

IDENTIFICAÇÃO DE IMPACTOS SOCIOECOLÓGICOS RELACIONADOS AO ABASTECIMENTO HÍDRICO DE UM CENTRO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

LUÍS MATHEUS TAVARES SILVA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

MÔNICA CAVALCANTI SÁ DE ABREU

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

MAURICIO URIONA MALDONADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC)

FLÁVIA MENDES DE ALMEIDA COLLAÇO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

COSME POLESE BORGES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC)

Agradecimento à órgão de fomento:

Agradecimentos ao apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Brasil (Processo: 409549/2022-3).

IDENTIFICAÇÃO DE IMPACTOS SOCIOECOLÓGICOS RELACIONADOS AO ABASTECIMENTO HÍDRICO DE UM CENTRO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

1 INTRODUÇÃO

As Mudanças Climáticas (MCs) são alterações no clima que persistem por décadas ou mais e são identificadas a partir de testes estatístico, como a variabilidade de suas propriedades convencionais (IPCC, 2012). Essas alterações no clima impactam diretamente no desenvolvimento social e econômico de regiões e barram o alcance das metas de desenvolvimento sustentável, principalmente das metas relacionadas à segurança alimentar e hídrica (IPCC, 2022). Uma das principais causas das MCs é a queima de combustíveis fósseis, visto que estas fontes emitem Gases de Efeito Estufa (GEE).

O avanço das MCs pode ser mitigado por meio da mudança da matriz energética baseada no petróleo, carvão mineral e gás natural para uma matriz baseada em fontes de energia renováveis. Neste trabalho, uma Transição Energética (TE) é definida como a mudança de uma fonte primária de combustível e da tecnologia associada à sua produção para fontes renováveis (FOUQUET; PEARSON, 2012; HIRSH; JONES, 2014). Desse modo, o hidrogênio verde (H2V) emerge como uma possível solução para mitigar os efeitos das MCs (GINSBERG, 2022). A produção de H2V ocorre por meio da eletrólise da água (H₂O) alimentada por fontes renováveis, por isso ele é considerado verde, visto que a eletrólise não emite GEE (GINSBERG, 2022).

Apesar do efeito positivo esperado quanto à utilização do H2V na mitigação das MCs, para que esse vetor energético seja efetivamente sustentável, é imprescindível compreender o uso da água e seus aspectos críticos, principalmente no que tange aos possíveis impactos socioecológicos (SHI, LIAO; LI, 2020). Mesmo que um planejamento adequado seja realizado, estresse hídrico e competição por água são esperados como resultados (WOODS; BUSTAMANTE; AGUEY-ZINSOU, 2022). Além do mais, outro ponto que pode agravar essas consequências são os efeitos em curso das MCs sobre a água, que implicam no desequilíbrio da disponibilidade de recursos hídricos, principalmente em regiões áridas como o Mediterrâneo (TEOTÓNIO *et al.*, 2020) e o Nordeste brasileiro (ALVES *et al.*, 2020). Apesar dessas regiões sofrerem historicamente com escassez hídrica, elas são atrativas para receber *hubs* de produção de H2V, pois possuem vasto potencial para a instalação de painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas (CEARÁ, 2019; UNIÃO EUROPÉIA, 2020).

O estado do Ceará (CE) possui características interessantes para a instalação de um *hub* de H2V, como o alto potencial de produção de energia renovável. Mais de 50% da energia elétrica do CE provém de parques eólicos e fotovoltaicos. Se todo o potencial fosse aproveitado, seriam gerados cerca de 1.363,2 Terawatt-hora por ano (CEARÁ, 2019; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021, 2022). O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), local escolhido para o *hub*, possui infraestrutura portuária e elétrica robusta, rede de gás estabelecida e a ZPE Ceará, que oferece benefícios fiscais. Empresas de aço, fertilizantes, cimento e mineração presentes na ZPE podem ser consumidoras de hidrogênio (COMPLEXO DO PECÉM, 2022b). A proximidade com Fortaleza e a possibilidade de conexões ferroviárias são vantagens adicionais (COMPLEXO DO PECÉM, 2022c). Além disso, o CIPP está estrategicamente localizado próximo aos EUA, Europa e norte da África, conferindo-lhe vantagem competitiva frente a outros portos brasileiros (COMPLEXO DO PECÉM, 2022b).

Por isso, o estado do Ceará (CE) emerge como um local propício para o assentamento de um *hub* de H2V, dado o alto potencial de produção de eletricidade por meio de fontes renováveis (CEARÁ, 2019). Durante os 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). Se todo o potencial de produção de eletricidade em parques eólicos *onshore* e *offshore* e de parques fotovoltaicos no CE fosse aproveitado, seriam

gerados cerca de 1.363,2 Terawatt-hora de eletricidade por ano (CEARÁ, 2019).

Em contrapartida a toda essa abundância de ventos e de exposição à radiação solar, é comum que essas regiões sofram de escassez hídrica (WOODS; BUSTAMANTE; AGUEY-ZINSOU, 2022), como é o caso do CE, que historicamente sofre com secas, tendo a última durado de 2012 a 2016 (CEARÁ, 2018). Algumas ameaças para os recursos hídricos cearenses são: o aumento das incertezas na oferta hídrica devido às MCs; empresas intensivas no uso da água mais vulneráveis devido às secas mais prolongadas; e ampliação dos conflitos sociais relativos à água em função do agravamento da escassez.

