

IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO VERDE: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Francisca Karoline Bezerra de Sousa (Creation Research Group/ UFRN)
Karoline.sousa.090@ufrn.edu.br

Mario Orestes Aguirre González (Creation Research Group/ UFRN)
mario.gonzalez@ufrn.br

Mayara Adrielly Leal de Oliveira Rodrigues (Creation Research Group/UFRN)
mayara.leal.702@ufrn.edu.br

Andressa Medeiros Santiso (Creation Research Group/ UFRN)
andressa.santiso.014@ufrn.edu.br

Rafael Monteiro de Vasconcelos (Creation Research Group/ UFRN)
rafael.monteiro.050@ufrn.br



Frente à crise climática gerada pelo aumento de emissão dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera da Terra, o Acordo de Paris estabeleceu como meta alcançar emissões líquidas zero (net zero-emissions) em CO₂ até 2050 com o objetivo de manter o aumento da temperatura do planeta em 1.5 °C em relação aos níveis pré-industriais. Nessa perspectiva, a produção de hidrogênio verde (H₂V) posiciona-se como ecologicamente apropriado com emissões neutras em CO₂. Dentro desse contexto, a compreensão dos impactos ambientais das tecnologias emergentes relacionadas ao H₂V torna-se essencial para identificar e desenvolver uma trajetória adequada e ambientalmente sustentável para sua implantação. O artigo objetiva sistematizar os impactos ambientais relacionados à produção, armazenamento e transporte de H₂V. Para isso foi realizada uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) nas bases de dados SCOPUS e Web Of Science. Como resultado, identificou-se como impactos positivos que o mesmo possibilita a redução de emissões de gases intensificadores do efeito estufa; possibilita a descarbonização de setores econômicos de difícil redução, crescimento econômico na região com potencial de geração de energia elétrica de fonte renovável, dentre outros. Como possíveis impactos negativos são: restrição de atividades na região de instalação do empreendimento e possíveis conflitos com a população da região e esgotamento de recursos naturais. Diante do exposto, faz-se necessário que as decisões para a produção de H₂V sejam baseadas não apenas em aspectos econômicos, mas também em aspectos sociais e ambientais para contribuir com a descarbonização mundial.

Palavras-chave: Descarbonização, Energias renováveis, Impacto ambiental, Hidrogênio Verde.

1. Introdução

Com o crescimento populacional e o conseqüente aumento no consumo de energia nos últimos anos (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2019), o mundo enfrenta uma crise climática, gerada pelo aumento drástico dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera da Terra. Apenas no ano de 2023, o recorde de 37,4 bilhões de toneladas (Bt) de CO₂ emitidas foi alcançado, correspondendo a um aumento de 410 milhões de toneladas (Mt) em relação ao ano de 2022 (IEA, 2023a).

Com o objetivo de manter o aumento da temperatura do planeta em 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, foi assinado, em 2015, o Acordo de Paris, considerado um marco na pauta de mudanças climáticas. O tratado global representa um compromisso firmado pelos países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) regido a alcançar emissões líquidas zero (*net zero-emissions*) em CO₂ até 2050 (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015; IEA, 2021a; IRENA, 2022a). Para o garantir o cumprimento dessa meta, diversos países vêm traçando estratégias para acelerar a descarbonização, tomando como alicerce as energias renováveis, eletrificação, eficiência energética e o hidrogênio (IRENA, 2022a).

Nessa perspectiva, a produção de hidrogênio por meio do processo de eletrólise da água com uso de eletricidade renovável posiciona-se como um método inovador e ecologicamente apropriado para gerar gás hidrogênio com emissões neutras em CO₂, denominado hidrogênio verde (H₂V) (ARSAD *et al.*, 2024). O hidrogênio verde surge como vetor estratégico para descarbonização de setores de difícil abatimento (MME, 2023), além de desempenhar papel chave na segurança energética (IRENA, 2022b).

