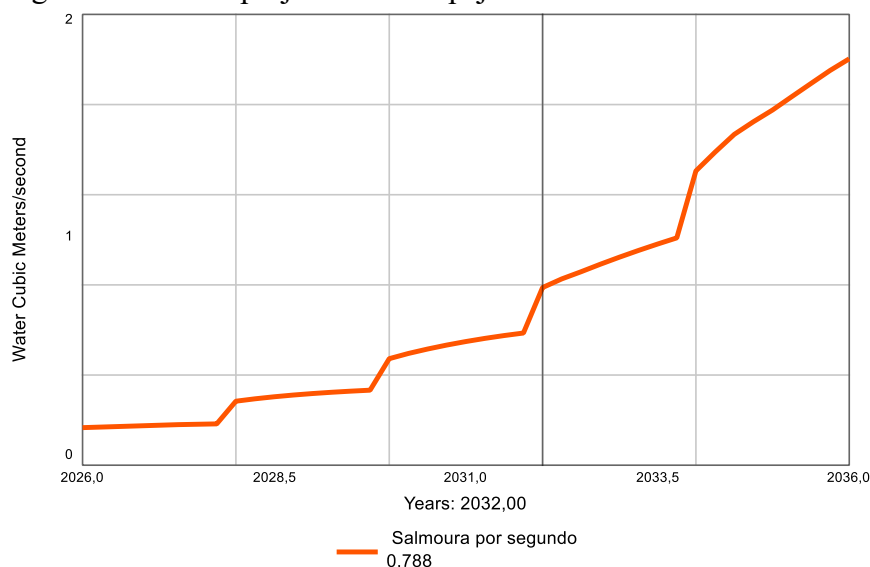
Figura 19 - Evolução da capacidade instalada da dessalinização de água do mar e da EPAR por ano.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

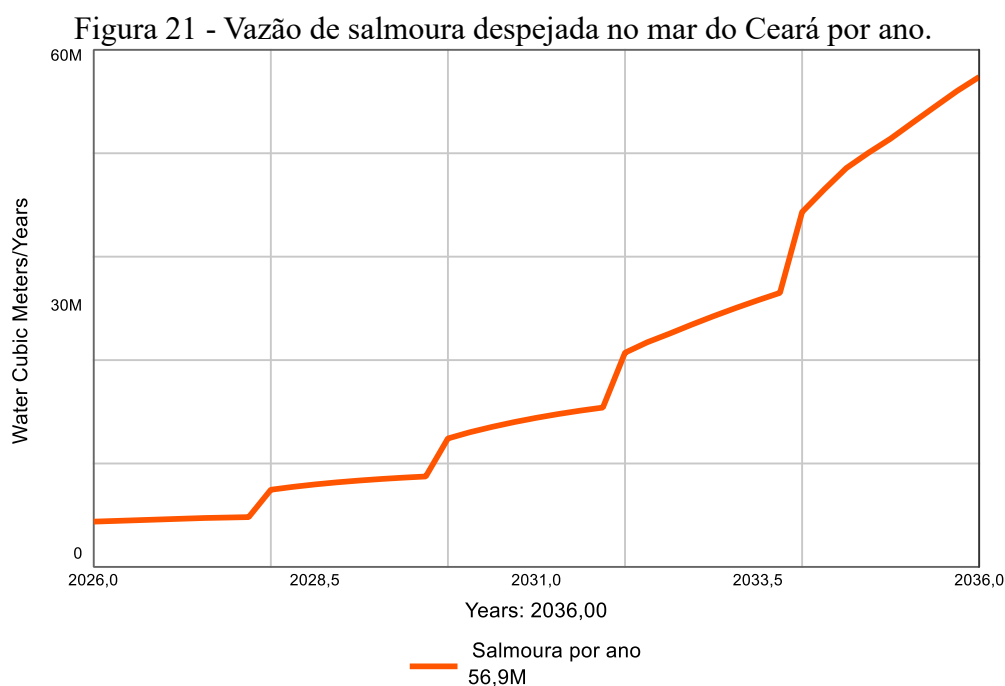
A simulação da figura 19 para as capacidades instaladas baseia-se no EIA/RIMA da Fortescue (2023) e nas entrevistas E6, E7 e E8, pois estas afirmam que fonte não convencional de água mais adotada para abastecimento do *hub* de H2V no CIPP será a dessalinização de água do mar. A escolha por essa fonte não convencional de água implica no despejo de água de salmoura no mar e no aumento das emissões de CO₂ no Estado do Ceará. A figura 20 tem estrutura semelhante à figura 19, pois possui o efeito da variável capacidade instalada de SWRO.

Figura 20 - Vazão projetada de despejo de salmoura no mar cearense.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A figura 20 mostra a vazão de salmoura em m^3/seg . Em 2032, o valor projetado é relativamente próximo ao valor exposto no EIA/RIMA da Fortescue, de $0,742 \text{ m}^3/\text{seg}$. Essa quantidade de salmoura despejada ao longo de um ano pode causar inúmeros impactos socioecológicos, como a redução da biota marinha e a consequente redução da pesca na região. A dispersão da salmoura no mar, segundo entrevistado E8 é complexa de ser calculada, principalmente quando se considera a falta de estudos e dados sobre a costa marinha cearense. Portanto, é importante considerar que há a possibilidade de a pluma não se dispersar da forma como a Fortescue explica em seu EIA/RIMA (Fortescue, 2023). A figura 21 expõe a quantidade de salmoura a ser despejada no mar cearense por ano ao longo do período simulado. Este valor é calculado por meio da multiplicação de quantidade de salmoura produzida em m^3/seg . pela quantidade de segundos em um ano.

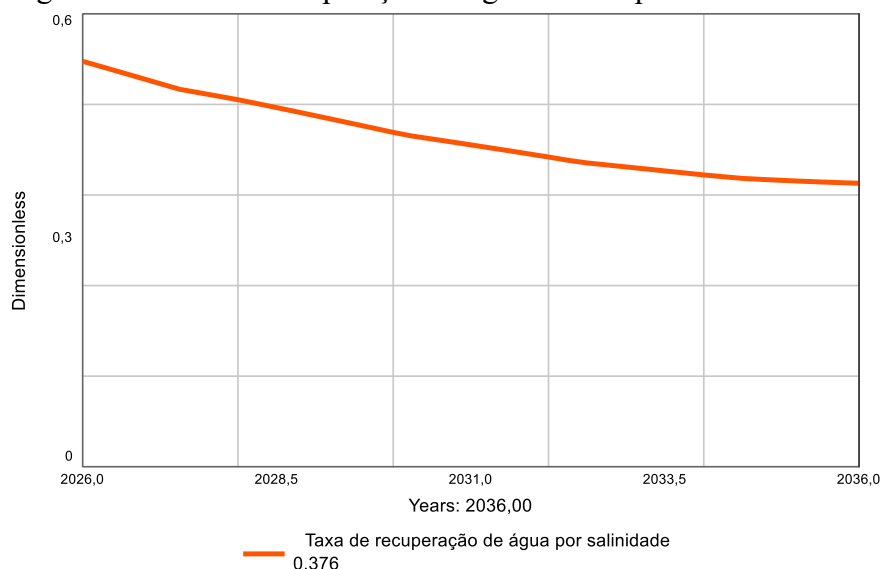


Fonte: dados da pesquisa (2023).

O despejo de salmoura mundial é de 142 milhões de m^3 por dia. De acordo com os resultados do cenário preferência por dessalinização de água do mar, não haveria um aumento considerável na produção mundial de salmoura anual devido à operação das plantas de dessalinização de água do mar. Ainda assim, impactos negativos na biota são esperados pela literatura. Devido ao aumento esperado do nível de salinidade da água do mar no Pecém, projetou-se um leve declínio na taxa de recuperação das plantas de dessalinização de água do

mar ao longo do tempo. Outro fator que também prejudica a taxa de recuperação é o envelhecimento das membranas (Panagopoulos; Haralambous; Loizidou, 2019). O modelo considera o envelhecimento global das membranas e a redução da taxa de recuperação. A figura 22 mostra a taxa de recuperação declinando ao longo do tempo.

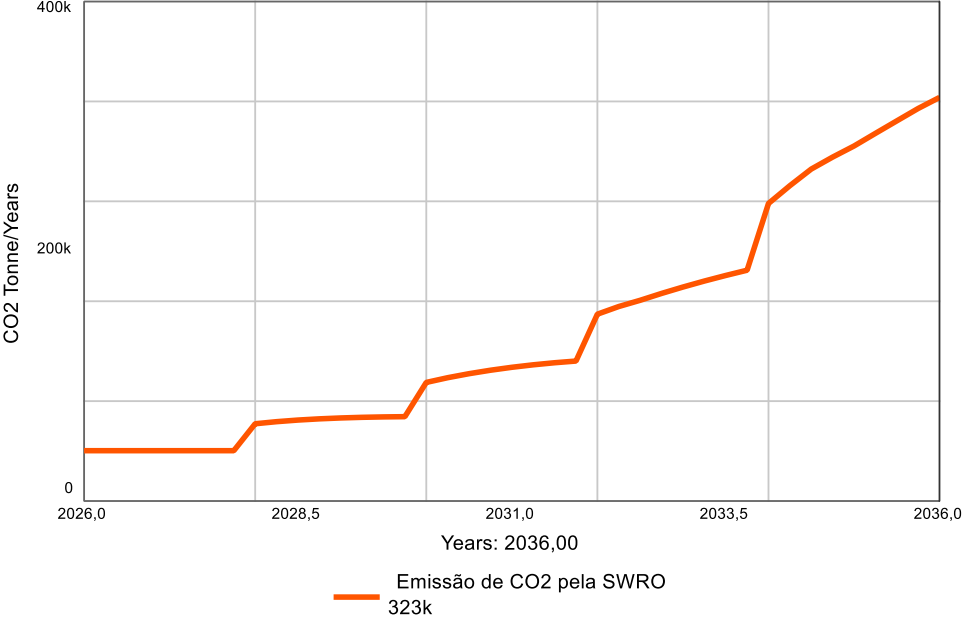
Figura 22 - Taxa de recuperação de água do mar por dessalinizadoras.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

Quanto ao aumento das emissões de CO₂ no Estado do Ceará devido a operação das plantas de dessalinização de água do mar, estima-se que o pico de emissões ocorrerá em 2036, quando serão liberadas 323 mil toneladas de CO₂ na atmosfera. Segundo o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), esse valor representaria apenas 1% do total de emissões de CO₂ emitidas no Estado do Ceará em 2021 (IPECE, 2022). A figura 23 representa as emissões de CO₂ devido à operação da planta de dessalinização de água do mar durante o período de 2026 e 2036.

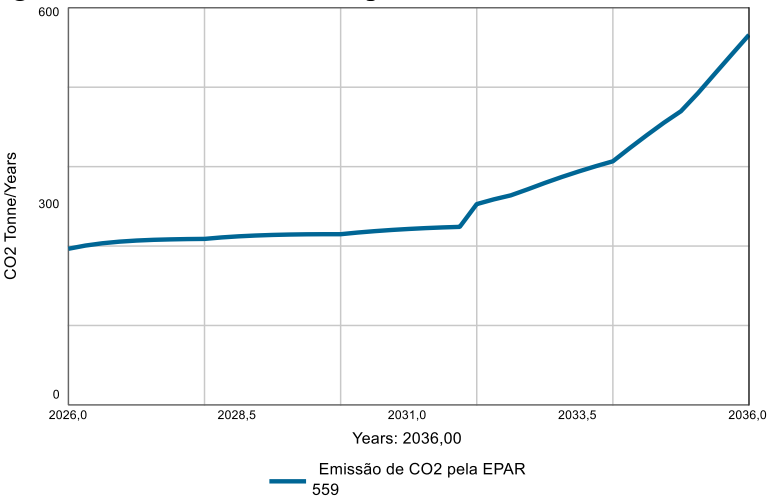
Figura 23 - Emissões de CO₂ pelas plantas de dessalinização no estado do Ceará.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

Apesar de esse valor ser considerado relativamente pequeno quando comparado aos totais de emissões realizadas no estado cearense, é válido salientar que as emissões de CO₂ por estações de tratamento de efluentes são menores. Enquanto as plantas de dessalinização de água do mar emitem cerca de 3,55 quilogramas por metro cúbico de água, as ETEs produzem apenas 374 gramas por metro cúbico. De acordo com o cenário preferência por dessalinização de água do mar, a emissão de CO₂ pela EPAR está disponível na figura 24.

Figura 24 - Emissões de CO₂ pelas EPAR no estado do Ceará.

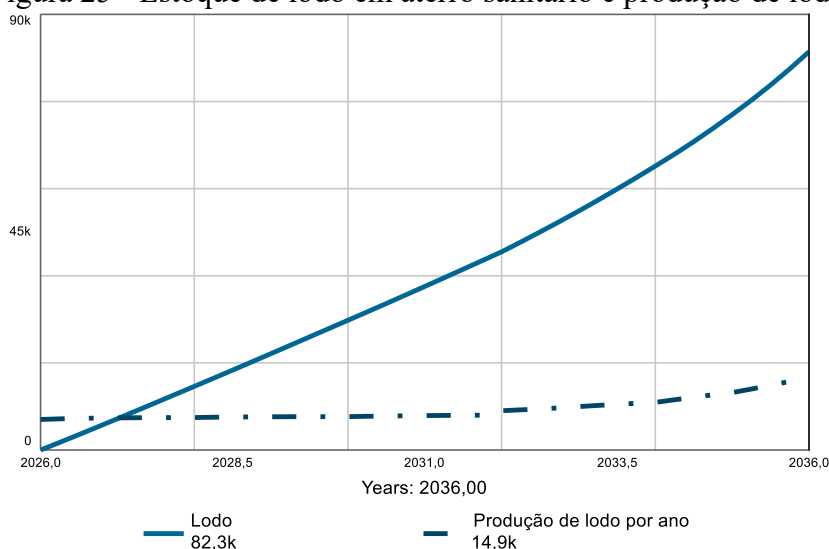


Fonte: dados da pesquisa (2023).

Dada a importância de considerar a produção de salmoura e seu despejo no mar

devido a operação de plantas de dessalinização, no caso da EPAR, é importante considerar a produção de lodo, que será destinado a aterros sanitários. A figura 17 mostra a quantidade de lodo estocada em um aterro sanitário entre 2026 e 2036 e a quantidade anual de lodo enviada para o aterro sanitário.

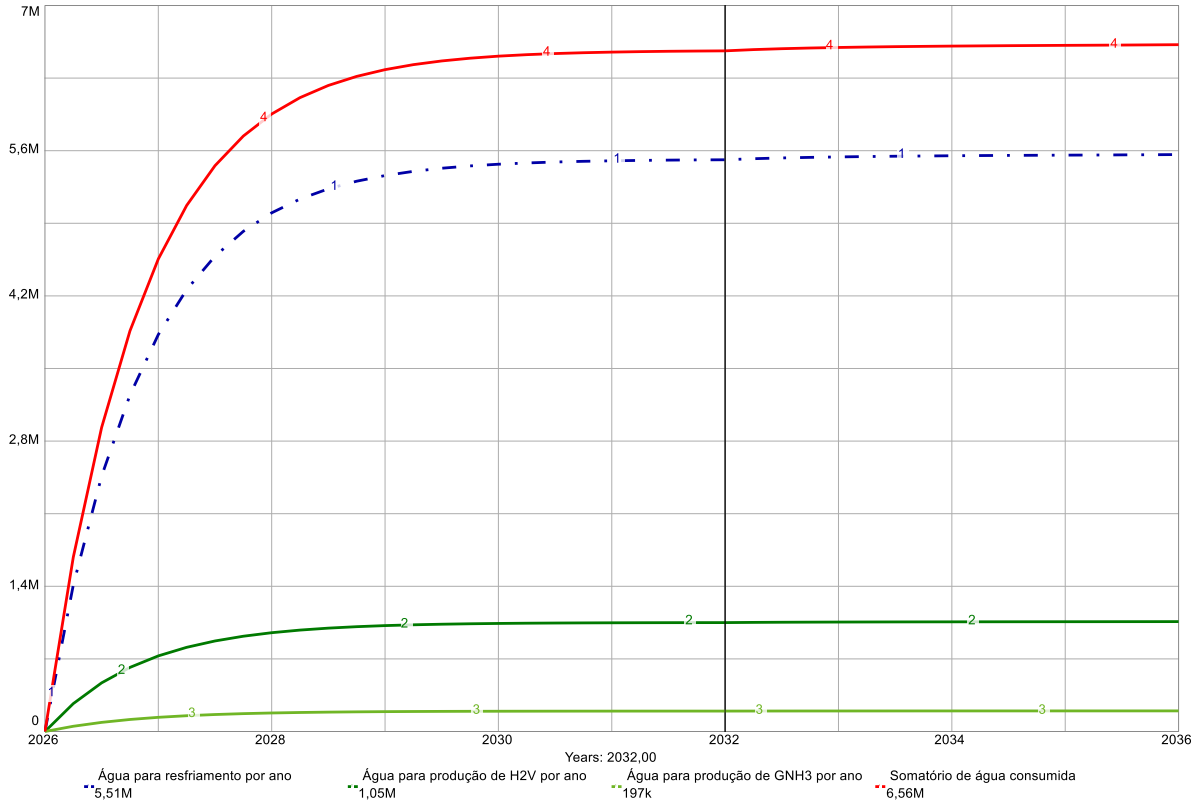
Figura 25 - Estoque de lodo em aterro sanitário e produção de lodo anual.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

No *hub* de H2V simulado para o CIPP há três usos principais de água: (1) produção de H2V, (2) resfriamento do sistema e (3) planta de GNH_3 . Tecnologia de resfriamento do setor 1 representada pela variável Fração de água para resfriamento baseou-se nos valores da planta da Fortescue. Segundo o EIA/RIMA da Fortescue, quando a planta estiver operando com sua capacidade total, 79% devem ser direcionados para o resfriamento, 3% para a planta de GNH_3 e o restante para a produção de H2V (Fortescue, 2023). A porcentagem disponível no EIA/RIMA da Fortescue é compatível com a tecnologia de resfriamento por evaporação trabalhada no relatório australiano Água para o Hidrogênio (Austrália, 2022). A figura 26 expõe o fluxo anual de água para os três usos em forma de gráfico de linha, em que a linha azul corresponde a quantidade de água destinada para resfriamento do sistema, a linha verde escuro a quantidade de água destinada para a produção de H2V e a linha verde claro, a quantidade de água destinada para a produção de GNH_3 ; e a linha laranja é o somatório das demais linhas.