Para que a indústria de H2V possa operar em um Estado que não possui abundância de água, é necessário considerar fontes não convencionais de água para que o ônus decorrente da produção de H2V seja mitigado. Duas rotas tecnológicas de produção de água são a dessalinização de água do mar (JONES *et al.*, 2019; EKE *et al.*, 2020; CAVALIERE *et al.*, 2021) e o tratamento terciário de efluentes (JASIM, 2020; WOODS; BUSTAMANTE; AGUEY-ZINSOU, 2022). Ambas possuem vantagens e desvantagens do ponto de vista econômico, ecológico e social e devem ser cuidadosamente estudadas antes de se investir recursos para a construção de suas plantas (DARRE; TOOR, 2018).

Este estudo lança a seguinte pergunta de pesquisa baseado nos fatos apresentados: quais os impactos socioecológicos relacionados ao abastecimento hídrico de um *hub* de hidrogênio verde? Para responder a isto, este artigo aplica a metodologia de Dinâmica de Sistemas (DS) para identificar estes impactos socioecológicos. A metodologia de DS é aplicável nesse sistema, pois as cadeias de suprimento de água são consideradas sistemas complexos, em que é possível observar uma dinâmica de realimentação (do inglês, *feedbacks*), de interdependências e de relações descontínuas e não lineares entre os elementos do sistema. Um exemplo desta aplicação está na modelagem do suprimento de água combinando eficiência na demanda de água e abastecimento de dessalinização independente de chuva (SAHIN; STEWART; HELFER, 2015).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A cadeia produtiva de hidrogênio

A obtenção de gás hidrogênio (H₂) pode ocorrer a partir da reforma a vapor do gás natural (CH₄), de petróleo ou carvão, mas também de processos biológicos, como a fermentação de biomassa, da gaseificação do carvão e da eletrólise da água. A principal vantagem da produção de H₂ a partir da eletrólise da água é que a emissão GEE não ocorre no processo produtivo, pois utiliza-se energia renovável para separar a molécula de H₂O (BALL; WEEDA, 2015), contudo, este é o processo menos viável historicamente devido sua alta demanda energética (ABDIN *et al.*, 2020).

Contudo, à redução dos custos de geração de eletricidade por meio de fontes renováveis, como a solar e a eólica, estimulam a produção de H2V (ABDIN *et al.*, 2020). O H₂ pode ser classificado a partir de cores que designam a fonte primária de energia utilizada em seu processo produtivo. O quadro 1 resume os tipos de classificação de produção de H₂ e suas principais características.

Quadro 1- Classificação de produção de H₂ e suas principais características.

Classificação	Tecnologia	Fonte	Produto	Custo (\$/kg de H ₂)
Hidrogênio cinza	Reforma	Gás natural	H ₂ + CO ₂	1 – 2,1
Hidrogênio azul	Gaseificação + captura de carbono	Gás natural	H ₂ + CO ₂ (85% - 95% capturado)	1,5 – 2,9
Hidrogênio verde	Eletrólise	Água	H ₂ + O ₂	3,6 – 5,8

Fonte: adaptado de Kumar e Lim (2022).

As tecnologias de eletrolisadores disponíveis para comercialização são: Eletrólise Alcalina da Água e Membrana de Troca de Prótons (KUMAR; LIM, 2022). Ambas necessitam operar em um nível de temperatura baixo e com uma água de alta pureza, o que adiciona custos e complexidade ao processo de produção de H₂V. Caso esses requerimentos não sejam cumpridos, nota-se uma redução na vida útil dos eletrolisadores. A fim de cumprir os requisitos de pureza da água, é possível condicioná-la segundo a designação D1193-06/2018 (ASTM INTERNATIONAL, 2018). Um outro desafio atrelado a isso é o custo de atingir essa pureza, que pode representar 22% do balanço de uma planta de 1 MW (MAYYAS *et al.*, 2019).

2.2 Gestão dos recursos hídricos no Ceará e oferta de água dos reservatórios

Para que o H₂V seja sustentável, é necessário endereçar preocupações a respeito do uso da água no seu processo produtivo e dos impactos socioecológicos que isso pode ocasionar (SHI; LIAO; LI, 2020). No estado do CE, as águas superficiais e subterrâneas são estocadas em reservatórios e poços, respectivamente, e utilizadas para abastecer toda as atividades do Estado. Plantas de dessalinização e de tratamento de efluentes estão sendo consideradas como possíveis soluções para complementar a oferta hídrica (CEARÁ, 2018).

No que tange ao CIPP, o Plano de Ações Estratégicas dos Recursos Hídricos do CE (PAERHCE) recomenda água de reúso proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) como uma fonte hídrica, mas até o momento nenhuma iniciativa se concretizou (CEARÁ, 2018). A água de reúso pode ser analisada pela perspectiva da economia circular partindo de que a motivação da economia circular reside no melhor uso dos recursos e na redução dos resíduos e emissões a partir de sistemas circulares ao invés de sistemas lineares (GEISSDOERFER *et al.*, 2017), como a utilização de água bruta ou dessalinização da água do mar.