Dentre os 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), incentivar medidas contra as mudanças climáticas é tão relevante quanto assegurar a água potável e saneamento para as comunidades, bem como preservar as vidas aquáticas e terrestres (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2024). Assim, para desenvolver uma trajetória adequada e ambientalmente sustentável de implantação das tecnologias emergentes relacionadas ao hidrogênio verde, é imprescindível a compreensão dos impactos ambientais a elas relacionados (WEI *et al.*, 2024). Além disso, é fundamental levantar discussões como esta na fase inicial de implantação de projetos de H₂V, a fim de garantir que possam ser consideradas desde o início, contribuindo para colocar a economia do hidrogênio em uma via de desenvolvimento sustentável.

Ao analisar a literatura relacionada ao hidrogênio verde, identificou-se uma lacuna quanto à análise de impactos ambientais em atividades relacionadas ao setor. Visando preencher essa

lacuna, destaca-se a necessidade de uma análise bibliográfica focada em responder o seguinte questionamento de pesquisa: **“Quais seriam os impactos ambientais relacionados à produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde?”**.

O artigo está estruturado em cinco seções: a seção 1, apresenta a introdução e contextualização ao tema; a seção 2 compreende a fundamentação teórica, abordando a produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde, bem como os conceitos de aspecto e impacto ambiental; a seção 3 apresenta o método da pesquisa; a seção 4 aborda os resultados dessa pesquisa e sua discussão; e, por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais e conclusões.

2. Fundamentação teórica

2.1. Produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde

A produção de hidrogênio através da dissociação da água em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), realizada sob ação de corrente elétrica, é denominada de eletrólise da água. A unidade de eletrólise de água é composta por um ânodo e um cátodo conectados através de uma fonte de alimentação externa e imersos em um eletrólito condutor (ZHOU *et al.*, 2022). Quando a energia elétrica utilizada nesse processo é fornecida por uma fonte renovável, ocorre a produção de hidrogênio verde (IRENA, 2020).

Os eletrolisadores utilizados na produção do hidrogênio possuem diferentes variações baseadas em propriedades físico-químicas e aspectos eletroquímicos. Dentre suas variações, as três principais tecnologias comerciais são: 1) Célula de eletrólise de óxido sólido (SOEC), 2) eletrólise alcalina (AWE) e 3) eletrólise com membranas poliméricas (PEM). Dentre eles, os eletrolisadores alcalinos e os eletrolisadores com membranas poliméricas são os mais utilizados no mercado. Estes são diferentes devido à temperatura de operação e baseado no eletrólito, que podem escolher materiais diferenciados e diversos componentes. Após sua produção, o hidrogênio verde pode ser armazenado em estado gasoso, por compressão, ou em estado líquido, por liquefação. A forma de armazenamento influencia diretamente como o hidrogênio será transportado (IRENA, 2020).

A escolha do método de transporte mais adequado para o hidrogênio verde dependerá do uso final, distância entre o local de produção e o local de consumo e da quantidade do volume transportado. O transporte de hidrogênio pode ser realizado por meio de gasodutos, navios ou caminhões (SCHNEIDERS *et al.*, 2023).

2.2. Aspectos e impactos ambientais

O princípio básico do conceito de impacto ambiental é que são produzidas alterações no ambiente induzidas pela ação humana ou como resultado das suas atividades, afetando assim a biodiversidade, os recursos naturais e os serviços ecossistêmicos. Estas mudanças ameaçam a saúde, a segurança e as atividades sociais e económicas e são, de um ponto de vista sustentável, insustentáveis (ARANI *et al.*, 2021).

Já o aspecto ambiental são os elementos das atividades, produtos ou serviços de uma organização que interage ou pode interagir com o meio ambiente. Um aspecto ambiental significativo é aquele que tem ou pode ter um ou mais impactos ambientais significativos e esses são determinados pela organização, aplicando um ou mais critérios (DUARTE; SÁNCHEZ, 2017).