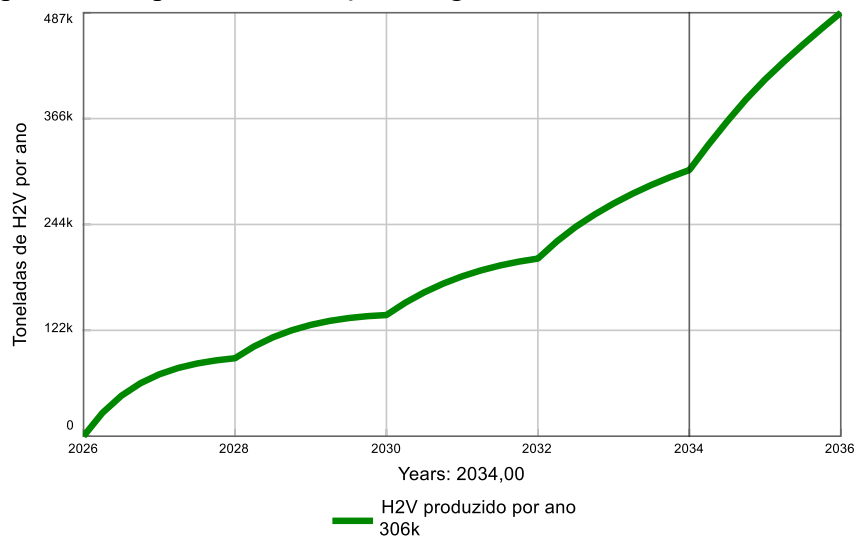
Figura 26 - *Outflow* anual de água para cada uso no *hub* de H2V.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A simulação mostra que com os valores iniciais e com essas quantidades de água disponível direcionada para o processo produtivo, é possível produzir em 2036 o total de 487 mil toneladas de H2V, cerca de 1,5 vez mais do que o total de 305.505 pretendido pela Fortescue quando tiver sua capacidade máxima operando. A figura 27 expõe a quantidade de hidrogênio verde produzido ao longo dos anos.

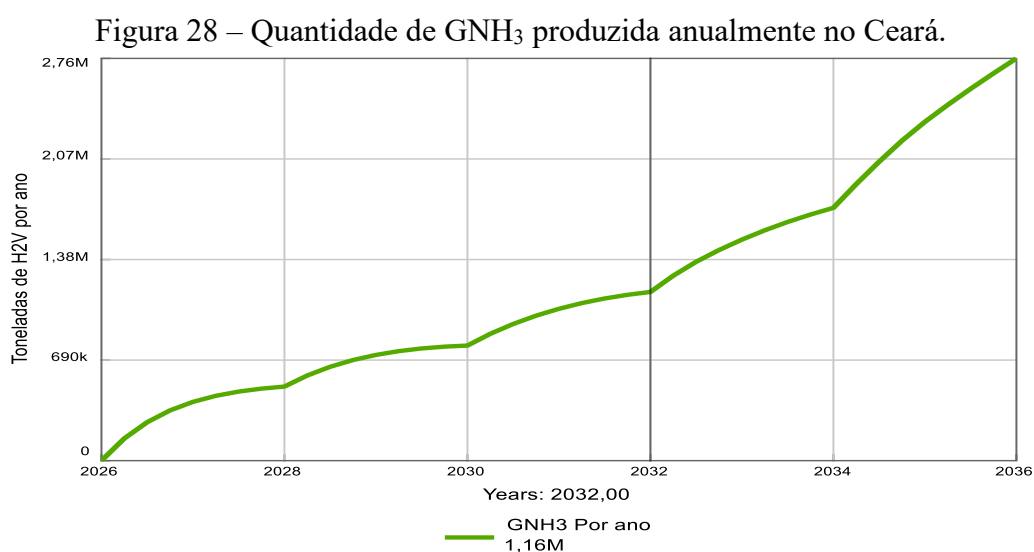
Figura 27 - Quantidade produzida de H2V a partir dos valores do cenário preferência por dessalinização de água do mar.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

O EIA/RIMA da Fortescue afirma que a empresa pretende produzir, a partir de 2032, cerca de 305 mil toneladas de H₂V por ano. Um valor próximo a esse só seria atingido em 2034 devido a perda de eficiência do processo de dessalinização de água do mar e devido a quantidade de água necessária para o processo de resfriamento. Além disso, a quantidade de produção de H₂V é bem aquém da quantidade que a Fortescue afirma que o CIPP pretende produzir anualmente, que é de 900 mil toneladas de H₂V (Fortescue, 2023).

A forma mais economicamente viável para exportar H₂V produzido no Ceará para a Europa é por meio de transformação do H₂V em GNH₃. Sendo assim, a produção de amônia também foi considerada no modelo. A figura 28 expõe a quantidade de GNH₃ produzida no Ceará. A figura 20 expõe os resultados do modelo no cenário preferência por dessalinização de água do mar para a quantidade de GNH₃ produzida anualmente.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

O modelo de negócios de preferência por dessalinização de água do mar apresenta algumas barreiras para a produção de H₂V, como a perda esperada de eficiência do processo de dessalinização de água do mar e a quantidade de água direcionada para o processo de resfriamento. No entanto, é importante destacar que os resultados obtidos com esse modelo estão relativamente próximos ao que foi planejado, como demonstrado pela produção de GNH₃, que se aproxima do valor apresentado no EIA/RIMA da Fortescue, de 1,7 milhões de toneladas por ano. Isso reforça a importância de escolher adequadamente a fonte de água e o consumo de água das tecnologias de produção e resfriamento no planejamento de um hub de H₂V. Mesmo

com as limitações apresentadas, o modelo preferência por dessalinização de água do mar entrega resultados que estão alinhados com os objetivos do projeto.

4.4.2 Teste de sensibilidade de abastecimento hídrico com preferência por dessalinização de água do mar

A produção de H2V projetada no *hub* do Ceará é de 900 mil toneladas por ano e, até o momento, os MEs assinados pretendem produzir 2,42 milhões de toneladas por ano. Os cenários desenhados nesta etapa representam o comportamento do sistema a partir da oscilação de variáveis importantes identificadas na etapa de Identificação do problema. Estas variáveis podem variar de acordo com as decisões tecnológicas tomadas por atores sociais. Por isso, foram rodados 200 cenários com oscilações para as variáveis dispostas na tabela 12 a fim de verificar em que condições estes valores seriam alcançados.

Tabela 12 - Oscilação das variáveis-chave do sistema preferência por dessalinização de água do mar.

Variável	Mínimo	Máximo	Referências
Capacidade inicial da planta de dessalinização de água do mar por OR (SWRO)	0	0,44	Fortescue (2023)
Capacidade inicial da EPAR	0	0,044	Complexo do Pecém (2023)
Água em H ₂	9	18	Simões <i>et al.</i> (2021)
Fração de água para o resfriamento	0,15	0,85	Austrália (2022)

Fonte: dados da pesquisa (2023).

A partir dos cenários, foi possível verificar alguns cenários que condizem com os valores citados no EIA/RIMA da Fortescue e no somatório dos MEs assinados entre o governo do Estado do Ceará e as empresas. A tabela 13 expõe os valores das variáveis que possibilitam a produção de H2V estar próxima as 900 mil toneladas por ano e 2,4 milhões de toneladas por ano.

Tabela 13 - Cenários com produção de H2V para o sistema com preferência por dessalinização de água do mar compatíveis com previsão pela Fortescue e memorandos de entendimento.

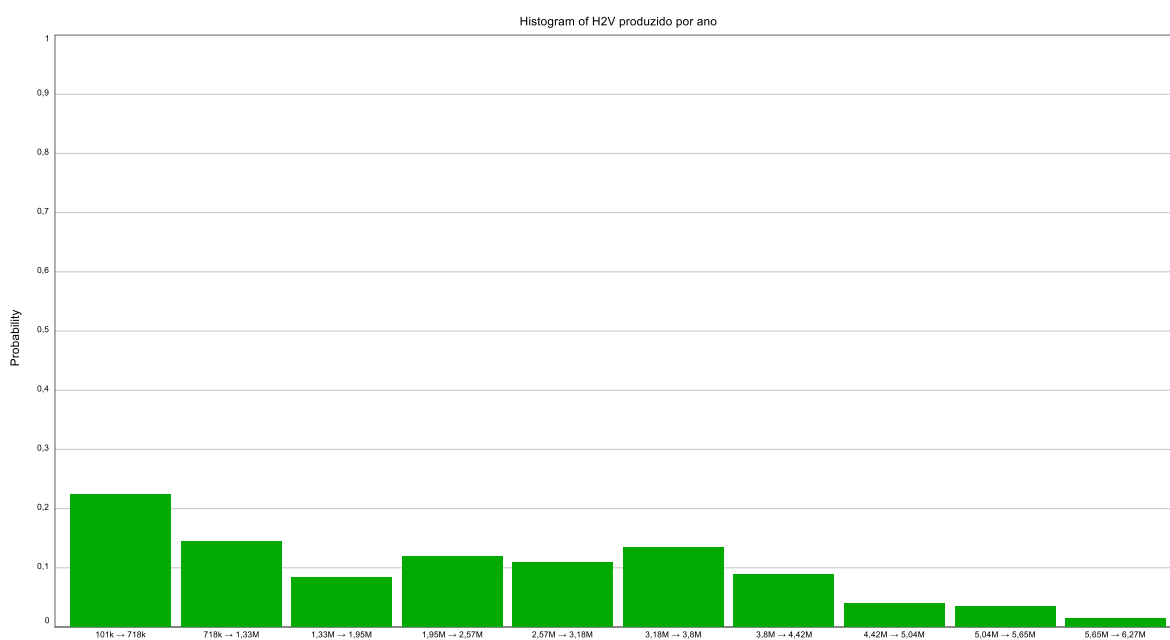
Cenários	Capacidade inicial de SWRO	Capacidade inicial da EPAR	Água por H ₂	Fração de água para resfriamento	H2V produzido em um ano
Run 115	0,265	0,020	17,5	0,57	903.535
Run 42	0,144	0,002	12,5	0,66	922.762

Run 66	0,065	0,031	14,0	0,63	936.359
Run 23	0,371	0,010	13,8	0,65	961.254
Run 188	0,153	0,021	14,5	0,61	980.132
Run 88	0,134	0,043	9,8	0,60	2.436.458
Run 96	0,058	0,041	12,2	0,51	2.440.667
Run 18	0,096	0,004	10,4	0,57	2.447.110
Run 148	0,132	0,030	15,5	0,38	2.452.326
Run 4	0,165	0,028	10,1	0,59	2.464.184

Fonte: dados da pesquisa (2023).

Dentre esses 7 cenários, o *Run 42* se destaca pelos baixos valores de capacidade inicial instalada das fontes de abastecimento. Contudo, a produção de H2V é compensada porque menos água é necessária para o resfriamento das plantas. A partir dos 200 cenários, um histograma de probabilidade foi produzido contendo a produção de H2V. A figura 29 apresenta o histograma da probabilidade de produção de H2V para os 200 cenários em 2036.

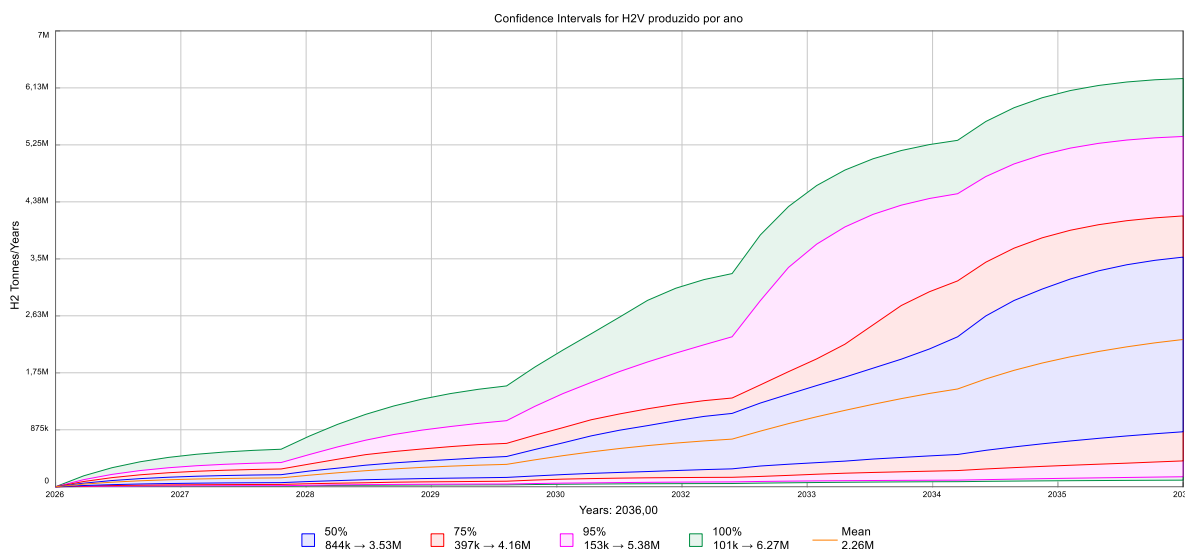
Figura 29 – Histograma da probabilidade de produção de H2V para os 200 cenários em 2036.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

Os 200 cenários sugerem que o sistema possui capacidade para produzir, em 2036, a quantidade de H2V condizente com os valores levantados nos MEs entre o governo do Estado do Ceará e as empresas que pretendem produzir H2V no Estado, contudo, a maior probabilidade é que os valores de produção de H2V varie entre 101 mil e 718 mil toneladas de H2V.

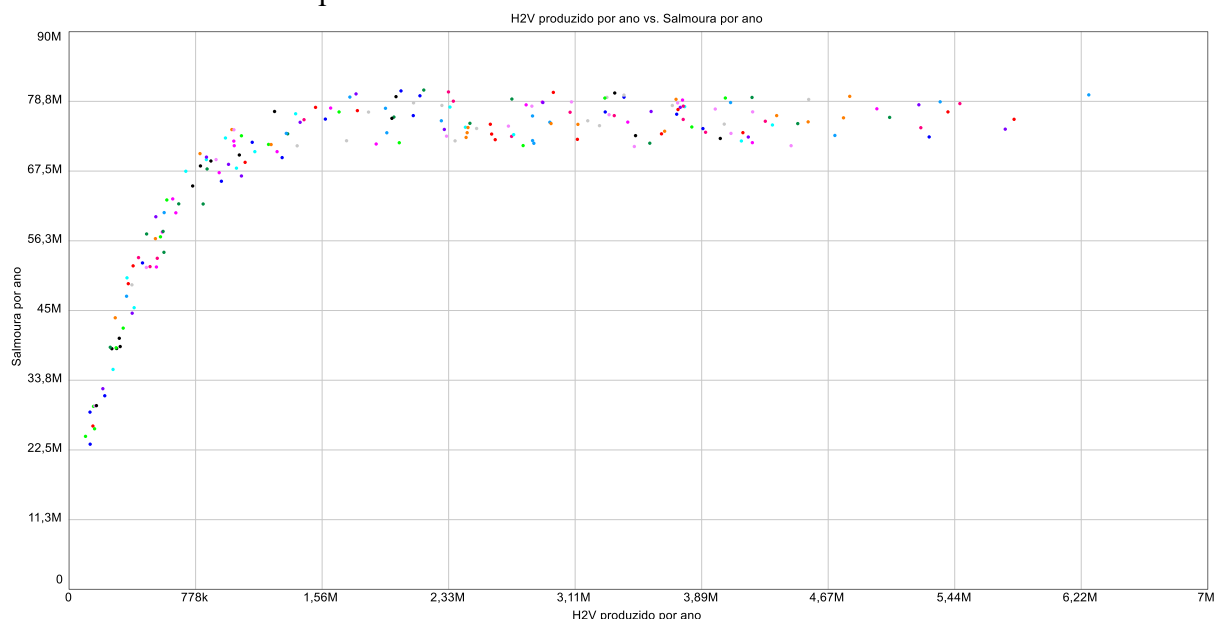
Figura 30 - Intervalos de confiança da produção de H2V por ano.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

O sistema modelado neste trabalho permite a produção de H2V em quantidades desejáveis pelas instituições privadas e o governo do Estado do Ceará. No caso da produção de H2V, a variável mais importante diz respeito a escolha da tecnologia de resfriamento, portanto, uma tecnologia de resfriamento fechada implica em maior produtividade de H2V. Outra variável que reduz a quantidade de H2V produzido é a eficiência da conversão de H₂O em H₂. Os resultados do modelo, até o presente momento, estão condizentes com o que é projetado pelos tomadores de decisão para a produção de H2V, contudo, a maior probabilidade, como exposta na figura X, é que sejam produzidas quantidades inferiores a 718 mil toneladas de H2V em 2036. Assim, é possível estender essa inferência para os efeitos colaterais da produção de H2V. No caso do abastecimento de água por meio de dessalinização, o despejo de salmoura no mar do Ceará acompanha o aumento da produção de H2V, conforme é possível observar na Figura 30.