Em relação aos reservatórios de água no CE, 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 CE devem ser geridos seguindo as características do Estado, que são as altas taxas de evaporação, entre 2.000 e 2.500 milímetros (mm)/ano, variabilidade interanual e sazonal no que tange às precipitações, chovendo em média 806 mm/ano e solos rasos. Além disso, 90% do território cearense é localizado em território do semiárido nordestino (SOUZA FILHO, 2018; STUDART *et al.*, 2021).

A gestão hídrica do estado do CE é realizada pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), que gerencia as 12 regiões hidrográficas do CE. A RMF, onde ficará o centro de produção (do inglês, *hub*) de H₂V, 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). A gestão da água é importante porque o estado do CE não possui este recurso em abundância. 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. O conflito aumenta devido à transferência das águas dessa região, cuja água é usada para irrigação, para a RMF, 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 estado. Um estudo empírico identificou doze conflitos 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). A falta de água é histórica no CE e os eventos extremos de seca estão se intensificando nos últimos anos. Por exemplo, durante o período de 2012 a 2016, 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 *et al.*, 2018). Portanto, a expectativa é de que a água seja um recurso cada vez mais escasso nessa região, conforme apontam projeções climáticas, visto que se prevê a redução nas precipitações e o aumento da temperatura. Estas previsões implicam numa maior taxa de evaporação dos reservatórios e açudes e que, por fim, afeta a segurança hídrica do CE, não tendo água disponível para seus diversos usos, como a agricultura, indústria, bem-estar populacional e outros (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Nesse ensejo, fontes de água não convencionais são desenvolvidas a fim de reduzir o risco das necessidades humanas não conseguirem ser supridas (JONES *et al.*, 2019), como é o caso da água de reúso (SALGOT; FOLCH, 2018) e da água de dessalinização do mar (JONES *et al.*, 2019). O PAERHCE, que possui vigência entre 2018 e 2027, apesar de não contemplar especificamente o H2V, prevê a utilização da água de reúso proveniente da RMF pelo CIPP. Quando estiver com sua capacidade máxima, estima-se que seja necessário uma vazão de água de 2,1 m³/seg. a fim de que o CIPP atue plenamente, contudo, este valor não contempla o *hub* de H2V (CEARÁ, 2018).

2.3 Dessalinização de água do mar

O processo de dessalinização de água do mar mais difundido é a Osmose Reversa (OR) (JONES *et al.*, 2019), que é historicamente um processo de alto consumo de energia, mas tem se tornado mais eficiente, devido ao desenvolvimento de membranas mais resistentes, estáveis e eficientes, aos dispositivos de recuperação de energia e à otimização dos sistemas de OR (CAVALIERE *et al.*, 2021). Em geral, 60% da dessalinização de água do mar é empregada no abastecimento humano, enquanto 30% são destinados para uso industrial. Além disso, 70% das plantas de dessalinização estão localizadas em países desenvolvidos, o que pode ser explicado pelo alto custo de investimento inicial e pelo alto consumo de eletricidade (DARRE; TOOR, 2018).

Na dessalinização, bombas de alta-pressão forçam a água através de uma membrana semipermeável, separando a água dessalinizada do rejeito super salinizado e com impurezas (CAVALIERE *et al.*, 2021). A taxa de conversão da água salinizada depende da quantidade de sal presente na água do início do processo e do método. Para o processo de OR utilizando a água do mar, em média, 42% da água é aproveitada (JONES *et al.* 2019).

O maior desafio de uma planta de dessalinização é lidar com a salmoura, pois além de ser caro de tratar, está muito associado a impactos ambientais. Estima-se uma produção mundial de 142 milhões de m³/dia de salmoura (JONES *et al.*, 2019). Antes de ser devolvido aos oceanos, esse rejeito salinizado deve passar por um processo de diluição, contudo, o menor distúrbio no nível de salinidade normal pode afetar o ecossistema marinho. A salmoura pode também conter outros produtos químicos (DARRE; TOOR, 2018).

Um estudo que integrou energia solar, dessalinização e eletrolisador de água em uma planta de H2V concluiu ser possível produzir H2V a partir de água do mar a um preço aproximado de 2 USD por kg de H2V, considerando os preços de eletricidade por hora cobrados nos Estados da Califórnia (EUA) e Texas (EUA) em 2020 (GINSBERG *et al.*, 2022).

2.4 Economia circular e água de reúso

A Economia Circular (EC) é um sistema regenerativo em que a entrada, 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, recondição, reciclagem ou um projeto planejado para o longo prazo (GEISSDOERFER *et al.*, 2017). A EC é uma mudança da Economia Linear (EL), que possui como base a lógica de coletar, produzir e descartar, para uma lógica baseada no reaproveitamento máximo do recurso que seria desperdiçado na EL.

O principal foco da EC 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). Por exemplo, a aplicação de água de reúso para a agricultura, essa prática ganhou aceitação pública devido à melhoria da qualidade do solo e das plantações, à comunicação transparente sobre o processo de tratamento de água, e por não haver custos para os fazendeiros (MANNINA; GULHAN; NI, 2022). As plantas de tratamento de água de efluentes são importantes, pois podem ser consideradas como uma solução para reduzir a escassez hídrica e a vulnerabilidade social (MARAGON *et al.*, 2020) e para minimizar os impactos à saúde humana e ao ciclo hidrológico decorrente das próprias atividades humanas (CHEN *et al.*, 2020).