3. Método da pesquisa

De acordo com Nunes (2020), uma pesquisa científica requer a utilização cuidadosa de métodos, técnicas e procedimentos, além da clareza de divulgação da construção do conhecimento científico. Como cada pesquisa tem suas próprias características, faz-se necessário que elas sejam explicitadas para uma melhor compreensão quanto aos seus propósitos, sua natureza, seu objetivo, sua abordagem, tipo de argumentação lógica e seu procedimento técnico (WILLIAMS, 2007; GONZÁLEZ, 2010; GONZÁLEZ; TOLEDO, 2012).

Assim, o presente estudo é caracterizado como pesquisa teórica, já que sua finalidade é identificar, por meio da literatura, os impactos ambientais positivos e negativos da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde. No que tange à classificação dos objetivos, o estudo possui características exploratórias e descritivas. A característica exploratória está relacionada à necessidade de um levantamento bibliográfico e documental a respeito do tema. Já a característica descritiva está relacionada ao estabelecimento de correlações entre as variáveis encontradas.

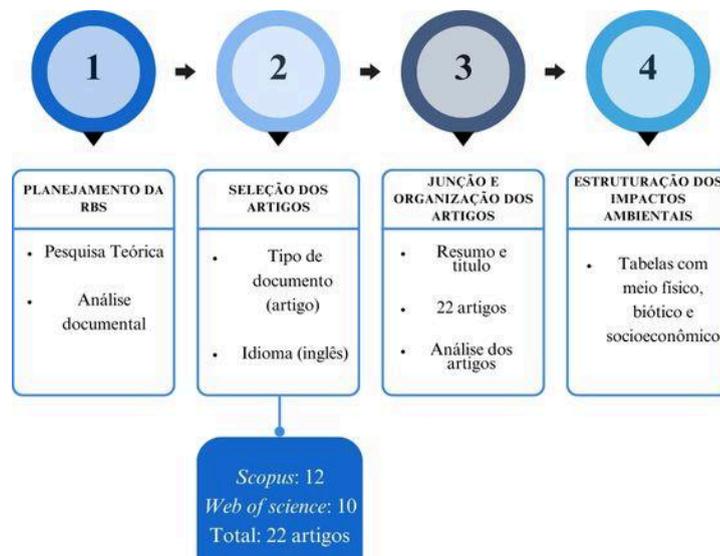
Por fim, a presente pesquisa possui abordagem qualitativa, haja vista que foi investigada de forma teórica os objetos de estudo. Dentre os procedimentos realizados, o método de pesquisa bibliográfica foi utilizado.

3.1. Procedimento da pesquisa

A presente pesquisa teórica baseou-se na elaboração de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), a qual compreende trabalhos publicados que oferecem um exame da

literatura abrangendo assuntos específicos (GALVÃO; RICARTE, 2020). Dentre diversas vantagens, essa modalidade de pesquisa permite desenvolver estudos que cubram lacunas na literatura trazendo real contribuição para um campo científico, propor temas, problemas, hipóteses e metodologias inovadoras de pesquisa, além de otimizar recursos disponíveis em prol da sociedade, do campo científico, das instituições e dos governos que subsidiam a ciência (BAEK *et al.*, 2018). O procedimento da RBS contemplou quatro etapas, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Etapas da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na primeira etapa foi realizado o planejamento da RBS com a pesquisa exploratória em livros, dissertações e teses. Na segunda etapa, foram utilizadas como palavras-chave as combinações “*Green hydrogen*” AND “*environmental impacts*” e “*Renewable hydrogen*” AND “*environmental impacts*” nas bases de dados SCOPUS e Web Of Science. Na terceira etapa, foi utilizado como filtro tipo de documento (artigo de pesquisa) e o idioma (inglês). Através da leitura dos títulos e resumos dos artigos encontrados, foi possível filtrar e selecionar quais de fato discutem sobre o tema proposto. Após exclusão dos artigos repetidos, foram selecionados 22 artigos, sendo 12 da SCOPUS e 10 do Web of Science. Na quarta etapa, ocorreu a estruturação dos impactos discutidos em cada artigo selecionado e todos os artigos foram esquematizados de acordo com os meios físico, biótico e socioeconômico.