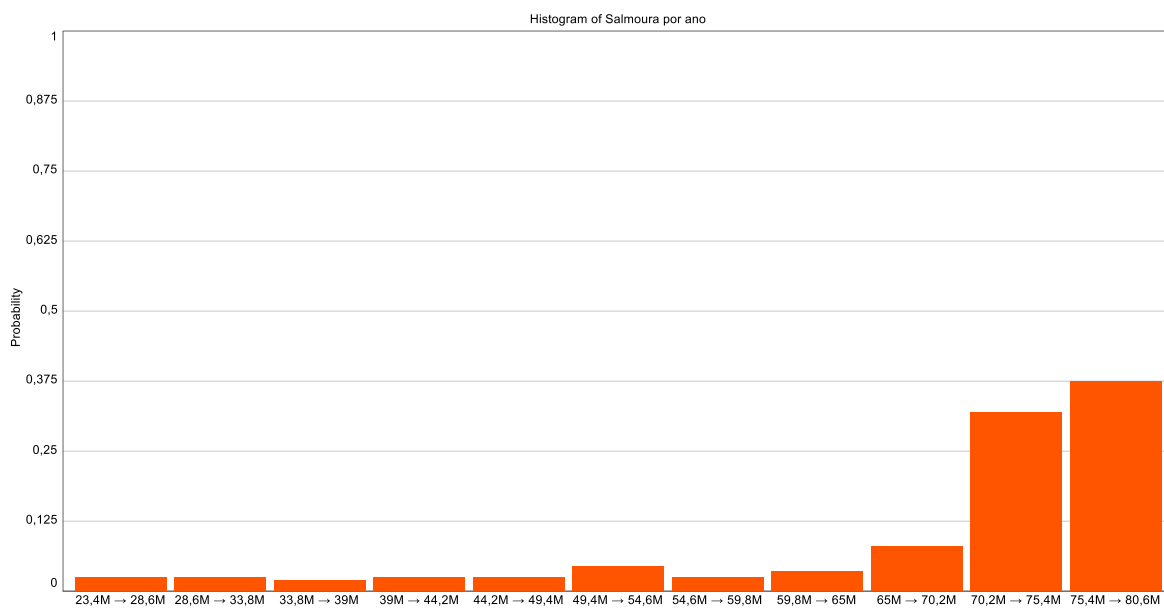
Figura 31 - Aumento da produção de H2V por ano *versus* despejo de salmoura no mar cearense por ano.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

A estabilização dos pontos entre 67,5 milhões e 78,8 milhões de metros cúbicos de salmoura despejadas anualmente mostra que existem cenários em que é possível produzir mais H2V despejando quantidades aproximadas de salmoura no mar. Portanto, buscar os valores que permitem essa maior “eficiência” é importante. No que tange a probabilidade dos cenários quanto ao despejo de salmoura no mar cearense, as simulações mostram que é muito provável que o sistema despeje no mar uma salmoura com quase o dobro do nível de salinidade normal do mar cearense. Os valores expostos no resultado deste estudo projetam que a produção de água a partir de dessalinização para abastecer a produção de H2V possui quase 70% de probabilidade de ser muito alta comparada aos demais cenários. A figura 31 expõe as probabilidades.

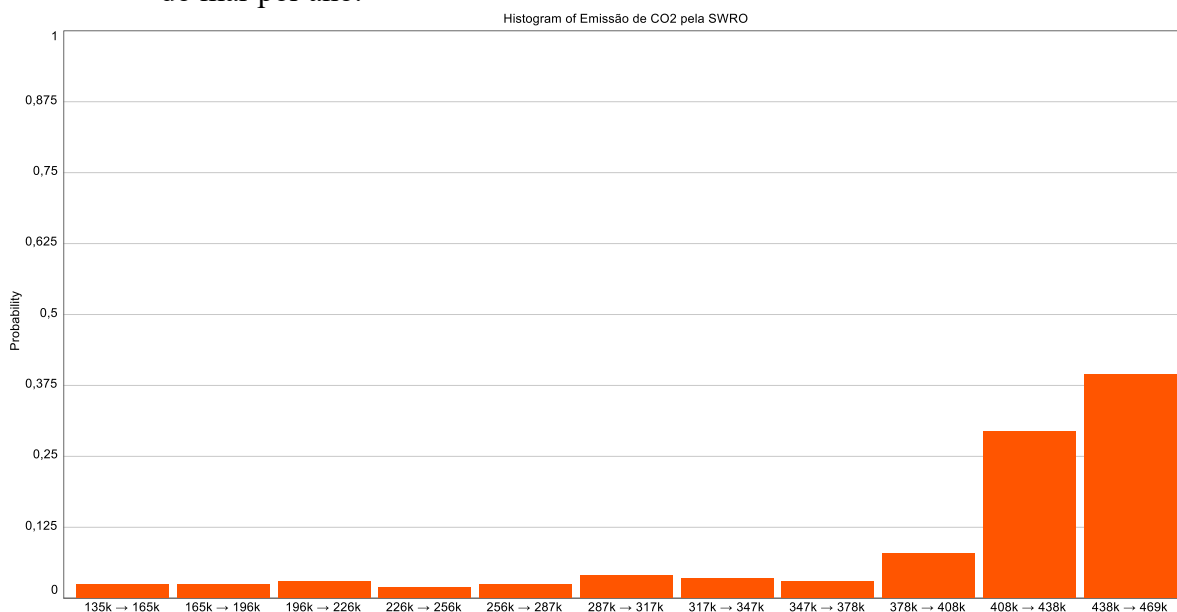
Figura 32 - Histograma do despejo de salmoura no mar cearense para os 200 cenários simulados.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

Além da produção de salmoura, a emissão de CO₂ na atmosfera de plantas de dessalinização é maior do a de ETEs. A probabilidade de a SWRO emitir mais que 400 toneladas de CO₂ por ano é maior do que 70%, conforme é possível observar na figura 32.

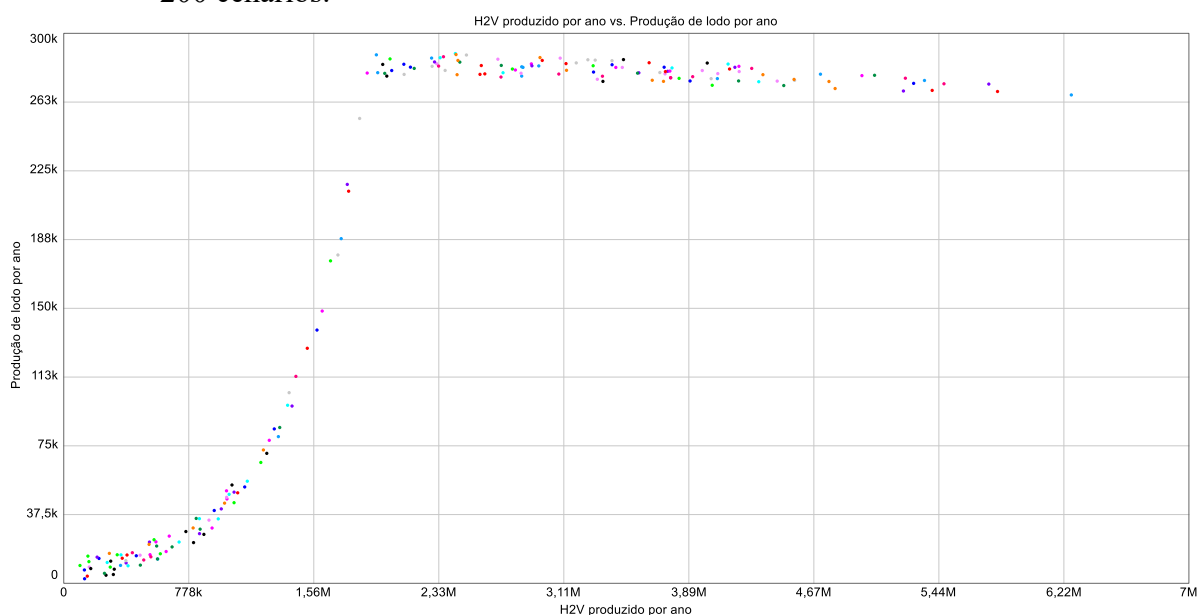
Figura 33 - Histograma de emissões de CO₂ pela planta de dessalinização de água do mar por ano.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

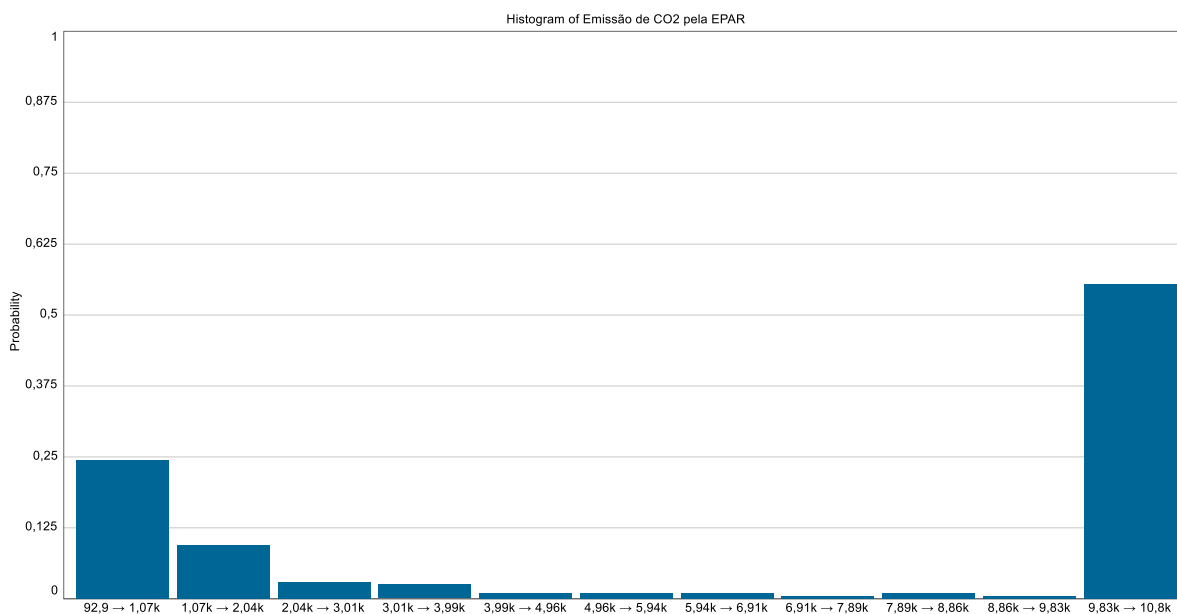
É possível estender a linha de pensamento para a produção de H₂V por ano em comparação com a produção de lodo por ano. A Figura 33 expõe como o aumento da produção de H₂V por ano influencia na produção anual de lodo.

Figura 34 - Aumento da produção de H₂V por ano versus produção de lodo para os 200 cenários.



Fonte: dados da pesquisa (2023).

É válido salientar que a produção de salmoura e de lodo por ano variam em escala. Quando se opta pela dessalinização de água do mar, a produção de rejeito pode atingir a escala de milhões, enquanto a produção de lodo permanece na escala milhar. Nesse sentido, a produção anual de lodo possui menores probabilidade de atingirem valores exorbitantes comparado à produção mundial anual, que é de 45 milhões de toneladas de lodo por ano (Lee, 2017). A emissão de CO₂ no tratamento de água é menor quando comparada as emissões de plantas de dessalinização. A figura 34 expõe o histograma de emissões de CO₂ em plantas de tratamento de efluentes.

Figura 35 - Histograma de emissão de CO₂ pela EPAR.

Fonte: dados da pesquisa (2023).

A partir dos resultados das simulações, é possível observar a combinação de água de reúso e de dessalinização de água do mar possuem capacidade de fornecer água nos níveis que o *hub* de H2V necessitará. Também é possível observar que quanto maior a capacidade inicial das plantas de dessalinização, maior a probabilidade de aumentar o despejo de salmoura no mar do Ceará. Além disso, a eficiência do processo de produção de H2V não reside na escolha da fonte de abastecimento, mas sim na quantidade de água necessária para o processo de resfriamento do sistema. Caso esse valor reduza, maior quantidade de água pode ser direcionada para a produção de H2V.

4.4.3 Teste de sensibilidade de abastecimento hídrico exclusivo com água de reúso

Como uma alternativa para além do preferência por dessalinização de água do mar, que possui a dessalinização de água do mar como principal fonte de água para abastecimento do *hub* de H2V, propõe-se a possibilidade de abastecer o *hub* inteiramente com água de reúso. Para realizar as simulações, as mesmas variáveis da análise de sensibilidade do subtópico 4.4.2 foram utilizadas, com exceção da variável capacidade inicial das plantas de dessalinização de água do mar. A tabela 14 expõe os valores para o sistema abastecido apenas com água de reúso.

Tabela 14 - Oscilação das variáveis-chave do sistema abastecido apenas com água de reúso.

Variável	Mínimo	Máximo
Capacidade inicial da EPAR	0,25	0,45
Água em H ₂	8	18
Fração de água para o resfriamento	0,15	0,85

Fonte: dados da pesquisa (2023).

Os resultados demonstram que existe a possibilidade de atender a produção anual de H2V apenas utilizando água de reúso em 13 casos. A quantidade estimada pela Fortescue é de que o *hub* produza 900 mil toneladas anuais de H2V, enquanto os memorandos de entendimento planejam produzir 2,4 milhões de toneladas de H2V por ano. A tabela 15 expõe a combinação de variáveis que permite a produção de H2V nas quantidades almejadas.

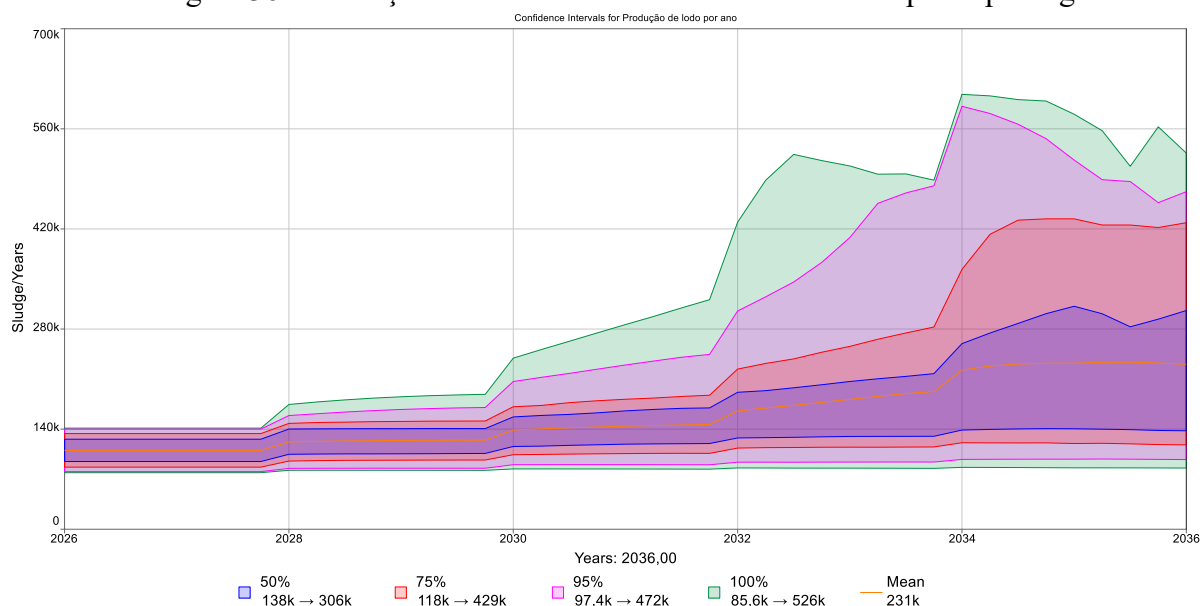
Tabela 15 - Cenários com produção de H2V para o sistema abastecido apenas com água de reúso compatíveis com previsão pela Fortescue e memorandos de entendimento.