A operação de plantas de tratamento de efluentes contribuem fortemente para a poluição atmosférica (HAO *et al.*, 2019) e para o aumento do consumo de energia elétrica (CARDOSO *et al.*, 2021). 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). Essa pureza é atingida ao aplicar-se o tratamento terciário (SALGOT; FOLCH, 2018), visto que a vida útil dos eletrolisadores pode reduzir caso haja outros elementos presentes no insumo além das moléculas de H₂O (BECKER *et al.*, 2023). A figura 1 expõe as etapas do tratamento de efluentes.

Figura 1: etapas do tratamento de efluentes.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Yadav *et al.* (2021).

Em relação às Despesas de Capital (CAPEX) e às Despesas de Operação (OPEX), em uma Estação de Tratamento de efluentes (ETE) de capacidade de processamento de 1.200 m³/dia, o custo do CAPEX é de cerca de 2 milhões de dólares americanos (USD) e de OPEX cerca de 2 USD por m³ de efluente tratado. Em geral, a literatura reporta que as plantas possuem a OR como principal tecnologia de tratamento físico terciário (BECKER *et al.*, 2023).

Um estudo avaliou a eficiência econômica das ETEs de acordo com o tamanho das plantas. Foram considerados parâmetros como custo de operação (energia, funcionários, reagentes e manutenção) e remoção de poluentes. O estudo agrupou as ETEs com base na população equivalente (p.e), formando três grupos. O grupo 3, com ETEs de p.e maiores que 50.000, apresentou uma eficiência média de 90%, enquanto os grupos 1 e 2 obtiveram eficiências de 48% e 75%, respectivamente. Isso mostra como a economia de escala é

importante para o tratamento de efluentes, sendo a energia o fator principal de aumento dos custos operacionais (HERNÁNDEZ-CHOVER, BELLVER-DOMINGO E HERNÁNDEZ-SANCHO, 2018).

3 METODOLOGIA

A pesquisa investiga quais impactos socioecológicos a produção de hidrogênio verde pode ocasionar a partir da escolha de fonte hídrica de abastecimento. Para isso, a DS foi aplicada como método, pois é pautada em acumulações, em não linearidade e em circuitos de retroalimentação e busca compreender como os fluxos de materiais e informações variam nos sistemas, capturando os valores esperados que, no mundo real, são difíceis de mensurar (STERMAN, 2000) portanto é adequada para lidar com interações complexas ao longo do tempo (BALA; ARSHAD; NOH, 2017).

Uma de suas ferramentas é o diagrama de circuitos 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 para facilitar o entendimento sobre a estrutura do sistema e como a retroalimentação ocorre. Saber como o sistema se retroalimenta é um fator chave para o entendimento do comportamento desse sistema. O quadro 2 mostra como deve-se proceder a leitura de um CLD.

Quadro 2: 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).

A montagem do CLD deste trabalho aplicou etapas sugeridas por Sterman (2000) e Bala *et al.* (2017). Antes de definir o problema propriamente dito, é necessário familiarizar-se com o sistema. Para isso, foram realizadas 6 entrevistas, com informações disponíveis no quadro 3.

Quadro 3: entrevistas para familiarizar pesquisadores com o sistema.

Entrevistado(a)	Perfil	Data de aplicação	Duração (minutos)
E1	Ex-coordenador do Projeto Hidrogênio Verde do CE e atual Coordenador de Energia da Federação das Indústrias do Estado do Ceará.	04/11/2022	39
E2	Professora de hidrologia de reservatórios e participante da Gestão de Recursos Hídricos do Estado do CE.	07/12/2022	51
E3	Professor de tratamento de águas residuais domésticas e industriais, reutilização e recuperação de recursos.	10/05/2023	45
E4	Presidente do CIPP.	19/05/2023	50
E5	Engenheira química a Companhia de Água e Esgoto do Ceará.	07/06/2023	60
E6	Coordenador da câmara de dessalinização e reúso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.	14/07/2023	40

Fonte: dados da pesquisa (2023)

Além das entrevistas e da revisão bibliográfica que demonstrou a escassez hídrica histórica no Estado do CE, os seguintes documentos foram analisados: Diário Oficial do Estado (DOE) entre os dias 14/09/2022 e 14/07/2023 buscando exatamente pela frase hidrogênio verde, Plano de Gestão Estratégica e de Negócios da CAGECE (2019 – 2023), o PAERHCE (2018 –

2027), 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 CE, *websites* de empresas que assinaram Memorandos de Entendimento (ME) com o governo do Estado do CE, *websites* do próprio governo do Estado do CE, Estudo de Impacto Ambiental e do Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) da Empresa Fortescue, e uma visita técnica ao CIPP e à planta piloto de produção de H2V da empresa EDP realiza no dia 31/03/2023.

A partir disso, foi possível definir o problema: identificar os impactos socioecológicos da produção de H2V devido à necessidade de fontes não convencionais de água, visto a escassez histórica de água em reservatórios no CE. Com o panorama geral do sistema de produção de H2V que irá operar no CE foi possível estabelecer as principais variáveis (STERMAN, 2000). Em seguida, é possível estabelecer as relações de causa e efeito entre as variáveis do sistema, identificar como os circuitos se fecham e se retroalimentam e, por fim, categorizar a natureza da retroalimentação.

4 RESULTADOS

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. Segundo o entrevistado E4:

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 CE 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 a 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 CE 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 DOEs colhidos, 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 CE, foram consultados *websites* institucionais do Governo do Estado do CE, 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 1 mostra a quantidade de H2V que as empresas pretendem produzir no CE em quilotoneladas por ano.