4. Resultados e discussão

Diante do potencial cenário mundial em hidrogênio verde, o mapeamento de impactos gerados por esse setor é imprescindível para identificar impactos positivos e reduzir os possíveis impactos negativos e danos ocasionados ao meio ambiente. Desse modo, os impactos ambientais identificados na produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde foram categorizados em positivos e negativos.

4.1 Impactos ambientais negativos na produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde

Dentre os impactos ambientais negativos identificados na literatura, destacam-se impactos ambientais que afetam meios físico, biológico e socioeconômico, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Impactos ambientais negativos na produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde

Meio Físico	Autores	Meio Biológico	Autores	Meio socioeconômico	Autores
Esgotamento dos recursos naturais	Maciel <i>et al.</i> , 2023, 2019; Cremonese <i>et al.</i> , 2023; Valverde <i>et al.</i> , 2023; Jolaoso <i>et al.</i> , 2023; Melo <i>et al.</i> , 2023; Hermesmann <i>et al.</i> , 2023	Diminuição de espécies florísticas	Kumar <i>et al.</i> , 2023; Cremonese <i>et al.</i> , 2023	Prejuízos à saúde	Osman <i>et al.</i> , 2022; Jolaoso <i>et al.</i> , 2023
Alteração da qualidade do ar	Weidner <i>et al.</i> , 2023; Bionaz <i>et al.</i> , 2022	Diminuição de espécies faunísticas	Kumar <i>et al.</i> , 2023; Cremonese <i>et al.</i> , 2023	Aumento dos custos na produção de Hidrogênio	Chisalita <i>et al.</i> , 2022
Aumento dos gases do efeito estufa	Susmozas <i>et al.</i> , 2015; Osman <i>et al.</i> , 2022; Marouani <i>et al.</i> , 2023; Weidner <i>et al.</i> , 2023			Incômodo acústico	Kumar <i>et al.</i> , 2023; Cremonese <i>et al.</i> , 2023
Aumento de misturas explosivas no ambiente	Osman <i>et al.</i> , 2022			Deslocamento da zona de pesca	Kumar <i>et al.</i> , 2017
Acidificação terrestre	Bionaz <i>et al.</i> , 2022			Restrição das atividades recreativas	Kumar <i>et al.</i> , 2017
Formação de oxidantes fotoquímicos	Bionaz <i>et al.</i> , 2022			Restrição das atividades desportivas	Kumar <i>et al.</i> , 2017
Esgotamento da camada de ozônio	Bionaz <i>et al.</i> , 2022			Restrição das atividades pesqueiras	Kumar <i>et al.</i> , 2017
Poluição visual	Kumar <i>et al.</i> , 2023; Cremonese <i>et al.</i> , 2023			Restrição das atividades turísticas	Kumar <i>et al.</i> , 2017
Alteração no microclima	Kumar <i>et al.</i> , 2023; Cremonese <i>et al.</i> , 2023			Conflitos com a população da região	Kumar <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Maciel *et al.* (2023), Cremonese *et al.* (2023), Valverde *et al.* (2023) e Melo *et al.* (2023) discutem que um dos principais impactos negativos da produção do hidrogênio verde está relacionado com o esgotamento de recursos naturais. Como exemplo, tem-se a demanda de água purificada pelos eletrolisadores disponíveis comercialmente para o processo de eletrólise.

Nas regiões áridas com acesso limitado aos recursos de água doce, as instalações de eletrólise em grande escala para a produção e exportação de hidrogênio poderia agravar ainda mais o problema da escassez desse recurso natural (HERMESMANN *et al.*, 2023) Assim, considerando que a produção de hidrogênio verde demanda água na maioria das suas etapas, é importante considerar estratégias para tornar o processo produtivo mais sustentável, sem ameaçar a segurança hídrica ou a vida humana (JOLAOSO *et al.*, 2023).