Cenários	Capacidade inicial de EPAR	Água por H ₂	Fração de água para resfriamento	H2V produzido/ano
40	0,27	16	0,25	905.799,08
127	0,38	14	0,42	910.547,75
88	0,31	18	0,21	931.247,47
23	0,42	11	0,52	940.697,43
160	0,26	12	0,43	941.656,30
6	0,28	12	0,41	965.220,29
189	0,42	18	0,23	966.777,32
87	0,40	12	0,34	2.220.140,94
92	0,29	12	0,30	2.278.007,49
176	0,33	14	0,19	2.389.132,89
42	0,32	9	0,42	2.508.584,53
85	0,45	14	0,17	2.515.372,47
13	0,39	13	0,19	2.554.595,13

Fonte: dados da pesquisa (2023).

Como efeito colateral desse processo, há o aumento da produção de lodo, que é exposta na figura 35.

Figura 36 – Produção de lodo anual no modelo abastecido apenas pela água de reúso



Fonte: dados da pesquisa (2023).

Por conceito, o tratamento de efluentes segue a lógica da EC ao recuperar um recurso que seria completamente perdido e tem alto potencial poluidor. É possível aumentar o nível de circularidade desse recurso ao direcionar a água tratada para diversos usos. As etapas do tratamento as quais o efluente precisa passar dependerá do uso final que darão a essa água. Por exemplo, no caso da agricultura, água de reúso que passou pela segunda etapa devem ser direcionadas para plantações que não são utilizadas para alimentação, enquanto água de reúso que passa por tratamento terciário pode ser direcionada para plantações que tem como objetivo alimentar (Neczaj; Grosser, 2018). Independente das etapas de tratamento, as saídas desse processo são água com níveis diferentes de qualidade e lodo.

O lodo é bastante aplicado na agricultura europeia, principalmente na Alemanha e na França. Os principais desafios no direcionamento do lodo para a agricultura são as questões de saúde e segurança, odor, incômodo e aceitação pública (Neczaj; Grosser, 2018). Outro recurso importante possível de ser recuperado no lodo é o fósforo, por meio da cristalização da estruvita (Hukari; Hermann; Nätörp, 2016). Contudo, esse processo tem altos custos químicos e a incrustação da estruvita em válvulas e encanamentos (Neczaj; Grosser, 2018). Outra forma de recuperar o fósforo para ser aplicado na indústria de fertilizantes é por meio das cinzas do lodo. O potencial de recuperação do fósforo a partir das cinzas é de 19 mil toneladas por ano. A maior barreira para isso é a presença de metais pesados no lodo. Uma forma potencial de contornar isso é tratar as cinzas sulfato de sódio. Os resultados do estudo mostram que tratar lodo com sulfato de sódio reduziu a quantidade de metais pesados para níveis menores do que

os aceitos pela Alemanha para aplicação do lodo como fertilizante (Herzel *et al.*, 2016). No CIPP, operam 3 empresas cujo foco são o agronegócio (CIPP, 2023).

Outra maneira de utilizar as cinzas do lodo como insumo é no processo fabricação de tijolos e telhas (Neczaj; Grosser, 2018). A indústria cimenteira também pode utilizar as cinzas do lodo na fabricação do clínquer, contudo, o fósforo tem que ser retirado, o que implica em outra oportunidade, o envio do fósforo para aplicação na agricultura (Lynn *et al.*, 2015). No estudo sobre o desempenho mecânico do concreto feito com cinzas do lodo mostrou que as propriedades de resistência do concreto melhoraram (Alam *et al.*, 2023). O CIPP possui 4 cimenteiras e 1 empresa fabricante de pré-moldados de concreto (CIPP, 2023).

Cerca de 6 a 8% do lodo é formado por Nitrogênio, outro importante recurso da indústria de fertilizantes. Considerando a quantidade de lodo gerado pelas ETEs, é possível que esses equipamentos sejam considerados uma mina de Nitrogênio. A recuperação de Nitrogênio é importante, pois devido ao rompimento das cadeias de suprimento e à redução da disponibilidade de gás natural, a produção de fertilizantes à base de Nitrogênio encareceu (Chojnacka *et al.*, 2023). A maior quantidade de Nitrogênio, cerca de 60%, pode ser recuperada a partir da urina, contudo esse processo é caro, pois é necessário adicionar uma estrutura para separar coleta e tratamento de efluente. A recuperação de Nitrogênio para aumentar a sustentabilidade da operação das ETEs necessita de tecnologias apropriadas para isso, do contrário, a recuperação do Nitrogênio com as tecnologias convencionais de tratamento de efluente tem pouco efeito na sustentabilidade (Hoek; Duijff; Reinstra, 2018).

Produzir energia por meio de ETEs é uma possibilidade, contudo é necessário optar-se à época da construção da estação para qual rota tecnológica será escolhida. Para produzir energia deve-se optar por uma rota anaeróbia de tratamento secundário (Ghimire; Sarpong; Gude, 2021). A rota tecnológica da maioria das ETEs do CE é aeróbica, portanto, o principal gás produzido é o CO₂ e não o CH₄.

4.5 Design de ações

A partir dos resultados obtidos provenientes das simulações do modelo com preferência por dessalinização de água do mar, em que há uma preferência pela tecnologia de dessalinização de água do mar como fonte principal de abastecimento; e do modelo do *hub* abastecido exclusivamente com água de reúso, depreende-se que ambas as tecnologias possuem capacidade de disponibilizar água na quantidade necessária para a produção de H2V. Nesse sistema, a variável que mais possui influência na produção de H2V anual é a fração de água

necessária para o processo de resfriamento do sistema. Portanto, a escolha tecnológica da fonte de água não convencional pode ser realizada por outros fatores, como por exemplo, a quantidade produzida de resíduos e seus efeitos nos sistemas ecológico e social.

Por exemplo, é possível que ocorra uma reação em cadeia ao optar-se pela dessalinização de água do mar. O despejo da salmoura no mar pode ocasionar alterações nos níveis de salinidade, temperatura e adicionar metais pesados ao ambiente aquático. Isso, por sua vez, pode desequilibrar a biota de regiões próximas ao ambiente de despejo, implicando na redução de comunidades de seres vivos mais sensíveis a essas alterações. Em consequência do desequilíbrio da biota, há um possível impacto sobre as comunidades tradicionais cujo modo de vida reside na prática da pesca artesanal e no turismo.

Por outro lado, a opção pela água de reúso tem como principal resíduo o lodo, que caso não seja bem manejado, pode ocasionar contaminação de solos e lençóis freáticos. Além disso, há uma necessidade maior de aterros sanitários, caso não se reaproveite esse resíduo. Apesar dos possíveis impactos ambientais do tratamento de efluentes, o estudo de Lassaoux, Renzoni e Germain (2007) que no balanço ambiental entre tratar ou não os efluentes gerados, é pior não tratar, sendo a acidificação e a eutrofização os impactos mais severos da inação quanto aos efluentes. Portanto, o tratamento de efluentes é algo necessário. Uma possibilidade viável é utilizar o lodo em outras aplicações, como agricultura e coprocessamento em outras indústrias.

Um estudo realizado na Espanha teve como objetivo construir um *framework* legal do estado da arte das fontes não convencionais de água, reúso e dessalinização de água do mar. Os autores concluem que as fontes não convencionais de água são importantes para locais que sofrem de escassez hídrica. Na Espanha, a água de reúso é a fonte não convencional de água mais difundida e tem como vantagens a reutilização da água para agricultura e a conservação da biodiversidade, enquanto a dessalinização de água do mar tem um custo alto, que faz com que os consumidores finais demandem uma redução das tarifas da água dessalinizada (Navarro, 2018).

Considerando fatores como disponibilidade e impactos socioecológicos dos resíduos das fontes de abastecimento trabalhadas no diagrama de estoque e fluxo, o abastecimento hídrico do *hub* de H2V por água de reúso parece a solução mais viável, pois além de suprir a necessidade hídrica, possui um resíduo que oferece menores riscos para os sistemas socioecológicos, além de existir a possibilidade de inserir esse resíduo como insumo em outras indústrias. O estudo também expõe que a escolha tecnológica de resfriamento do sistema de produção de H2V é a variável mais importante para a produção de H2V. Por isso, sugere-se que

se opte por tecnologias de resfriamento fechado, em que a perda de água por evaporação é menor quando comparada a tecnologia de resfriamento aberta.

5 DISCUSSÃO

Os resultados do sistema preferência por dessalinização de água do mar apontam que a produção de H2V é principalmente influenciada pela fração de água destinada ao processo de resfriamento da planta de H2V. Em seguida, a eficiência de conversão do eletrolisador também é muito importante. No comparativo entre as fontes não convencionais de água, a capacidade inicial instalada da EPAR mostrou influenciar maior na produção do H2V. Um dos motivos para isso é o fato de o efluente ser 99% composto por água. Outro fator que suporta a escolha de utilizar água de reúso é o fato de possibilidades de economia circular mais viáveis surgirem a partir dessa escolha tecnológica, implicando no surgimento de modelos de negócios circulares. Por último, os impactos ambientais do lodo são mais facilmente gerenciados, sendo permitido até mesmo a incineração ou o envio do lodo a aterros sanitários. A necessidade energética e a emissão de CO₂ no contexto da produção de água de reúso é menor do que no contexto da produção de água por meio de dessalinização do mar. Desse modo, este estudo corrobora com os resultados de Navarro (2018) em afirmar que a água de reúso apresenta mais vantagens do que a dessalinização de água do mar e com Woods, Bustamante e Aguey-Zinsou (2022) ao afirmar que especificamente para a produção de H2V, a água de reúso é mais viável.

Apesar dessa vantagens e do PAERHCE e do PGECAGECE sugerirem a aplicação de água de reúso para uso industrial, entrevistas, o EIA/RIMA da Fortescue e o EIA/RIMA do *hub* de H2V do CIPP mostram que a opção pela fonte de abastecimento será a dessalinização de água do mar. Isso implica em maior consumo de energia, maior emissão de CO₂ e no lançamento salmoura no mar, o que pode ocasionar uma série de impactos ecológicos e socioeconômicos para comunidades tradicionais da região. A escolha por essa tecnologia pode ser um indicativo da falta de credibilidade do governo em garantir oferta hídrica para o CIPP e para o *hub* de H2V por meio da água de reúso. Um fato que embasa isto é que desde 2011 há o debate a respeito da produção de água de reúso para abastecimento do CIPP, contudo, não houve ação efetiva para a construção e operação da EPAR.

A partir dos resultados do modelo, é possível verificar como as dimensões ecológica, social e tecnológica interagem entre si e como a dinâmica de sistemas é capaz de capturar a não linearidade, os *loops* de *feedback* e as acumulações e os esvaziamentos do sistema. Isso mostra o quão complexo é o sistema de produção de H2V no Ceará e que uma

visão holística e uma governança sustentável são necessárias. Esses elementos estão presentes no *framework* de sistema sócio-ecológico-tecnológico urbano (SETS em tradução do inglês). Um SETS é definido como um ecossistema marcado pelo fluxo e o acúmulo de energia por meio de organismos, infraestrutura construída, instituições e ambiente (Lugo, 2020). Estudar SETS é importante, pois possibilita a identificação de riscos, incertezas, interações e *feedbacks* e isso implica em considerações interessantes a respeito de estratégias de governança e aos desafios associados a isso (Ahlborg *et al.*, 2019). Esses elementos estão presentes no estudo e a dinâmica de sistemas pode ser uma ferramenta para modelar e analisar os possíveis cenários para o SETS:

- a) riscos: (1) identificação da quantidade de resíduos gerados a partir da escolha tecnológica pelo ator empresa e (2) identificação dos possíveis efeitos que o despejo de salmoura por acarretar ao mar cearense;
- b) incertezas: devido à falta de ação do governo quanto à construção e operação da EPAR, pode ter implicado na escolha da dessalinização de água do mar como fonte principal de abastecimento hídrico do preferência por dessalinização de água do mar;
- c) interações e *feedbacks*: identificação dos caminhos e efeitos que o comportamento de uma variável pertencente a um setor pode ocasionar em outro setor;

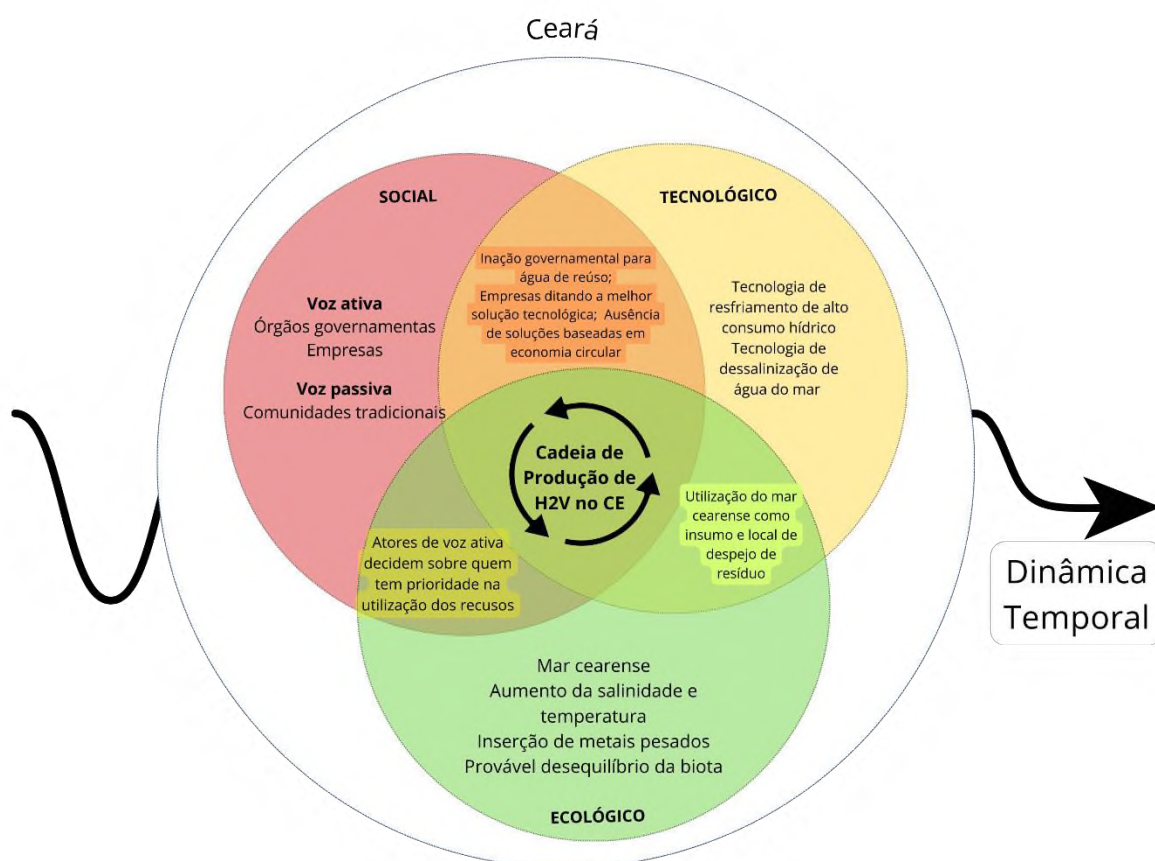
Nesse *framework*, a palavra urbano diz respeito a qualquer tipo de área ocupada por seres humanos dentro de uma área metropolitana e aos impactos produzidos por essa área urbana por meio da cadeia de suprimentos que embasa essa área e suas emissões (Krueger *et al.*, 2022). Os demais componentes do sistema são descritos a seguir:

- a) sistema social: são os atores relevantes e suas interações. Estão inclusos nesse sistema o governo, a sociedade civil organizada, autoridades governamentais, empresas e acadêmicos. Esses atores coletam informações e tomam decisões a respeito do acesso e distribuição dos recursos, da gestão dos ecossistemas, das configurações do espaço urbano e consomem os recursos disponíveis no ecossistema. A interação entre os atores é mediada por normas, regras, valores cultura, mas também pelo ecossistema e sistema tecnológico em que estão inseridos (Krueger *et al.*, 2022);
- b) ecossistema: inclui florestas, oceanos, rios, lagos, solo, atmosfera, água subterrânea. Estes espaços possuem recursos como água, fibra, alimento, combustível (Krueger *et al.*, 2022);
- c) sistema tecnológico: relativo à infraestrutura física, como prédios e redes de distribuição, onde acontecem os fluxos de transporte de recursos, pessoas e informações (Krueger *et al.*, 2022). Os elementos do sistema tecnológico mediam a interação entre os ecossistemas e o sistema social. Este sistema modifica os exercícios de poder, origina as pressões do sistema e altera a escala de influência humana sobre os recursos do ecossistema e o impacto da espécie humana sobre o ecossistema (Ahlborg *et al.*, 2019).

Devido à complexidade dos sistemas, é necessário que haja uma governança

sustentável capaz de planejar os processos de um sistema, bem como garantir produção e distribuição justa e ecologicamente viável dos bens ou serviços neste sistema (Krueger *et al.*, 2022). Para atingir a produção e distribuição justa e ecologicamente viável, a economia circular surge como uma forma de permitir que os recursos fluam entre sistemas naturais e artificiais com impactos positivos na economia, na ecologia e na sociedade ao passo que evita efeitos negativos. Por isso, o SETS é importante impulsionador da EC em um mundo escasso em recurso (Leer; Timmeren; Wandl, 2018). A figura 36 incorpora os resultados do modelo com preferência por dessalinização de água do mar deste estudo ao *framework* SETS.

Figura 37 - SETS do preferência por dessalinização de água do mar da cadeia de produção de H2V no Ceará.