Tabela 1: Valores de produção e H2V no CE.

Empresa	Quantidade	Referência	Empresa	Quantidade	Referência
Qair	296	CEARÁ (2021)	Cactus	200	Cactus (2022)

Transhydrogen	500	Transhydrogen (2022)	Fortescue	305	Fortescue (2023)
Energix	615	Energix (2021)	AES Brasil	141	AES Brasil (2022)
Casa dos Ventos	365	Complexo Do Pecém (2022a)	Total	2.422,505	-

Fonte: dados da pesquisa (2023).

A informação mais recente quanto à produção de H2V no *hub* do CIPP no CE é proveniente do EIA/RIMA da Fortescue, cujo valor é de 900.000 toneladas de H2V por ano, valor 2,7 vezes menor que o somatório apresentado na tabela 1 (FORTEESCUE, 2023). De todo modo, esses valores representam uma quantidade de água considerável para uma localidade que historicamente sofre de escassez hídrica. A tabela 2 compila a quantidade de água necessária para H2V por ano.

Tabela 2: 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	

Fonte: dados da pesquisa (2023)

As duas únicas formas de garantir acesso a água durante o ano é por meio da estocagem de água nos reservatórios e por meio da perfuração de poços, pois os rios cearenses são todos intermitentes; há alta variabilidade anual de chuvas, 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 outras operações do CIPP, incluindo o projeto piloto de produção de H2V, serem abastecidas pelo Castanhão, maior reservatório do CE. Além disso, a AES Brasil planeja adquirir água de um fornecedor local (Fortescue, 2023). Segundo a entrevistada E2:

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. Quanto às fontes não convencionais de abastecimento hídrico, o governo do CE e o CIPP estão promovendo o abastecimento do *hub* por meio de água de reúso. A Estação Produtora de Água de Reúso (EPAR) é uma iniciativa prevista no PAERHCE para fornecer água de reúso prioritariamente para atividades industriais do CE. A EPAR será gerenciada pela empresa Utilitas Pecém, abastecida por 10 ETEs localizadas na RMF e produzirá água de reúso no mesmo nível de qualidade que a água bruta fornecida pela COGERH. O polimento da água será realizado em cada planta de produção de H2V. Os entrevistados E5, E4 e E3 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);

Com relação à água, o CIPP dá preferência à água de reúso. Como solução de *backup*, estamos considerando abastecimento da água COGERH. Não é o que queremos usar, mas pode ser uma solução (E4);

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 (E3).

Quanto à aspectos práticos da aplicação da água de reúso no CE, este é um tema discutido e maturado há pelo menos uma década (CEARÁ, 2018; CAGECE, 2023), sendo inclusive tratado pela Lei Nº 16.033 de 20/06/2016, que dispõe sobre a política de reúso de água não potável no âmbito do estado do CE, em que há o incentivo dessa fonte para o uso industrial (CEARÁ, 2016); o consumo de água pela RMF varia entre 10 m³/seg. e 15 m³/seg. mensalmente, apesar de apenas 3 m³/seg. serem captados e tratados; o processo de retirada de impurezas do efluente exige menos intensidade energética em comparação ao processo de dessalinização de água do mar e existem estudos sobre o reaproveitamento de recursos presentes lodo o que acarretaria em menos impacto socioecológico.

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 (E6);
O lodo pode ser reaproveitado ao invés ser enviado para aterros sanitários. As possibilidades de reaproveitamento dependem da rota tecnológica (E3);
A água de reúso será mais cara do que a água da COGERH. Com o aumento da cobertura de esgoto na RMF, haverá esgoto sobrando para ser reaproveitado como água de reúso (E4).

Alguns fatores ainda barram a utilização da água de reúso no Brasil, como o preconceito, pois a maioria das pessoas preocupam-se com a qualidade da água oriunda do processo de reúso, que são efluentes carregados de patógenos, substâncias químicas e etc. Contudo, o nível de qualidade da água proveniente do tratamento de efluentes é ditado pelo uso final que ela será direcionada. Outros fatores são a logística dos efluentes, pois é necessário que as ETEs ou EPAR estejam próximas de polos industriais, e se a quantidade de efluentes que as estações podem processar é suficiente para abastecer a demanda do polo industrial. Sobre estas aplicações salientam os entrevistados E6 e E4:

Para aplicações agrícolas não é necessário remover orgânicos com nitrogênio, fósforo e potássio. Para água de caldeira, é necessário remover sais [...]. 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 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 (E4);

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. Outro fator é o quão estruturado o sistema de ETEs está, pois caso seja necessário fazer reestruturações ou produzir novas estruturas, encarecimento pode ser gerado. Os principais custos da produção de água de reúso são provenientes da reposição das membranas para o processo de OR e da energia empregada nesse processo, apesar de ser menos caro que o processo de OR de água do mar. Além disso, o processo de reaproveitamento do lodo envolve muitas variáveis e pode representar um desafio, por isso, é importante que o tratamento dos resíduos seja considerado nos projetos de engenharia.

As ETEs do CE 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 de efluentes depende muito dos contaminantes presentes e de onde vem o efluente (E6).

Uma alternativa de fonte de água não convencional sendo considerada é a dessalinização de água do mar, principalmente para as empresas *Fortescue* e Qair Brasil, que possuem 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, a solução de água dessalinizada parece ser mais simples, caso a demanda por H2V aumente. Os entrevistados E6 e E1 complementam:

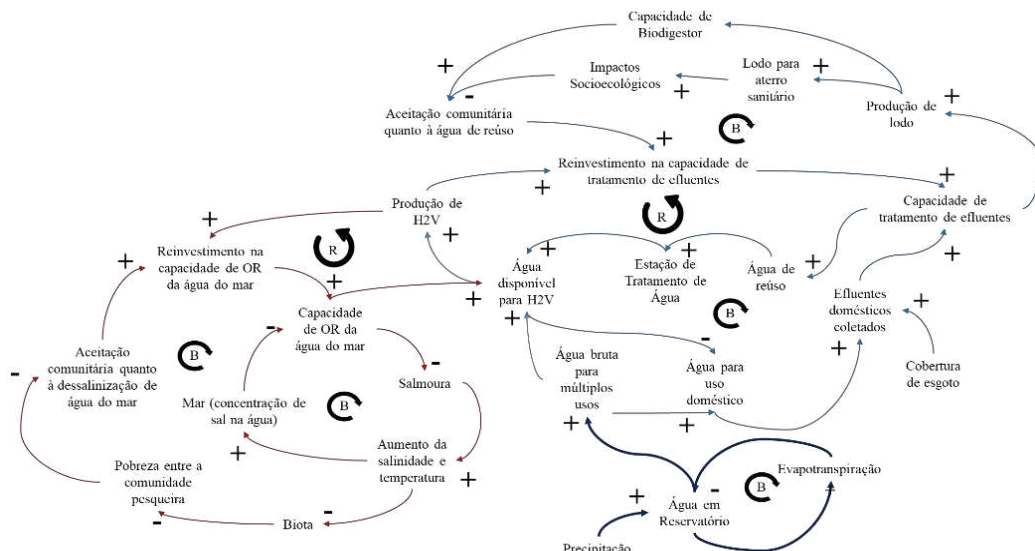
A dessalinização de água do mar pode ser menos complexa do que a implantação e combinação de ETEs. Além disso, a disponibilidade hídrica é maior e, caso seja necessário aumentar a produção no futuro, isso pode ser mais fácil do que com as ETEs, que dependem de uma população maior para gerar mais efluentes (E6);
 Água do mar não falta, mas de qualquer maneira, teríamos que dimensionar os impactos ambientais (E1);

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 para alguns entrevistados. O EIA/RIMA da *Fortescue* afirma que serão despejados no mar 66 quilogramas/m³ em uma vazão de 0,7 m³/seg. Segundo os entrevistados o consumo energético é o fator limitante para o investimento:

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 (E6);
 Para que a dessalinização de água do mar seja vantajosa, é preciso de um maior volume para poder se compensar o investimento (E4). A dessalinização da água do mar tem um custo energético alto. No entanto, plantas mais antigas consomem cerca de 4 kWh/m³, mas as plantas atuais consomem em torno de 2,8 kWh/m³ (E6).

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 2 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.

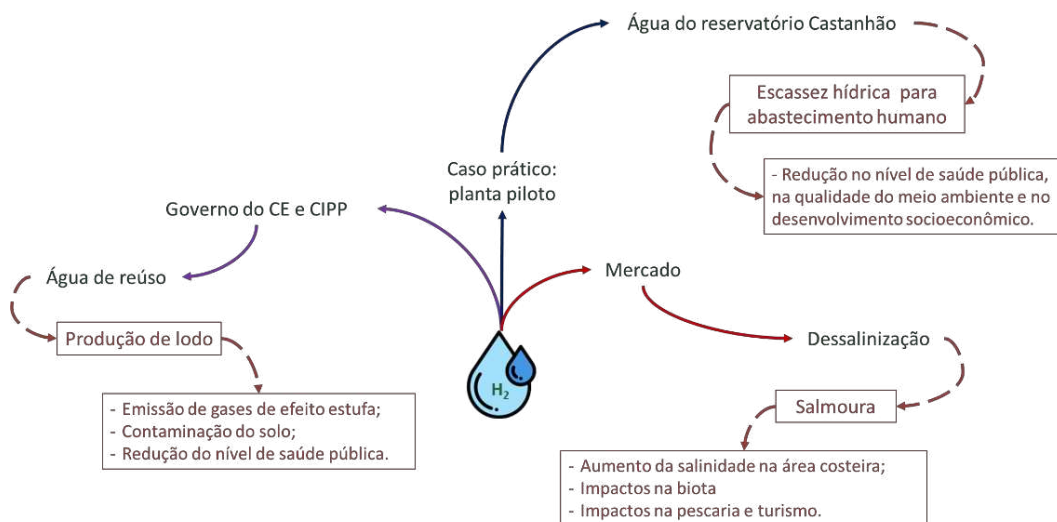
Figura 2: CLD do sistema de produção de H2V no *hub* de CE.