Fonte: adaptado de Krueger *et al.* (2023) a partir dos dados da pesquisa (2023).

Este estudo captura as interrelações entre os sistemas social, tecnológico e ecológico no que tange à produção de H2V do modelo com preferência por dessalinização de água do mar. A pesquisa mostrou que ator social Governo não toma ações efetivas para viabilizar a operação de água de reúso e que o ator social empresas escolhem a fonte hídrica que gera menor riscos para sua operação, a dessalinização de água do mar. A opção por essa

tecnologia de abastecimento hídrico unido à escolha de uma tecnologia de resfriamento de alto consumo hídrico pode levar a uma maior produção de salmoura em relação à quantidade de H₂V produzida. O despejo da salmoura no ambiente marinho pode ocasionar desequilíbrio da biota. Este desequilíbrio da biota, por sua vez, pode decorrer em modificações do estilo de vida das comunidades costeiras, que vivem da pesca e do turismo. Desse modo, o sistema social dita que a prioridade de utilização do recurso água do mar é das empresas e não das comunidades tradicionais.

O H₂V é considerado a melhor solução para a descarbonização. Apesar de ser um vetor energético bastante versátil, potencialmente aplicável em vários setores da economia e potencialmente mitigador dos efeitos das Mudanças climáticas, há diversos fatores que devem ser estudados antes de uma larga aplicação deste vetor energético (Müller; Tunn; Kalt, 2022; Kumar; Lim, 2022; Scita; Raimondi; Noussan, 2020). A principal vantagem do H₂V é que dentre as formas de produção de H₂, essa é a que emite menos GEE, sendo cerca de 10 vezes menos emissor que o hidrogênio cinza (Tenhumberg; Büker, 2020). Contudo, ainda há várias barreiras para sua produção em larga escala (Scita; Raimondi; Noussan, 2020).

De modo geral, as principais barreiras tecnológicas na cadeia de valor do H₂V são relativas ao custo de produção do H₂V, visto que este é mais caro do que o custo de produção do H₂ cinza; ao armazenamento de H₂, visto que esse gás é altamente inflamável e requer um manejo especial; ao transporte, pois sua molécula é muito pequena e caso seja transportado na forma de amônia verde, não há quantidade suficiente de navios adaptados para o transporte desta molécula em larga escala. Também é importante salientar que a relação de poder entre os países pode se modificar devido ao desenvolvimento da cadeia de valor do H₂V (Scita; Raimondi; Noussan, 2020).

Embora a cadeia de valor do H₂V ainda não seja robusta, espera-se um desenvolvimento rápido, visto a grande quantidade de compromissos financeiros sendo firmados entre empresas e países para produção e exportação do vetor energético (Dillman; Heinonen, 2022; Scita; Raimondi; Noussan, 2020). Espera-se que até 2050, sejam comercializadas 420 megatoneladas de H₂V por ano (IRENA, 2022). No Brasil, somente o CE assinou cerca de 30 ME, além disso, já possui algumas empresas com contratos de locação de espaço assinados no CIPP voltados para a produção de H₂V em breve. Apesar de todo o discurso de o H₂V ser um promotor do desenvolvimento sustentável (Falcone; Hiete; Sapio, 2021), este estudo reforça uma parte da literatura que fala que caso haja a ausência de avaliações sociais da cadeia de valor do H₂V, este recurso pode implicar em um desenvolvimento socialmente irresponsável e uma distribuição inadequada dos benefícios e malefícios ao longo

da cadeia (Dillman; Heinonen, 2022). Esses malefícios podem ser resultado da dinâmica de relacionamento entre a governança global do hidrogênio e das condições locais dos países produtores (Müller; Tunn; Kalt, 2022). Por isso, teóricos que aplicam o *framework* SETS salientam que é importante uma governança sustentável para qualquer sistema (Krueger *et al.*, 2022).

Por isso, planejar a cadeia de valor do H2V é importante (Woods; Bustamante; Aguey-Zinsou, 2022). Caso a cadeia não seja bem gerenciada, a transição energética corre o risco de torna-se um novo elemento de transformação sem sucesso e estagnado (i.e., *business as usual*), não ser promotora do desenvolvimento sustentável, criar injustiças e vulnerabilidade e não resolver problemas existentes no mercado de energia e no âmbito socioeconômico (Sovacool *et al.*, 2019). Portanto, gerenciar os efeitos colaterais da produção de H2V é importante para o desenvolvimento sustentável. A forma como o SETS de produção de H2V no CE está sendo planejado corresponde a maior parte das estratégias de países quanto ao H₂, cujo foco é priorizar sua inserção na economia, principalmente voltado para exportação, ou seja, escalabilidade primeiro, limpeza depois. Nesse tipo de estratégia, a mitigação das Mudanças climáticas são uma preocupação, mas não são prioritárias, pois há falta de medidas regulatórias abrangentes e prescritivas (Chen; Lee, 2022).

6 CONCLUSÃO

Este estudo propôs um modelo válido para a compreensão do sistemas de abastecimento hídrico de um *hub* de H2V no Ceará. O ponto de partida desse estudo é a instalação de uma indústria intensiva no consumo de água em uma região semiárida no Brasil, que naturalmente sofre de escassez hídrica. Desse forma, o estudo atingiu seu objetivo: investigar as possíveis fontes de água para a produção de hidrogênio verde no Ceará por meio de dinâmica de sistemas.

O objetivo específico a, identificar as possíveis fontes de água para abastecimento do hub de H2V no Ceará, foi atingido por meio de revisão bibliográfica, entrevistas e análise documental. A partir desses instrumentos, verificou-se que o abastecimento do *hub* de H2V por meio de água bruta é inviável e que as fontes mais cotadas são dessalinização de água do mar e água de reúso. O objetivo específico b, montar um diagrama de retroalimentação causal que demonstre as relações entre as variáveis presentes no sistema de abastecimento hídrico de um *hub* de H2V no Ceará, foi atingido por meio de entrevistas, visita técnica e análise documental, que permitiram a identificação de variáveis importantes no sistema de produção de H2V e como essas variáveis se influenciam. O CLD foi a ferramenta de dinâmica de sistemas utilizada para representar graficamente os efeitos de *feedback* entre as variáveis e a direção as quais elas se influenciam auxiliando no alcance deste objetivo.

O objetivo específico c, formular um modelo matemático de estoques e fluxos que represente a produção de hidrogênio verde por meio de diferentes fontes hídricas de abastecimento no Ceará, foi atingido também por meio entrevistas, análise documental e visita técnica. Esses instrumentos subsidiaram a montagem do diagrama de estoque e fluxo, que permitiu a simulação de diversos cenários através do tempo a partir do modelo. Por fim, o objetivo específico d, propor a fonte de abastecimento hídrico mais viável para o abastecimento do *hub* de H2V no Ceará, foi cumprido a partir do diagrama de estoque e fluxo, que apontam a fonte de abastecimento mais viável para um *hub* de H2V no Ceará.

Os resultados apontam que o modelo com preferência por dessalinização de água do mar possui capacidade para abastecer o *hub* de H2V, contudo a inserção da salmoura no mar pode ocasionar diversos prejuízos ao sistema socioecológico. Um modelo alternativo, cujo abastecimento hídrico é realizado exclusivamente por meio de água de reúso, foi proposto. Os resultados do teste de sensibilidade do sistema alternativo demonstram que a água de reúso também possui capacidade de abastecer o *hub* de H2V e que, apesar de uma maior geração de lodo, esse resíduo é mais facilmente manejável, além de ter outras aplicações, podendo implicar

no aumento de circularidade da cadeia de produção de H2V. Ambos os sistemas simulados demonstram que a variável mais importante para a produção anual de H2V é a tecnologia de resfriamento do sistema de produção de H2V. Baseado nisso, o estudo propõe que a fonte de abastecimento hídrico mais viável para produzir o H2V é a água de reúso, dadas as condições apresentadas ao longo deste trabalho.

O trabalho também utiliza o *framework* SETS para entender o comportamento dinâmico do modelo com preferência por dessalinização de água do mar, demonstrando a influência da escolha dos atores sociais ativos sobre os sistemas tecnológicos, ecológicos e atores sociais passivos. Por isso, o trabalho avança na literatura demonstrando que a forma como a cadeia de H2V está sendo concebida pode fazer com que esse vetor energético se torna um vetor de desenvolvimento socialmente irresponsável devido a não consideração de fatores socioecológicos que podem ser vistos como pontos cegos na viabilização da cadeia de produção do H2V

Como limitações deste estudo há:

- a) falta de entrevistas com membros de comunidades tradicionais da região litorânea do CE para entender como o processo de assentamento de um *hub* de H2V pode afetar o modo de vida dos povos tradicionais. Essas entrevistas comporiam os objetivos específicos b e c e dariam maior robustez ao diagrama de retroalimentação causal e ao diagrama de estoque e fluxo;
- b) falta de dados confiáveis quanto as propriedades hidrodinâmicas do mar cearense e o comportamento do aumento da salinidade no mar do Ceará;
- c) não incorporar as possibilidades de economia circular sugeridas dentro do modelo de dinâmica de sistemas a fim de verificar se a sua execução operacional é possível

Conclui-se que este estudo contribui significativamente para a literatura, fornecendo uma abordagem robusta para entender o sistema de abastecimento hídrico no contexto da produção de hidrogênio verde no semiárido cearense. Demonstrou-se a viabilidade da água de reúso como a fonte mais apropriada para o abastecimento hídrico do hub de H2V no Ceará, em detrimento da dessalinização da água do mar, que apesar de viável, apresenta riscos consideráveis ao ecossistema local. Os resultados encontrados são de extrema relevância para o desenvolvimento sustentável da cadeia de produção de H2V no Brasil, especialmente em regiões com escassez hídrica. Entretanto, é importante ressaltar as limitações do estudo, que

apontam para a necessidade de pesquisas futuras que contemplem a perspectiva das comunidades tradicionais, aprofundem o conhecimento sobre as propriedades hidrodinâmicas do mar cearense e investiguem a viabilidade operacional de práticas de economia circular no contexto em questão.

7 REFERÊNCIAS

- ABAD, A. V.; DODDS, P. E. Green hydrogen characterization initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. **Energy Policy**, v. 138, 1 mar. 2020.
- ABBASI, Nazanin; AHMADI, Maryam; NASERI, Maryam. Quality and cost analysis of a wastewater treatment plant using GPS-X and CapdetWorks simulation programs. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 284, p. 1-14, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111993>.
- ABDIN, Zainul; ZAFARANLOO, Ali; RAFIEE, Ahmad; MÉRIDA, Walter; LIPIŃSKI, Wojciech; KHALILPOUR, Kaveh R. Hydrogen as an energy vector. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 120, p. 109620, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>.
- ABDELKAREEM, Mohammad Ali; ASSAD, M. El Haj; SAYED, Enas Taha; SOUDAN, Bassel. Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. **Desalination**, [S.L.], v. 435, p. 97-113, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.018>.
- ABREU, Mônica Cavalcanti Sá de; MOTA, Renata Castro; PAULA, Eugênia Vale de. IDENTIFYING BARRIERS AND PROPOSING A ROADMAP TO DEVELOP INDUSTRIAL SYMBIOSIS PROJECTS. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 13, n. 3, p. 517-534, mar. 2020.
- AES BRASIL. **AES Brasil assina pré-contrato com o Complexo de Pecém para produção de hidrogênio e amônia verde**. 2022. Disponível em: <https://www.aesbrasil.com.br/pt-br/aes-brasil-assina-pre-contrato-com-o-complexo-de-pecem-para-producao-de-hidrogenio-e-amonias-verdes>. Acesso em: 06 dez. 2022.
- AHLBORG, Helene; RUIZ-MERCADO, Ilse; MOLANDER, Sverker; MASERA, Omar. Bringing Technology into Social-Ecological Systems Research—Motivations for a Socio-Technical-Ecological Systems Approach. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 1-23, 4 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11072009>.
- AKPAN, Victor E.; OMOLE, David O.; BASSEY, Daniel E. Assessing the public perceptions of treated wastewater reuse: opportunities and implications for urban communities in developing countries. **Heliyon**, [S.L.], v. 6, n. 10, p. 1-23, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05246>.
- ALAM, Muhammad; ALANAZI, Hani; ALTHOEY, Fadi; DEIFALLA, Ahmed Farouk; AHMAD, Jawad. Mechanical performance of concrete made with sewage sludge ash: a review (part 1). **Science And Engineering Of Composite Materials**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 1-14, 1 Jan. 2023. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2022-0203>.
- ALDRIDGE, Jamie. **Weight of Freight**: can the ammonia fleet match growing demand? Can

the ammonia fleet match growing demand? 2023. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/en/blog/2023/february/9/wof-can-the-ammonia-fleet-match-growing-demand>. Acesso em: 26 set. 2023.

ANDERS, Cláudio Rodrigues; FERNANDES, Cleyton dos Santos; DIAS, Nildo da Silva; GOMES, Jonath Werissimo da Silva; MELO, Mikhael Rangel de Souza; SOUZA, Bruno Goulart Azevedo de; SOUZA, Ana Cláudia Medeiros; JÔNIO, Francisco Souto de Sousa. Environmental impacts of reject brine disposal from desalination plants. **Desalination And Water Treatment**, S.L, v. 1, n. 181, p. 17-26, nov. 2020.

AL-SHARAFI, A. *et al.* Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, 1 mar. 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1193 – 06**: Standard Specification for Reagent Water. West Conshohocken: ASTM International, 2018. 6 p.

BALA, B. K.; ARSHAD, F. M.; NOH, K. M. **System Dynamics Modelling and Simulation**. 1. ed. Singapore: Springer, 2017. v. 1

BALL, M.; WEEDA, M. The hydrogen economy - Vision or reality? **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 25, p. 7903–7919, 6 jul. 2015.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, v. 12, n. 3, p. 183–210, 1996.

BECKER, Hans; MURAWSKI, James; SHINDE, Dipak V.; STEPHENS, Ifan E. L.; HINDS, Gareth; SMITH, Graham. Impact of impurities on water electrolysis: a review. **Sustainable Energy & Fuels**, [S.L.], v. 7, n. 7, p. 1565-1603, 2023. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d2se01517j>.

BESWICK, Rebecca R.; OLIVEIRA, Alexandra M.; YAN, Yushan. Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem? **Acs Energy Letters**, [S.L.], v. 6, n. 9, p. 3167-3169, 17 ago. 2021. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acsenergylett.1c01375>.

BROWN, Trevor. **MAN Energy Solutions: an ammonia engine for the maritime sector**. 2019. Disponível em: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-energy-solutions-an-ammonia-engine-for-the-maritime-sector/>. Acesso em: 26 set. 2023.

CAGECE. Plano de Gestão Estratégica e de Negócio (2019 – 2023). Fortaleza: Cagece, 2019.

CAGECE. **Esgoto**. 2023. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/produtos-e-servicos/esgoto/>. Acesso em: 24 maio 2023

CANTARERO, Maria Mercedes Vanegas. Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v. 70, p. 101716, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2020.101716>.

CAPELLÁN-PÉREZ, Iñigo; BLAS, Ignacio de; NIETO, Jaime; CASTRO, Carlos de; MIGUEL, Luis Javier; CARPINTERO, Óscar; MEDIAVILLA, Margarita; LOBEJÓN, Luis Fernando; FERRERAS-ALONSO, Noelia; RODRIGO, Paula; FRECHOSO, Fernando; ÁLVAREZ-ANTELO, David. MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints. **Energy & Environmental Science**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 986-1017, 2020. Royal Society of Chemistry (RSC).
<http://dx.doi.org/10.1039/c9ee02627d>.

CAPODAGLIO, Andrea; OLSSON, Gustaf. Energy Issues in Sustainable Urban Wastewater Management: use, demand reduction and recovery in the urban water cycle. *Sustainability*, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 266, 29 dez. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12010266>.
CARDOSO, Bruno J.; RODRIGUES, Eugénio; GASPARELLO, Adélio R.; GOMES, Álvaro. Energy performance factors in wastewater treatment plants: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 322, p. 129107, nov. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107>.

CASTELLET-VICIANO, Lledó; HERNÁNDEZ-CHOVER, Vicent; HERNÁNDEZ-SANCHO, Francesc. The benefits of circular economy strategies in urban water facilities. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 844, p. 157172, out. 2022. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157172>.

CAVALIERE, Pasquale Daniele; PERRONE, Angelo; SILVELLO, Alessio. Water Electrolysis for the Production of Hydrogen to Be Employed in the Ironmaking and Steelmaking Industry. **Metals**, [S.L.], v. 11, n. 11, p. 1816, 12 nov. 2021. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/met11111816>.

CHOJNACKA, Katarzyna; SKRZYPCZAK, Dawid; SZOPA, Daniel; IZYDORCZYK, Grzegorz; MOUSTAKAS, Konstantinos; WITEK-KROWIAK, Anna. Management of biological sewage sludge: fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 116602, Jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602>.

CEARÁ (Estado). Lei nº 16.033, de 20 de junho de 2016. **DISPÕE SOBRE A POLÍTICA DE REÚSO DE ÁGUA NÃO POTÁVEL NO ÂMBITO DO ESTADO DO CEARÁ**. Fortaleza, CE, 22 jun. 2016. p. 1-3.

CEARÁ. **PLANO DE AÇÕES ESTRATÉGICAS DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2018. 171 p.

CEARÁ. **Ceará: atlas eólico e solar**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2019. 196 p.

CEARÁ. Resolução nº 01, de 28 de janeiro de 2022. **DISPÕE SOBRE A COBRANÇA PELO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS DE DOMÍNIO DO ESTADO DO CEARÁ OU DA UNIÃO, POR DELEGAÇÃO DE COMPETÊNCIA. Resolução CONERH Nº01/2022, de 28 de janeiro de 2022**. Fortaleza, CE, 01 fev. 2022c. n. 024, Seção 3, p. 1.

CEARÁ. Hub Hidrogênio Verde. 2023. Disponível em: <https://www.sedet.ce.gov.br/clusters-prioritarios/hub-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 16 mar. 2023.

CEARÁ. Memorando de Entendimento, 200, 06 de julho de 2021. **MEMORANDO DE ENTENDIMENTOS QUE ENTRE SI CELEBRAM O ESTADO DO CEARÁ, COM SEUS ÓRGÃOS VINCULADOS, E A QAIR BRASIL, OBJETIVANDO O DESENVOLVIMENTO DE PLANTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE COM ENERGIA ELÉTRICA GERADA ATRAVÉS DO COMPLEXO EÓLICO MARÍTIMO DRAGÃO DO MAR NO CEARÁ.**, Fortaleza, ano 14, n. 200, p. 1, 31 ago. 2021. Disponível em:

<http://pesquisa.doe.seplag.ce.gov.br/doepesquisa/sead.to?page=pesquisaTextual&cmd=11&action=InicialTextual&flag=>. Acesso em: 14 set. 2022.

CHEN, Zhuo; WANG, Dan; DAO, Guohua; SHI, Qi; YU, Tong; GUO, Fang; WU, Guangxue. Environmental impact of the effluents discharging from full-scale wastewater treatment plants evaluated by a hybrid fuzzy approach. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 790, p. 148212, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148212>.

COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. Mapa das bacias hidrográficas. 2018. Disponível em: <http://portal.Companhia de Gestão de Recursos Hídricos.com.br/bacia/>. Acesso em: 11 dez. 2022.

CHFADI, Tarik; GHEBLAWI, Mohamed; THAHA, Renna. Public Acceptance of Wastewater Reuse: new evidence from factor and regression analyses. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 10, p. 1391, 17 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13101391>.

COMPLEXO DO PECÉM (Ceará). **HISTÓRICO**. 2022a. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/institucional/>. Acesso em: 04 dez. 2022.

COMPLEXO DO PECÉM (Ceará). HUB DE HIDROGÊNIO VERDE DO COMPLEXO DO PECÉM. 2022b. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/hubh2v/>. Acesso em: 04 dez. 2022.

COMPLEXO DO PECÉM (Ceará). **INSTITUCIONAL**. 2022c. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/institucional/>. Acesso em: 04 dez. 2022.

CRINI, Grégorio; LICHTFOUSE, Eric. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. **Environmental Chemistry Letters**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 145-155, 31 jul. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>.

DANGERFIELD, B. Systems thinking and system dynamics: A primer. In: BRAILSFORD, S.; CHURILOV, L.; DANGERFIELD, B. (Eds.). **DISCRETE-EVENT SIMULATION AND SYSTEM DYNAMICS FOR MANAGEMENT DECISION MAKING**. 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2014a. v. 1p. 1–362.

DARRE, Natasha C.; TOOR, Gurpal S.. Desalination of Water: a review. **Current Pollution Reports**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 104-111, 14 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40726-018-0085-9>.

DAVIESS, M. A.; SCHMITZ, T. L. **System Dynamics for Mechanical Engineers**. 1. ed. New York: Springer, 2015. v. 1

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. **International Journal of Hydrogen Energy**. Elsevier Ltd, 7 fev. 2020.

DILLMAN, K.J.; HEINONEN, J.. A ‘just’ hydrogen economy: a normative energy justice assessment of the hydrogen economy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 167, p. 1-14, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112648>.

DING, Tao; LIANG, Liang; ZHOU, Kaile; YANG, Min; WEI, Yuqi. Water-energy nexus: the origin, development, and prospect. **Ecological Modelling**, [S.L.], v. 419, p. 108943, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.108943>.

DUGGAN, Jim. **System Dynamics Modeling with R**. California: Springer Nature, 2016. 188 p.

EGERER, Jonas; GRIMM, Veronika; NIAZMAND, Kiana; RUNGE, Philipp. The economics of global green ammonia trade – “Shipping Australian wind and sunshine to Germany”. **Applied Energy**, [S.L.], v. 334, p. 1-15, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120662>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Competitividade do Gás Natural**: estudo de caso na indústria de fertilizantes nitrogenados. Rio de Janeiro: EPE, 2019. (No EPE-DEA-IT-001/2019). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-01-19%20-%20GN_Fertilizantes.pdf. Acesso em: 30 set. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**: ano base 2020. Brasília, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**: ano base 2022. Brasília, 2022.

ENEGIX. **Corporate Presentation Base One**, Brazil. 2021. Disponível em: <https://docsend.com/view/ffgscmqz4hpszkt4>. Acesso em: 03 dez. 2022.

ENENG, Rahmi; LULOFS, Kris; ASDAK, Chay. Towards a water balanced utilization through circular economy. **Management Research Review**, [S.L.], v. 41, n. 5, p. 572-585, 18 abr. 2018. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/mrr-02-2018-0080>.

ELSAID, Khaled; KAMIL, Mohammed; SAYED, Enas Taha; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; WILBERFORCE, Tabbi; OLABI, A.. Environmental impact of desalination technologies: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 748, p. 1-19, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>.

FALCONE, P. M.; HIETE, M.; SAPIO, A. Hydrogen economy and sustainable development goals: Review and policy insights. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, Elsevier B.V., 1 out. 2021.

FIGUEIRA, Mariana; RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, Daniel; LÓPEZ, Julio; REIG, Mònica; CORTINA, José Luis; VALDERRAMA, César. Experimental and economic evaluation of nanofiltration as a pre-treatment for added-value elements recovery from seawater

desalination brines. **Desalination**, [S.L.], v. 549, p. 1-13, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2022.116321>.

FONTENELLE, Ana Luiza; NILSSON, Erik; HIDALGO, Ieda Geriberto; UVO, Cintia B.; PEYERL, Drielli. Temporal Understanding of the Water–Energy Nexus: a literature review. **Energies**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 2851, 13 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en15082851>.

FORTES, Patrícia; LOPES, Rita; DIAS, Luis; SEIXAS, Júlia; GOUVEIA, João Pedro; MARTINHO, Sandra; MONJARDINO, Joana; TENTE, Hugo. CIRCULAR ECONOMY AND CLIMATE MITIGATION: benefits and conflicts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND ENVIRONMENT, 4., 2019, Guimarães. Proceedings [...]. Guimarães: **International Conference On Energy And Environment**, 2019. p. 1-6.

FORTES, Patricia; SIMOES, Sofia G.; BRÁS, Teresa Armada; AMORIM, Filipa. Competing water uses between agriculture and energy: quantifying future climate change impacts for the portuguese power sector. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 371, p. 133629, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133629>.

FOUQUET, R.; PEARSON, P. J. G. Past, and prospective energy transitions: Insights from history. **Energy Policy**, v. 50, p. 1–7, nov. 2012.

FREITAS, A. R. P. DE. **COLABORAÇÃO EM REDE PARA A TRANSIÇÃO PARA UMA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA DE BAIXO CARBONO**. Tese de doutorado—Fortaleza: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2021.

FROTA, Renata Locarno; SILVA, Samíria Maria Oliveira; SOUZA FILHO, Francisco de Assis; PORTO, Victor Costa. A Hydro-Economic Model to Support Water Scarcity. **Water Economics and Policy**, [S.L.], p. 1-28, 20 Jul. 2022. World Scientific Pub Co Pte Ltd. <http://dx.doi.org/10.1142/s2382624x22500126>.

FUNCEME. Institucional: apresentação. Apresentação. 2023. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=352. Acesso em: 13 jun. 2023.

GARCÍA-PACHECO, Raquel; GALIZIA, Albert; TORIBIO, Sergi; GABARRÓ, Jordi; MOLINA, Serena; LANDABURU-AGUIRRE, Junkal; MOLINA, Francisco; BLANDIN, Gaetan; MONCLÓS, Hèctor; RODRÍGUEZ-RODA, Ignasi. Landfill Leachate Treatment by Using Second-Hand Reverse Osmosis Membranes: long-term case study in a full-scale operating facility. **Membranes**, [S.L.], v. 12, n. 11, p. 1-19, 21 nov. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/membranes12111170>.

GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy M.P.; HULTINK, Erik Jan. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 143, p. 757-768, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

GHIMIRE, Umesh; SARPONG, Gideon; GUDE, Veera Gnaneswar. Transitioning Wastewater Treatment Plants toward Circular Economy and Energy Sustainability. **Acs Omega**, [S.L.], v. 6, n. 18, p. 11794-11803, 27 abr. 2021. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c05827>.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems.

Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 114, p. 11-32, fev. 2016. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

GINSBERG, Michael; ZHANG, Zhuoran; ATIA, Adam A.; VENKATRAMAN, Maya; ESPOSITO, Daniel V.; FTHENAKIS, Vasilis M. Integrating Solar Energy, Desalination, and Electrolysis. **Solar Rrl**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 1-13, 23 abr. 2022. Wiley.

<http://dx.doi.org/10.1002/solr.202100732>.

GOMES, Pedro Henrique; PEREIRA, Silvano Porto; TAVARES, Tallita Cruz Lopes; GARCIA, Tatiane Martins; SOARES, Marcelo O. Impacts of desalination discharges on phytoplankton and zooplankton: perspectives on current knowledge. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 863, p. 1-10, mar. 2023. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160671>.

GONÇALVES, P. Back to basics: fundamental principles of system dynamics and queueing theory. **System Dynamics Review**, v. 38, n. 1, p. 81–92, 1 jan. 2022.

GUERRA-RODRÍGUEZ, Sonia; OULEGO, Paula; RODRÍGUEZ, Encarnación; SINGH, Devendra Narain; RODRÍGUEZ-CHUECA, Jorge. Towards the Implementation of Circular Economy in the Wastewater Sector: challenges and opportunities. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1431, 18 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12051431>.

HAMICHE, Ait Mimoune; STAMBOULI, Amine Boudghene; FLAZI, Samir. A review of the water-energy nexus. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 65, p. 319-331, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.020>.

HAO, Xiaodi; WANG, Xiangyang; LIU, Ranbin; LI, Shuang; VAN LOOSDRECHT, Mark C.M.; JIANG, Han. Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants. **Water Research**, [S.L.], v. 160, p. 268-277, set. 2019. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.068>.

HE, Yan; ZHU, Yishuang; CHEN, Jinghan; HUANG, Minsheng; WANG, Pan; WANG, Guohua; ZOU, Weiguo; ZHOU, Gongming. Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 228, p. 399-404, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.320>

HECHER, M. *et al.* An integrative analysis of energy transitions in energy regions: A case study of öko Energieland in Austria. *Ecological Economics*, v. 121, p. 40–53, 1 Jan. 2016.

HERNÁNDEZ-CHOVER, Vicent; BELLVER-DOMINGO, Águeda; HERNÁNDEZ-SANCHO, Francesc. Efficiency of wastewater treatment facilities: the influence of scale economies. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 228, p. 77-84, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.014>.

HERRERO-GONZALEZ, Marta; IBÁÑEZ, Raquel. Technical and Environmental Feasibilities of the Commercial Production of NaOH from Brine by Means of an Integrated EDBM and Evaporation Process. **Membranes**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 1-12, 14 set. 2022. MDPI

AG. <http://dx.doi.org/10.3390/membranes12090885>.

HIRSH, R. F.; JONES, C. F. History's contributions to energy research and policy. **Energy Research and Social Science**, v. 1, p. 106–111, 2014.

HOEK, Jan van Der; DUIJFF, Rogier; REINSTRA, Otto. Nitrogen Recovery from Wastewater: possibilities, competition with other resources, and adaptation pathways. **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 4605, 5 dez. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10124605>.

HUANG, Jingsi; LI, Wei; WU, Xiangyu. Forecasting the Hydrogen Demand in China: a system dynamics approach. **Mathematics**, [S.L.], v. 10, n. 205, p. 1-24, 10 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/math10020205>.

HUKARI, Sirja; HERMANN, Ludwig; NÄTTORP, Anders. From wastewater to fertilizers — Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 542, p. 1127-1135, Jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.064>.

IMASIKU, K. *et al.* A policy review of green hydrogen economy in Southern Africa. **Sustainability** (Switzerland), v. 13, n. 23, p. 1–17, 1 dez. 2021.

INSUASTY-REINA, Jeniffer Guadalupe; OSORIO-GOMEZ, Juan Carlos; MANOTAS-DUQUE, Diego Fernando. A System Dynamics Model for the Analysis of CO2 Emissions Derived from the Inclusion of Hydrogen Obtained from Coal in the Energy Matrix in Colombia. **International Journal of Energy Economics And Policy**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 72-82, 20 mar. 2022. EconJournals. <http://dx.doi.org/10.32479/ijeep.12538>.

IPCC (org.). Glossary of terms. In: **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 555-564.

IPCC. **Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability. summary for policymakers**. 6. ed. Genebra: IPCC, 2022. 37 p.

IPECE. **BOLETIM SOBRE A EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO ESTADO DO CEARÁ 2021**. 2022. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2023/01/Boletim_Emissao_Gases_Efeito_Estufa_2021_.pdf. Acesso em: 30 set. 2023.

IRENA. **Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.

JAFARINEJAD, Shahryar. A framework for the design of the future energy-efficient, cost-effective, reliable, resilient, and sustainable full-scale wastewater treatment plants. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, [S.L.], v. 13, p. 91-100, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.001>.

JASIM, Nuralhuda Aladdin. The design for wastewater treatment plant (WWTP) with GPS X modelling. **Cogent Engineering**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1723782, 1 Jan. 2020. Informa UK

Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2020.1723782>.

JEONG, Hanseok; ADAMOWSKI, Jan. A system dynamics-based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 171, p. 89-107, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.019>.

JONES, Edward; QADIR, Manzoor; VAN VLIET, Michelle T.H.; SMAKHTIN, Vladimir; KANG, Seong-Mu. The state of desalination and brine production: a global outlook. **Science Of the Total Environment**, [S.L.], v. 657, p. 1343-1356, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.

KALYA, Esra; ALVER, Alper. Determining the contribution of the wastewater treatment plant to the sustainable environment with water footprint indicators. **Environment, Development and Sustainability**, [S.L.], v. 3, p. 1-16, 16 ago. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-022-02600-3>.

KAMBLE, Sheetal; SINGH, Anju; KAZMI, Absar; STARKL, Markus. Environmental and economic performance evaluation of municipal wastewater treatment plants in India: a life cycle approach. **Water Science and Technology**, [S.L.], v. 79, n. 6, p. 1102-1112, 15 mar. 2019. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2019.110>.

KHAN, Syed Abdul Rehman; PONCE, Pablo; YU, Zhang; GOLPÎRA, Hêriş; MATHEW, Manoj. Environmental technology and wastewater treatment: strategies to achieve environmental sustainability. **Chemosphere**, [S.L.], v. 286, p. 1-10, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131532>.

KNÄBLE, David; PUENTE, Esther de Quevedo; PÉREZ-CORNEJO, Clara; BAUMGÄRTLER, Thomas. The impact of the circular economy on sustainable development: a european panel data approach. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 34, p. 233-243, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.016>.

KOTZE, Rick; BRENT, Alan C.; MUSANGO, Josephine; KOCK, Imke de; MALCZYNSKI, Leonard A.. Investigating the Investments Required to Transition New Zealand's Heavy-Duty Vehicles to Hydrogen. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 1646, p. 1-22, 16 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14061646>.

KUMAR, S. Shiva; LIM, Hankwon. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. **Energy Reports**, [S.L.], v. 8, p. 13793-13813, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127>

KRUEGER, Elisabeth H.; CONSTANTINO, Sara M.; CENTENO, Miguel A.; ELMQVIST, Thomas; WEBER, Elke U.; LEVIN, Simon A.. Governing sustainable transformations of urban social-ecological-technological systems. **Npj Urban Sustainability**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-12, 3 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s42949-022-00053-1>.

LAHANE, Swapnil; KANT, Ravi. Investigating the sustainable development goals derived due to adoption of circular economy practices. **Waste Management**, [S.L.], v. 143, p. 1-14, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.016>.

LANDABURU-AGUIRRE, Junkal; GARCÍA-PACHECO, Raquel; MOLINA, Serena; RODRÍGUEZ-SÁEZ, Laura; RABADÁN, Javier; GARCÍA-CALVO, Eloy. Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination. **Desalination**, [S.L.], v. 393, p. 16-30, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.04.002>.

LASSAUX, Stéphane; RENZONI, Robert; GERMAIN, Albert. Life Cycle Assessment of Water: from the pumping station to the wastewater treatment plant (9 pp). **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 118-126, 1 jan. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2005.12.243>.

LEE, D.J., 2017. Proper treatment and reuse of sludge: strategy. In: Proceedings of 2017 Conference Sludge Treatment and Management and Resource Utilization. Shanghai, China

LEER, Janneke van Der; VAN TIMMEREN, Arjan; WANDL, Alexander. Social-Ecological-Technical systems in urban planning for a circular economy: an opportunity for horizontal integration. **Architectural Science Review**, [S.L.], v. 61, n. 5, p. 298-304, 31 ago. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2018.1505598>.