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 ser consequências a partir disso. No módulo da água em reservatório é claro que há um balanço ocasionado pela evapotranspiração de água, o que implica em menos água bruta para múltiplos usos. No que tange à capacidade de tratamento de efluentes, nota-se que essa variável é influenciada pela quantidade de efluentes domésticos coletados. Quanto maior a rede de coleta, maior a capacidade de tratamento de efluentes e maior a disponibilidade de água para o *hub* de H2V. Entretanto, quão maior a disponibilidade de água para o H2V, maior a produção de lodo, o que pode decorrer em mais impactos socioecológicos. No que tange à produção de água de dessalinização do mar, quanto maior a capacidade de OR, maior a disponibilidade de água para o *hub* de H2V, contudo, maior será a concentração de sal na água do mar e menor será a qualidade de vida da biota, o que pode ocasionar um aumento na pobreza da comunidade pesqueira da região. O CLD elaborado captura uma diversidade de fatores que foram destacados nas entrevistas, e representa de forma satisfatória as necessidades empíricas de um sistema socioecológico. A partir do CLD, este estudo propõe na figura 3 um *framework* das fontes hídricas de abastecimento do *hub* de H2V e dos possíveis impactos socioecológicos.

Figura 3: Framework de abastecimento do *hub* de H2V e impactos socioecológicos.



Fonte: autores (2023).

5 Discussão

O H2V está sendo considerado a melhor solução para a descarbonização. Apesar de ser um vetor energético bastante versátil, potencialmente aplicável em vários setores da economia, potencialmente mitigador dos efeitos das MCs e com uma esperada importância geopolítica, 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 seu estabelecimento (SCITA; RAIMONDI; NOUSSAN, 2020).

As principais barreiras tecnológicas na cadeia de valor do H2V são relativas à produção em larga escala, pois ainda é um processo mais caro que o hidrogênio 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 em larga escala. Contudo, ainda há questões importantíssimas a serem resolvidas, principalmente geopolíticas, pois novas relações surgirão a partir do crescimento 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 (DILLMAN; HEINONEN, 2022; SCITA; RAIMONDI; NOUSSAN, 2020) e a quantidade potencial de H2V que esperam comercializar até 2050, sendo essa estimativa de 420 megatoneladas por ano (IRENA, 2022). No Brasil, somente o CE assinou cerca de 30 ME, e além disso, já possui algumas operações com contratos assinados. Entretanto, este estudo corrobora com a literatura e suporta que a falta de avaliações sociais da cadeia de valor do H2V 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).

Como exemplo disso, o desenvolvimento deste trabalho focado apenas nas fontes de água para a produção de H2V, identificou impactos socioecológicos, como o aumento da salinidade e da temperatura do mar, o que pode implicar em consequências negativas para a biota, para a comunidade pesqueira e para o turismo da região; possível falta de água para abastecimento humano, quando o CE é acometido de secas severas; e aumento do envio de lodo para aterros sanitários, o que pode aumentar a probabilidade de contaminação do solo, caso esse despejo não seja bem executado.

Por isso, a preocupação quanto o planejamento da cadeia de valor do H2V é importante, pois a preocupação quanto à água e outros recursos é legítima (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 novas injustiças e vulnerabilidade e não resolver problemas existentes no mercado de energia e no âmbito socioeconômico (SOVACOOOL *et al.*, 2019). Portanto, apesar de o H2V ser considerado verde, é possível que ele não seja sustentável. A forma como o sistema de produção de H2V no CE está sendo planejado corresponde a maior parte das estratégias nacionais de H₂, cujo foco é priorizar sua inserção na economia do H₂, seja quanto ao uso doméstico ou quanto à exportação, ou seja, escalabilidade primeiro, limpeza depois. Nesse tipo de estratégia, a mitigação das MCs são uma preocupação, mas não são prioritárias, pois à falta de medidas regulatórias abrangentes e prescritivas (CHEN; LEE, 2022).

6 Conclusão

Este artigo utilizou da ferramenta de CLD da abordagem de DS para identificar os possíveis impactos socioecológicos da produção de H2V a partir de diferentes fontes hídricas de abastecimento. Estes possíveis impactos são, de acordo com a fonte de abastecimento:

- a) Água de reservatórios: redução do desenvolvimento socioeconômico da região do Jaguaribe em períodos de seca, redução nos níveis de saúde pública e na qualidade do meio ambiente;
- b) Dessalinização de água do mar: aumento na concentração de sais e da temperatura da água do mar, redução da biota e aumento da pobreza da comunidade tradicional;

- c) Água de reúso: maior produção de lodo, aumento nas emissões de GEE, possível contaminação do solo e redução nos níveis de saúde pública.

Como limitações desse artigo, o trabalho não capturou a magnitude dos impactos identificados e não indicou cenários de produção sustentável de H2V considerando as fontes hídricas. O desenvolvimento futuro desse trabalho pretende aplicar a ferramenta Diagrama de Estoques e Fluxos, também da abordagem DS, para simular cenários de produção de H2V a partir da combinação das fontes hídricas mapeadas. Outra limitação do estudo é o fato de não ter havido consulta a membros de comunidades tradicionais da região do CE, justamente as pessoas que mais podem ser impactadas pelo funcionamento de um *hub* de H2V e sofrer com a distribuição inadequada dos benefícios e malefícios da parte produtiva da cadeia de H2V.