LI, Chengzhe; ZHANG, Libo; OU, Zihan; MA, Jiayu. Using system dynamics to evaluate the impact of subsidy policies on green hydrogen industry in China. **Energy Policy**, [S.L.], v. 165, p. 112981, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112981>.

LIANG, Shizhi; HUANG, Yufei; DING, Tao. Efficiency Evaluation and Projection Improvement of the Industrial Water–Energy Nexus in China Based on Network Data Envelopment Analysis. **Frontiers In Energy Research**, [S.L.], v. 9, p. 1-10, 12 jul. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2021.707922>.

LIMA JÚNIOR, Francisco do O' de; MOTA, Fernando Cezar de Macedo; ALVES, Denis Fernandes. Modernização competitiva e o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP): rearranjos nas dinâmicas territoriais e econômicas. **Revista Transporte y Territorio**, [S.L.], n. 25, p. 160-179, 21 dez. 2021. Editorial de la Facultad de Filosofía y Letras - Universidad de Buenos Aires. <http://dx.doi.org/10.34096/rtt.i25.7969>.

LIN, Cheng-Wei; TRAN, Hai Nguyen; JUANG, Ruey-Shin. Reclamation and reuse of wastewater by membrane-based processes in a typical midstream petrochemical factory: a techno-economic analysis. **Environment, Development And Sustainability**, [S.L.], p. 1-12, 6 jan. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-022-02880-9>.

LIU, Ta-Kang; YE, Jia-An; SHEU, Haw-Yang. Exploring the social acceptability for the desalination plant project: perceptions from the stakeholders. **Desalination**, [S.L.], v. 532, p. 1-10, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2022.115757>.

LYNN, Ciarán J.; DHIR, Ravindra K.; GHATAORA, Gurmel S.; WEST, Roger P. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 98, p. 767-779, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122>

LOHRMANN, Alena; CHILD, Michael; BREYER, Christian. Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. **Energy**, [S.L.], v. 233, p. 121098, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098>.

LOORBACH, D.; FRANTZESKAKI, N.; AVELINO, F. Sustainability Transitions Research: Transforming Science and Practice for Societal Change. **Annual Review of Environmental and Resources**, v. 42, n. 1, p. 599–626, 10 jul. 2017.

LUGO, Ariel E.. Effects of Extreme Disturbance Events: from ecesis to social•ecological•technological systems. **Ecosystems**, [S.L.], v. 23, n. 8, p. 1726-1747, 18 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-020-00491-x>.

MACÍA, Y. M. *et al.* Green hydrogen value chain in the sustainability for port operations: Case study in the region of Valparaíso, Chile. **Sustainability** (Switzerland), v. 13, n. 24, 1 dez. 2021.

MACFARLANE, Douglas R.; CHOI, Jaecheol; SURYANTO, Bryan H. R.; JALILI, Rouhollah; CHATTI, Manjunath; AZOFRA, Luis Miguel; SIMONOV, Alexandr N. Liquefied Sunshine: transforming renewables into fertilizers and energy carriers with electromaterials. **Advanced Materials**, [S.L.], v. 32, n. 18, p. 1-13, 25 Nov. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201904804>.

MACFARLANE, Douglas R.; CHEREPANOV, Pavel V.; CHOI, Jaecheol; SURYANTO, Bryan H.R.; HODGETTS, Rebecca Y.; BAKKER, Jacinta M.; VALLANA, Federico M. Ferrero; SIMONOV, Alexandr N.. A Roadmap to the Ammonia Economy. **Joule**, [S.L.], v. 4, n. 6, p. 1186-1205, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>.

MAMIDI, V.; MARISSETTY, V. B.; THOMAS, E. N. Clean energy transition and intertemporal socio-economic development: Evidence from an emerging market. **Energy Economics**, v. 101, 1 set. 2021.

MANNINA, Giorgio; GULHAN, Hazal; NI, Bing-Jie. Water reuse from wastewater treatment: the transition towards circular economy in the water sector. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 363, p. 127951, Nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951>.

MARANGON, Bianca Barros; SILVA, Thiago Abrantes; CALIJURI, Maria Lúcia; ALVES, Sabrina do Carmo; SANTOS, Vitor Juste dos; OLIVEIRA, Adriana Paulo de Sousa. Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil's semi-arid regions. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 37, p. 1-9, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101483>.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln M.; ALVALA, Regina C.S; CUNHA, Ana Paula; BRITO, Sheila; MORAES, Osvaldo L.L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 90, n. 21, p. 1973-1985, ago. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical And Applied Climatology**, [S.L.], v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 9 jun. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARQUES, Jasna Maria Luna; CRUZ, Raúl; FEITOSA, Caroline Vieira. Dynamics of artisanal fisheries performed with hook-and-line gear under different management regimes in Brazil. **Ocean & Coastal Management**, [S.L.], v. 200, p. 105403, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105403>.

MATTHES, Felix Christian. Energy transition in Germany: a case study on a policy-driven structural change of the energy system. **Evolutionary And Institutional Economics Review**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 141-169, 18 Jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40844-016-0066-x>.

MILLER, C. A.; RICHTER, J.; O'LEARY, J. Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions. *Energy Research and Social Science*, v. 6, p. 29–40, 2015.

MORSELETTTO, Piero. Targets for a circular economy. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 153, p. 104553, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.

MÜLLER, Franziska; TUNN, Johanna; KALT, Tobias. Hydrogen justice. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 17, n. 11, p. 1-8, 1 nov. 2022. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac991a>.

NAVARRO, Teresa. Water reuse and desalination in Spain – challenges and opportunities. **Journal Of Water Reuse And Desalination**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 153-168, 11 jan. 2018. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wrd.2018.043>.

NEOFYTOU, H.; NIKAS, A.; DOUKAS, H. Sustainable energy transition readiness: A multicriteria assessment index. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 131, 1 out. 2020.

NGUYEN, Thi Kieu Loan; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan; CHANG, Soon Woong; NGUYEN, Dinh Duc; NGHIEM, Long Duc; LIU, Yiwen; NI, Bingjie; HAI, Faisal I. Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 671, p. 1302-1313, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.386>.

NECZAJ, Ewa; GROSSER, Anna. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. **Proceedings**, [S.L.], p. 1-7, 31 jul. 2018. MDPI. <http://dx.doi.org/10.3390/proceedings2110614>.

NIETO, Jaime; CARPINTERO, Óscar; MIGUEL, Luis J.; BLAS, Ignacio de. Macroeconomic modelling under energy constraints: global low carbon transition scenarios. **Energy Policy**, [S.L.], v. 137, p. 111090, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111090>.

NIKOLAOU, Ioannis E.; JONES, Nikoleta; STEFANAKIS, Alexandros. Circular Economy

and Sustainability: the past, the present and the future directions. **Circular Economy And Sustainability**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-20, 1 abr. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s43615-021-00030-3>.

NIKOLAOU, Ioannis E.; TSAGARAKIS, Konstantinos P. An introduction to circular economy and sustainability: some existing lessons and future directions. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 28, p. 600-609, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.017>.

NOUSSAN, M. *et al.* The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective. **Sustainability** (Switzerland)MDPI AG, 1 jan. 2021.

OMERSPAHIC, Mustafa; AL-JABRI, Hareb; SIDDIQUI, Simil Amir; SAADAOU, Imen. Characteristics of Desalination Brine and Its Impacts on Marine Chemistry and Health, With Emphasis on the Persian/Arabian Gulf: a review. **Frontiers In Marine Science**, [S.L.], v. 9, p. 1-12, 26 abr. 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2022.845113>.

PANAGOPOULOS, Argyris; HARALAMBOUS, Katherine-Joanne; LOIZIDOU, Maria. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 693, p. 1-23, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>.

PINTO, F. Silva; MARQUES, R. Cunha. Desalination projects economic feasibility: a standardization of cost determinants. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 78, p. 904-915, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.024>.

POZO, Carlos Arnaiz del; CLOETE, Schalk. Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 255, p. 1-17, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115312>.

QUEIROZ, Luciana de Souza; ROSSI, Sergio; MERCANDER, Aida Tapia; SERRA-POMPEI, Camila; PIFARRÉ, David Vide; DOMÍNGUEZ, Joan Carrasco; MONRABÀ, Júlia Amorós; CAROL, Júlia Muntané; MARTÍNEZ, Maria Briansó; MEIRELES, Antonio Jeovah de Andrade. THE SOCIAL AND ECONOMIC FRAMEWORK OF ARTISANAL FISHING IN THE STATE OF CEARÁ, BRAZIL. **Geosaberes**, [S.L.], v. 11, p. 180, 8 abr. 2020. Revista Geosaberes. <http://dx.doi.org/10.26895/geosaberes.v11i0.871>.

QUESNE, W.J.F. Le; FERNAND, L.; ALI, T.s.; ANDRES, O.; ANTONPOULOU, M.; BURT, J.A.; DOUGHERTY, W.W.; EDSON, P.J.; KHARRAZ, J. El; GLAVAN, J.. Is the development of desalination compatible with sustainable development of the Arabian Gulf? **Marine Pollution Bulletin**, [S.L.], v. 173, p. 1-15, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112940>.

RADZICKI, M. J. System Dynamics and Its Contribution to Economics and Economic Modeling. In: DANGERFIELD, B. (Ed.). **System Dynamics**. 1. ed. New York, NY: Springer US, 2009. p. 401–415.

RAO, Prakash; KOSTECKI, Robert; DALE, Larry; GADGIL, Ashok. Technology and

Engineering of the Water-Energy Nexus. **Annual Review Of Environment And Resources**, S.L., v. 42, p. 407-437, jun. 2017.

SAHIN, Oz; STEWART, Rodney A.; HELFER, Fernanda. Bridging the Water Supply–demand Gap in Australia: coupling water demand efficiency with rain-independent desalination supply. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 253-272, 14 set. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0794-9>.

SALGOT, Miquel; FOLCH, Montserrat. Wastewater treatment and water reuse. **Current Opinion In Environmental Science & Health**, [S.L.], v. 2, p. 64-74, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>.

SAUVÉ, Sébastien; LAMONTAGNE, Sébastien; DUPRAS, Jérôme; STAHEL, Walter. Circular economy of water: tackling quantity, quality, and footprint of water. **Environmental Development**, [S.L.], v. 39, p. 100651, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100651>.

SCHROEDER, Patrick; ANGGRAENI, Kartika; WEBER, Uwe. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 77-95, 13 fev. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12732>.

SCITA, Rossana; RAIMONDI, Pier Paolo; NOUSSAN, Michel. Green Hydrogen: the holy grail of decarbonisation? an analysis of the technical and geopolitical implications of the future hydrogen economy. **Ssrn Electronic Journal**, [S.L.], p. 1-49, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3709789>.

SHARIFINIA, Moslem; BAHMANBEIGLOO, Zahra Afshari; SMITH, Walker O.; YAP, Chee Kong; KESHAVARZIFARD, Mehrzad. Prevention is better than cure: persian gulf biodiversity vulnerability to the impacts of desalination plants. **Global Change Biology**, [S.L.], v. 25, n. 12, p. 4022-4033, 21 set. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14808>.

SEMERTZIDIS, Theodoros; SPATARU, Catalina; BLEISCHWITZ, Raimund. Cross-sectional Integration of the Water-energy Nexus in Brazil. **Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 114-128, mar. 2017. SDEWES Centre. <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0169>.

SHI, Xunpeng; LIAO, Xun; LI, Yanfei. Quantification of freshwater consumption and scarcity footprints of hydrogen from water electrolysis: a methodology framework. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 154, p. 786-796, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.026>.

SIEVERS, L. *et al.* Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions. **Ecological Economics**, v. 160, p. 191–204, 1 jun. 2019.

SIMÕES, Sofia G.; CATARINO, Justina; PICADO, Ana; LOPES, Tiago F.; BERARDINO, Santino di; AMORIM, Filipa; GÍRIO, Francisco; RANGEL, C.M.; LEÃO, Teresa Ponce de. Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 315, p. 128124, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128124>.

SINGH, H. V. *et al.* The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, 1 nov. 2019.

SILVA, Larissa L. S.; MOREIRA, Carolina G.; CURZIO, Bianca A.; FONSECA, Fabiana V. da. Micropollutant Removal from Water by Membrane and Advanced Oxidation Processes—A Review. **Journal Of Water Resource and Protection**, [S.L.], v. 09, n. 05, p. 411-431, 2017. Scientific Research Publishing, Inc. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2017.95027>.

SMOL, Marzena; KONECZNA, Renata. Economic Indicators in Water and Wastewater Sector Contributing to a Circular Economy (CE). **Resources**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 129, 16 dez. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/resources10120129>.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis. **CEARÁ 2050: estudo setorial especial de recursos hídricos**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2018. 94 p.

SOVACOOOL, Benjamin K.; MARTISKAINEN, Mari; HOOK, Andrew; BAKER, Lucy. Decarbonization and its discontents: a critical energy justice perspective on four low-carbon transitions. **Climatic Change**, [S.L.], v. 155, n. 4, p. 581-619, ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-019-02521-7>.

STERMAN, JOHN. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. 1. ed. Boston: Irwin McGraw-Hill, 2000.

STUDART, Ticiana Marinho de Carvalho; CAMPOS, José Nilson B.; SOUZA FILHO, Francisco Assis de; PINHEIRO, Maria Inês Teixeira; BARROS, Luis Silva. Turbulent waters in Northeast Brazil: a typology of water governance-related conflicts. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 126, p. 99-110, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.014>.

SUDENE. **DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO**. 2023. Disponível em: <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 16 mar. 2023.

ONU. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs#:~:text=Os%20Objetivos%20de%20Desenvolvimento%20Sustent%C3%A1vel%20s%C3%A3o%20um%20apelo%20global%20%C3%A0,de%20paz%20e%20de%20prosperidade>. Acesso em: 27 set. 2023.

TENHUMBERG, Nils; BÜKER, Karsten. Ecological and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Different Water Electrolysis Technologies. **Chemie Ingenieur Technik**, [S.L.], v. 92, n. 10, p. 1586-1595, 12 ago. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/cite.202000090>.

TEOTÔNIO, Carla; RODRÍGUEZ, Miguel; ROEBELING, Peter; FORTES, Patrícia. Water competition through the ‘water-energy’ nexus: assessing the economic impacts of climate change in a mediterranean context. **Energy Economics**, [S.L.], v. 85, p. 104539, Jan. 2020b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104539>.

THOLEN, L. *et al.* The green hydrogen puzzle: Towards a German policy framework for industry. **Sustainability** (Switzerland), v. 13, n. 22, 1 Nov. 2021.

TRANSHYDROGEN ALLIANCE. **Transhydrogen Alliance to invest \$2 billion in Brazil**. 2021. Disponível em: <https://transhydrogenalliance.com/transhydrogen-alliance-to-invest-2-billion-in-brazil/>. Acesso em: 03 dez. 2022.

TSOTRIDIS, G.; PILENGA, A. **EU harmonized protocols for testing of low temperature water electrolyzers**. Luxemburgo: European Commission, 2021. 171 p. (1831-9424).

TUŠER, Irena; OULEHLOVÁ, Alena. Risk Assessment and Sustainability of Wastewater Treatment Plant Operation. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 5120, 3 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13095120>.

União Europeia. **A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe**. Bruxelas: União Europeia, 2020. 20 p.

União Europeia. **Study on the offshore grid potential in the Mediterranean region**. S.L: União Europeia, 2020. 206 p. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/91d2091a-27bf-11eb-9d7e-01aa75ed71a1/language-en>. Acesso em: 05 fev. 2023.

WANG, Hao-Ran; FENG, Tian-Tian; LI, Yan; ZHANG, Hui-Min; KONG, Jia-Jie. What Is the Policy Effect of Coupling the Green Hydrogen Market, National Carbon Trading Market and Electricity Market? **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 13948, p. 1-21, 27 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su142113948>.

WANG, Yinping; JIANG, Rengui; XIE, Jiancang; ZHAO, Yong; LI, Fawen. Water Resources Management under Changing Environment: a systematic review. **Journal Of Coastal Research**, [S.L.], v. 104, n. 1, p. 29-41, 5 out. 2020. Coastal Education and Research Foundation. <http://dx.doi.org/10.2112/jcr-si104-006.1>.

WANG, Yongsheng; KOU, Chenhuan; ZHAI, Xujun. Systematic Modeling and Policy Analysis on the Urban Water–Energy Nexus for Sustainable Resources Management. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 23, p. 15724, 25 Nov. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su142315724>.

WEI, Liangliang; ZHU, Fengyi; LI, Qiaoyang; XUE, Chonghua; XIA, Xinhui; YU, Hang; ZHAO, Qingliang; JIANG, Junqiu; BAI, Shunwen. Development, current state, and future trends of sludge management in China: based on exploratory data and co2-equivalent emissions analysis. **Environment International**, [S.L.], v. 144, p. 106093, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2020.106093>.

WINANS, K.; KENDALL, A.; DENG, H. The history and current applications of the circular economy concept. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 68, p. 825-833, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>.

WOODS, Philip; BUSTAMANTE, Heriberto; AGUEY-ZINSOU, Kondo-Francois. The hydrogen economy - Where is the water? **Energy Nexus**, [S.L.], v. 7, p. 100123, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100123>.