7 REFERÊNCIAS

- ABDIN, Z.; ZAFARANLOO, A.; RAFIEE, A.; MÉRIDA, W.; LIPINSKI, W.; KHALILPOUR, K. 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>.
- 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.
- 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.
- BECKER, H.; MURAWSKI, J.; SHINDE, D. V.; STEPHENS, I. E. L.; HINDS, G.; SMITH, G. Impact of impurities on water electrolysis: a review. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 7, n. 7, p. 1565-1603, 2023. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d2se01517j>.
- CACTUS GREEN ENERGY. **Cactus Energia Verde promete H2V em 2025 no Pecém**. 2022. Disponível em: <https://cactusgreenenergy.com.br/2022/09/23/cactus-energia-verde-promete-h2v-em-2025-no-pecem/>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- CAGECE. **PLANO DE GESTÃO ESTRATÉGICA E DE NEGÓCIO 2023 - 2027**. Fortaleza: Cagece, 2023.
- CARDOSO, B. J.; RODRIGUES, E.; GASPAR, A. R.; GOMES, Á. 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>.
- CAVALIERE, P. D; PERRONE, A.; SILVELLO, A. 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>.
- CEARÁ. 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. **Ceará: atlas eólico e solar**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2019. 196 p.
- CEARÁ. **Hub do Hidrogênio Verde avança com assinatura do memorando de**

entendimento entre Governo do Ceará e Cactus Energia Verde. 2022a. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2022/02/07/hub-do-hidrogenio-verde-avanca-com-assinatura-do-memorando-de-entendimento-entre-Hub%20do%20Hidrog%C3%AAnio%20Verde%20avan%C3%A7a%20com%20assinatura%20do%20memorando%20de%20entendimento%20entre%20Governo%20do%20Cear%C3%A1%20e%20Cactus%20Energia%20Verde-do-ceara-e-cactus-energia-verde/>. Acesso em: 06 dez. 2022.

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.

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

CHENG, W.; LEE, S. How Green Are the National Hydrogen Strategies? Sustainability, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 1930, 8 fev. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su14031930>.

CHEN, K.H.; WANG, H.C.; HAN, J.L.; LIU, W.Z; CHENG, H.Y.; LIANG, B.; WANG, A.-J. The application of footprints for assessing the sustainability of wastewater treatment plants: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 277, p. 124053, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124053>.

COMPLEXO DO PECÉM. **Comerc. Eficiência e Casa dos Ventos assinam pré-contrato com Complexo do Pecém para produção de hidrogênio e amônia verde.** 2022a. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/comerc-eficiencia-e-casa-dos-ventos-assinam-pre-contrato-com-complexo-do-pecem-para-producao-de-hidrogenio-e-amonia-verde/>. Acesso em: 06 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.

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. 149, p. 111-122, 2022.

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.

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

FROTA, R. L.; SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO, F. de A.; PORTO, V. C. 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>.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M.P.; HULTINK, E. J. 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>.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. 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, M; ZHANG, Z; ATIA, A.; VENKATRAMAN, M.; ESPOSITO, D. V.; FTHENAKIS, V. 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>.

HAO, X.; WANG, X.; LIU, R.; LI, Shuang; VAN LOOSDRECHT, Mark C.M.; JIANG, H. Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants. **Water Research**, v. 160, p. 268-277, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.068>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. summary for policymakers**. 6. ed. Geneva: Ipcc, 2022. 37 p.

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.

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.

JASIM, N. A. 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>.

JONES, E.; QADIR, M.; VAN VLIET, M. T.H.; SMAKHTIN, V.; KANG, S.M. 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>.

KUMAR, S. S.; LIM, H. 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.egy.2022.10.127>

MANNINA, G.; GULHAN, H.; NI, B.J. 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>.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C.S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. 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, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MÜLLER, F.; TUNN, J.; KALT, T. Hydrogen justice. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 17, n. 11, p. 115006, 1 nov. 2022. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac991a>.

- SAHIN, O.; STEWART, R. A.; HELFER, F. 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, M.; FOLCH, M. 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>.
- SCITA, R.; RAIMONDI, P. P.; NOUSSAN, M. Green Hydrogen: the Holy Grail of Decarbonization? An Analysis of the Technical and Geopolitical Implications of the Future Hydrogen Economy. Milano: Fondazione Eni Enrico Mattei, 2020. (Nota di Lavoro, 12.2020).
- SHI, X.; LIAO, X.; LI, Y. Quantification of fresh water 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>.
- SOUZA FILHO, Francisco de Assis. **CEARÁ 2050**: estudo setorial especial de recursos hídricos. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2018. 94 p.
- SOVACOOOL, B. K.; MARTISKAINEN, M.; HOOK, A.; BAKER, L. 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-019-02521-7>.
- STERMAN, J. **Business dynamics** : systems thinking and modeling for a complex world. 1. ed. Boston: Irwin McGraw-Hill, 2000.
- STUDART, T. M. de C.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A. de; PINHEIRO, M. I. .; BARROS, L. S. 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>.
- TENHUMBERG, N.; BÜKER, K. Ecological and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Different Water Electrolysis Technologies. **Chemie Ingenieur Technik**, [S.L.], v. 92, n. 1-2, p. 17-23, 2020.
- TEOTÓNIO, C.; RODRÍGUEZ, M.; ROEBELING, P.; FORTES, P. 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. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104539>.
- 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.
- UNIÃO EUROPEIA. **Study on the offshore grid potential in the Mediterranean region**. União Europeia, 2020. 206 p.
- WOODS, P.; BUSTAMANTE, H.; AGUEY-ZINSOU, K.F. 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>.
- YADAV, G.; MISHRA, A.; GHOSH, P.; SINDHU, R.; VINAYAK, V.; PUGAZHENDHI, A. 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>.