WU, Tao; WANG, Jianhui. Reliability Evaluation for Integrated Electricity-Gas Systems Considering Hydrogen. **Anais: IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY**,

[S.L.], v. 14, n. 2, p. 920-934, abr. 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tste.2022.3229896>.

WU, Wenyan; MAIER, Holger R.; DANDY, Graeme C.; ARORA, Meenakshi; CASTELLETTI, Andrea. The changing nature of the water–energy nexus in urban water supply systems: a critical review of changes and responses. **Journal Of Water And Climate Change**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 1095-1122, 11 jun. 2020. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wcc.2020.276>.

XIE, Yongjuan; ZENG, Li; WANG, Ping; WU, Xudong; FENG, Tianjiao. Water cost for water purification: renewability assessment of a typical wastewater treatment plant in China. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 349, p. 131474, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131474>.

YADAV, Geetanjali; MISHRA, Arpit; GHOSH, Parthasarathi; SINDHU, Raveendran; VINAYAK, Vandana; PUGAZHENDHI, Arivalagan. Technical, economic, and environmental feasibility of resource recovery technologies from wastewater. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 149022, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149022>.

YORK, R.; BELL, S. E. Energy transitions or additions? Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. **Energy Research and Social Science**, v. 51, p. 40–43, 1 maio 2019.

ZHANG, Abraham; VENKATESH, V.G.; LIU, Yang; WAN, Ming; QU, Ting; HUISINGH, Donald. Barriers to smart waste management for a circular economy in China. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 240, p. 118198, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118198>.

ZHANG, Xiaoyuan; ZHANG, Meng; LIU, Hang; GU, Jun; LIU, Yu. Environmental sustainability: a pressing challenge to biological sewage treatment processes. **Current Opinion In Environmental Science & Health**, [S.L.], v. 12, p. 1-5, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2019.05.006>.

ZHANG, Xiaoyuan; LIU, Yu. Circular economy is game-changing municipal wastewater treatment technology towards energy and carbon neutrality. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 429, p. 132114, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2021.132114>.

ZHOU, Y. *et al.* Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. **Chinese Journal of Chemical Engineering Materials**, China, 1 mar. 2022.

ZYL, Amoré Van; JOOSTE, Johannes Lodewyk. Retaining and recycling water to address water scarcity in the City of Cape Town. **Development Southern Africa**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 108-125, 24 ago. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/0376835x.2020.1801387>

APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTA E1

1. Como o governo do Estado está planejando suprir a demanda de água para a indústria de H2V?
2. Entre as opções disponíveis, qual a mais viável para a indústria de hidrogênio do CIPP?
3. Como funcionará a cadeia de suprimentos caso opte-se pela planta de dessalinização no CIPP?
4. Quais os fatores críticos para a viabilização de uma planta de dessalinização no CIPP?
5. Quais os pontos positivos em termos econômicos, ambientais e sociais para a implantação de uma dessalinizadora no CIPP?
6. Como funcionará a cadeia de suprimentos caso seja implementada uma planta de tratamento de esgoto de Fortaleza pelo CIPP?
7. Quais os fatores críticos para a viabilização de uma planta de tratamento de esgoto no CIPP?
8. Quais os principais pontos positivos para implantação de uma planta de tratamento de esgoto de Fortaleza no CIPP?
9. No caso de uma dessalinizadora para REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA, como funcionaria a sua cadeia de suprimentos?
10. Quais os fatores críticos para a viabilização de uma planta de dessalinização para Fortaleza? Como isso afeta o CIPP?
11. Quais os pontos positivos para o CIPP em termos econômicos, ambientais e sociais no que tange à implantação de uma dessalinizadora para Fortaleza?
12. Como essa planta influenciaria a disponibilidade de água bruta para a indústria de H2V no CIPP?
13. No caso de utilização de água bruta, como se daria a sua cadeia de suprimentos?
14. Quais os fatores críticos de utilização de água bruta para a indústria de H2V no CIPP?
15. Quais os pontos positivos em termos econômicos, ambientais e sociais para a utilização de água bruta no CIPP?
16. Qual a fonte de energia que alimentará as plantas de dessalinização ou ETE no CIPP?
17. O resíduo do processo de dessalinização é uma água com maiores índices de sais que a água do mar. Como o governo do Ceará planeja lidar com os possíveis impactos ambientais e sociais resultantes desse processo para uma planta de dessalinização no CIPP?
18. Que tipos de custos poderiam incorrer a fim de reduzir os impactos ambientais e sociais do despejo dos resíduos da dessalinização?
19. Os possíveis impactos ambientais e sociais gerados a partir de uma ETE e seus custos já foram mapeados? Poderia pontuar os principais deles?

20. Como o governo do Ceará planeja lidar com os possíveis impactos ambientais e sociais resultantes do processo de dessalinização da planta de Fortaleza?
21. Que tipos de custos poderiam incorrer a fim de reduzir os impactos ambientais e sociais do despejo dos resíduos da dessalinização de Fortaleza? Como isso afetaria o CIPP?

APÊNDICE B – ROTEIRO DE ENTREVISTA E2

1. Quais as fontes de recursos hídricos do CIPP?
2. Quais os parâmetros utilizados para deslocar água de uma bacia para outra com o foco em abastecer o CIPP?
3. Como as empresas do CIPP influenciam no processo de alocação hídrica? Existem outros atores que influenciam nesse processo?
4. Qual a capacidade hídrica existente para o CIPP? Como a inserção de uma nova empresa modifica esse balanço hídrico?
5. Como a inserção do *hub* de hidrogênio verde afetará o balanço hídrico do CIPP? Isso já foi contabilizado?
6. Considerando o sistema hídrico atual, quais seriam os principais impactos ambientais, econômicos e sociais da utilização de água bruta pela indústria de HV?
7. O Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará 2018 – 2027 contempla um projeto de reúso de efluentes sanitários para fins industriais no CIPP a ser realizado pela Utilitas Pecém. Quais os pontos críticos no que tange à viabilidade deste projeto?
8. Quais as vantagens e desvantagens em direcionar a água de esgoto tratada para o *hub* de hidrogênio verde segundo os aspectos ambientais, sociais e econômicos? Essa fonte hídrica é a mais adequada para este uso?
9. Considerando uma dessalinizadora no CIPP para a produção de HV, como isso afetaria o balanço hídrico do Estado? Quais são os barreiras e forças motrizes de uma planta dessa natureza para o CIPP dos pontos de vista ambiental, econômico e social?
10. Para que o *hub* de HV se estabeleça, na sua opinião, qual a fonte de água mais viável entre água bruta, água dessalinizada e água de reuso e por quê?
11. Considerando a gestão de recursos hídricos, desafios e características do meio ambiente, que outros países se assemelhariam ao caso do Ceará e por quê?
12. Professora, qual a sua visão de futuro para o desenvolvimento do *hub* de hidrogênio verde no estado do Ceará?

APÊNDICE C – ROTEIRO DE ENTREVISTA E3

1. Quais dificuldades emergiriam ao utilizar a água de reúso para abastecer um Hub de H2V considerando toda a cadeia de suprimentos?
2. Quais os principais gargalos do processo de tratamento de efluentes para abastecer um hub de H2V com água de reúso?
3. Quais etapas seriam necessárias para condicionar a água segundo a norma D1193-06/2018?
4. Quais tecnologias poderiam ser empregadas em cada uma das etapas a fim de minimizar as perdas de água e quais os prós e contras de cada uma delas?
5. Quais fatores influenciam a perda de água nas etapas de tratamento dos efluentes?
6. Quais fatores influenciam na duração das etapas de tratamento?
7. Em termos de consumo de energia, quais os gargalos para alimentar uma ETE com energias renováveis?
8. Quais seria os tratamentos e possíveis destinações para os resíduos produzidos após o tratamento da água de reúso?
9. Quais oportunidades de EC na ETE para um hub de H2V?
10. Como é feito o processo de quantificação de emissões de gases de efeito estufa em uma ETE?
11. Baseado na sua experiência, como você visualiza a cadeia de suprimento da água de reúso para o hub de H2V em longo prazo?
12. Qual a sua opinião acerca do futuro do hidrogênio verde?

APÊNDICE D – ROTEIRO DE ENTREVISTA E4

1. Como a cadeia de produção de hidrogênio verde (H2V) está sendo pensada para o Estado do Ceará?
2. O que o CIPP precisa fornecer para que as empresas de H2V se aloquem no Ceará?
3. Na cadeia de valor do H2V, o que é de responsabilidade do CIPP, o que é de responsabilidade das empresas e o que é de responsabilidade do governo do Estado do Ceará?
4. Quais outros stakeholders devem ser considerados na cadeia de produção de H2V?
5. Quais os principais competidores do CIPP a nível de Brasil? E a nível de mundo?
6. Qual a expectativa de produção de H2V até 2030, 2040 e 2050? E quantas empresas o CIPP almeja comportar até o fim desses períodos?
7. Em quanto tempo a produção de H2V em escala industrial para exportação ocorrerá no CIPP?
8. Pensando no hub de H2V do CIPP, quais as principais barreiras para a sua cadeia produtiva?
9. Quais os principais usos para a água e o quanto espera-se consumir de água até 2030? Existem projeções para além desse período?
10. Como o abastecimento hídrico está sendo planejado para o hub e quais os principais pontos críticos nesse planejamento?
11. A disponibilidade de água é uma preocupação que emerge nas interações com as empresas?
12. Quais as principais fontes de energia cotadas para alimentar o hub e quais suas principais barreiras?
13. O quanto espera-se consumir de energia para alimentar o hub até 2030? Existem projeções para até 2040 e até 2050?
14. Quais tecnologias de produção de H2V estão sendo planejadas para o hub do CIPP e quais os principais pontos críticos de cada uma delas?
15. Quais tecnologias de armazenagem de H2V estão sendo planejadas para o hub do CIPP e quais os seus principais pontos críticos?
16. Quais tecnologias de distribuição de H2V estão sendo planejadas para o hub do CIPP e quais os seus principais gargalos?
17. Oportunidades de Economia Circular estão sendo planejadas para o CIPP?

APÊNDICE E – ROTEIRO DE ENTREVISTA E5

1. O Plano de Gestão Estratégica e de Negócio da CAGECE (2019 – 2023) versa sobre uma Estação Produtora de Água de Reuso com capacidade inicial de 1,15 m³/seg. para abastecimento do CIPP. Esse é o projeto que atenderá ao hub de H2V? Em que fase está esse projeto?
2. Atualmente, 4 empresas estão em fase de aprovação de projetos ambientais ou de engenharia. Qual o volume de água de reúso que elas irão requerer da Utilitas em curto, médio e longo prazo? Quais anos representam esses marcos temporais?
3. Que fatores poderiam implicar no aumento da capacidade instalada da EPAR?
4. Poderias descrever as etapas de tratamento e tecnologias escolhidas para que a água de reúso possua o nível de pureza adequado para abastecer o hub de H2V?
5. Qual a vida útil dessas tecnologias?
6. Quais os principais indicadores da qualidade água de reúso para uso industrial?
7. O preço de custo da água de reúso é competitivo em relação aos R\$ 3,28/m³ de água bruta fornecida pela COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS? O CAPEX e o OPEX compensam?
8. Qual a fonte de energia elétrica que alimentará a EPAR? Conseguirias fornecer uma média de consumo?
9. Qual o tempo de ciclo da EPAR, considerando desde a captação dos efluentes até o envio da água de reúso ao CIPP? E apenas no tratamento dos efluentes?
10. Como está estruturada a rede a coleta dos esgotos de doméstico para operação da EPAR? O local para a EPAR foi escolhido?
11. Qual o volume de efluentes disponíveis para coleta?
12. Há perda de efluentes durante o transporte? E de água de reúso?
13. A Utilitas conseguirá fornecer água de reúso caso outras empresas comecem a operar ou caso a demanda por água das empresas estabelecidas aumente dentro do planejamento de curto, médio e longo prazo?
14. O custo da tecnologia para o tratamento dos efluentes representa um gargalo? E o custo da energia?
15. Então, quais são os principais gargalos para a implantação de uma EPAR para o hub de H2V? Há uma previsão de começo de construção e de operação?
16. Pensando no sistema de produção de água de reúso, oportunidades de economia circular além da própria água estão sendo pensadas?

17. Qual a quantidade de lodo gerado ao longo do processo e que tipos de tratamento estão sendo planejados?
18. Baseado na sua experiência, como você visualiza a cadeia de suprimento da água de reúso em longo prazo?

APÊNDICE F – ROTEIRO DE ENTREVISTA E6

1. Qual o panorama geral da água de reúso e da dessalinização no Brasil?
2. Quais as principais barreiras para a aplicação dessas rotas tecnológicas no Brasil?
3. Qual a viabilidade dessas tecnologias em termos de sua capacidade de fornecer água em quantidade e qualidade para um hub de H2V, que necessita de uma água ultrapura?
4. Considerando as tecnologias de água de reúso e água de dessalinização destinadas para um hub de H2V, como elas se comparam em termos de:
5. Custo de instalação e custo de operação?
6. Investimento inicial e investimento de operação e manutenção?
7. Escalabilidade e capacidade de atender a uma provável crescente demanda H2V?
8. Consumo de energia?
9. Geração e descarte de resíduos?
10. Recuperação de recursos?
11. Existe uma expectativa por inovações tecnológicas em longo prazo que melhorem o desempenho ou reduzam os custos dessas tecnologias?
12. Quais são os principais impactos ambientais associados ao uso de tecnologias de água de reúso e dessalinização? Como esses impactos podem ser mitigados?
13. Existem preocupações sociais ou comunitárias associadas ao uso dessas tecnologias para o fornecimento de água para uso em um hub de H2V? Como esses impactos podem ser mitigados?
14. Duas fontes de água não convencional estão sendo promovidas por atores diferentes para o abastecimento do hub de H2V: a primeira seria a água de reúso, que está sendo promovida pelo CIPP e pelo governo do Estado e representa uma solução centralizada de abastecimento; e a segunda seria a água de dessalinização do mar, que o mercado parece ver com bons olhos e representa uma solução descentralizada. Em sua perspectiva, quais seriam os trade-off de cada uma dessas soluções?
15. Pensando em longo prazo, em sustentabilidade e em aspectos tecnológicos e econômicos, qual tecnologia representa a melhor opção para fornecer água ao hub de H2V no Ceará?

APÊNDICE G – ROTEIRO DE ENTREVISTA E7

1. Qual o panorama tecnológico da cadeia de H₂V hidrogênio verde (H₂V) no Brasil? E no mundo?
2. Quais são os principais gargalos que afetam a cadeia de produção H₂V e como eles interagem entre si? E de armazenamento? E de distribuição?
3. Como a ThyssenKrupp está trabalhando para superar esses desafios?
4. Existem inovações tecnológicas em médio e longo prazo que possam melhorar o desempenho ou reduzir os custos da produção de H₂V?
5. Como a disponibilidade e o custo de matérias-primas, como água e energia renovável, afetam a viabilidade econômica da produção de H₂V?
6. Nos projetos da ThyssenKrupp, qual a relação estequiométrica entre consumo de água e produção de H₂? E qual a pegada hídrica da produção de H₂V?
7. Quais os possíveis impactos ambientais e sociais da cadeia de valor do H₂V?
8. Quais medidas estão sendo tomadas para mitigar esses possíveis impactos, especialmente em termos de consumo de água e energia?
9. No Ceará, três tipos de fontes de água estão sendo consideradas para abastecer o hub de H₂V: água de reúso, água de reservatórios e dessalinização de água do mar. Qual a viabilidade de cada uma dessas rotas tecnológicas para abastecer um hub de H₂V?
10. Quais os principais trade-offs quanto ao abastecimento de um hub de H₂V entre água de reúso, dessalinização de água do mar e água de reservatórios?
11. Em sua opinião, quais são os próximos passos para acelerar o desenvolvimento da indústria de H₂V no Ceará?

APÊNDICE H – ROTEIRO DE ENTREVISTA E8

1. Em sua opinião, quais são os principais riscos ambientais associados à operação de uma planta de dessalinização de água do mar na costa do Ceará?
2. Como o despejo de salmoura pode afetar os ecossistemas marinhos e a qualidade da água do mar cearense em curto, médio e longo prazo?
3. Sendo mais específico, quais níveis tróficos podem ser afetados em curto, médio e longo prazo por esse tipo de operação?
4. Quais medidas poderiam ser tomadas para mitigar os potenciais impactos ambientais de uma planta de dessalinização de água do mar na costa do Ceará?
5. Eu procurei por regulamentações ou diretrizes quanto à operação de dessalinizadoras no Brasil para finalidade industrial e não encontrei nenhum documento sobre isso. Saberias indicar se existe alguma diretriz que deve ser seguida para garantir a proteção dos ecossistemas marinhos e da qualidade da água costeira no contexto da dessalinização de água do mar?
6. Como a operação de uma planta de dessalinização pode afetar as comunidades locais?
7. Em sua opinião, quais são os principais fatores que devem ser considerados ao avaliar a viabilidade e sustentabilidade de um projeto de dessalinização de água do mar na costa do Ceará?
8. Em que condições operacionais uma dessalinizadora seria viável, considerando o regime de escassez de água no CE e o desenvolvimento do Estado?