Outro impacto negativo é resultante do vazamento de hidrogênio, pelo qual a combinação de ar liquefeito e hidrogênio pode ocasionar uma mistura explosiva (OSMAN *et al.*, 2022). Os autores Susmozas *et al.* (2015), Osman *et al.* (2022), Marouani *et al.* (2023) e Weidner *et al.* (2023) discutem, ainda, que qualquer vazamento de hidrogênio exacerba o potencial de aquecimento global de outros gases de efeito estufa na atmosfera, aumentando assim as pressões das mudanças climáticas. Sabe-se, também, que a baixa temperatura para armazenamento de hidrogênio liquefeito à pressão ambiente do $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ aumenta alguns riscos, o que pode causar queimaduras pelo frio (OSMAN *et al.*, 2022).

Com relação aos custos de produção, o hidrogênio verde obtido pela eletrólise possui custo mais elevado quando comparado ao hidrogênio produzido convencionalmente por reforma a vapor, que atualmente é o método de produção de hidrogênio mais econômico. Isso gera um conflito entre interesses ambientais e econômicos pois o hidrogênio verde tem custo mais elevado devido, principalmente, às altas necessidades energéticas (CHISALITA *et al.*, 2022).

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) realizada por Bionaz *et al.* (2022) conclui que a participação do eletrolisador e o transporte de hidrogênio verde contribui para a acidificação terrestre. O transporte também contribui para o esgotamento da camada de ozônio e a formação de oxidantes fotoquímicos (smog de verão). Além disso, o eletrolisador também ocasiona impactos significativos devido às emissões de arsênio, zinco e outros elementos tóxicos emitidos durante a produção de seus componentes (WEIDNER *et al.*, 2023).

Ainda dentro dessa discussão, Kumar *et al.* (2023) e Cremonese *et al.* (2023) apontam que as grandes estruturas muitas vezes criam imenso ruído durante a construção e operação, mesmo com dispositivos de amortecimento de voz. Isto pode causar a perda de habitat de espécies florísticas e faunísticas as quais são particularmente sensíveis a níveis sonoros elevados.

Com relação aos impactos socioeconômicos, como a maioria desses empreendimentos são construídos próximos à região costeira, pode-se citar o deslocamento das atividades de pesca, restrição das atividades recreativas, de entretenimento, desportivas e turísticas e a oposição dos pescadores e outras partes interessadas. Isso porque impacta diretamente a subsistência de indivíduos e famílias que vivem em regiões costeiras e insulares (KUMAR *et al.*, 2017).

4.2 Impactos ambientais positivos na produção, armazenamento e transporte do hidrogênio verde

Dentre os impactos ambientais positivos identificados na literatura, destacam-se impactos ambientais que afetam meios físico, biológico e socioeconômico, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Impactos ambientais positivos na produção, distribuição e transporte de hidrogênio verde

Meio Físico	Autores	Meio Biológico	Autores	Meio socioeconômico	Autores
Redução de emissões de gases intensificadores do efeito estufa	Marouani <i>et al.</i> , 2023; Hermesmann <i>et al.</i> , 2023; Hassan <i>et al.</i> , 2024; Weidner <i>et al.</i> , 2023; Pastore <i>et al.</i> , 2022; Oner; Khalilpour, 2022; Guanawan <i>et al.</i> , 2021; Hassan <i>et al.</i> , 2023	Diminuição da destruição de recifes de coral	Zainal <i>et al.</i> , 2024	Mais uma opção de transporte de energia renovável	Palmer <i>et al.</i> , 2021; Guanawan <i>et al.</i> , 2021; Marouani <i>et al.</i> , 2023
Diminuição da dependência de recursos finitos de combustíveis fósseis	Marouani <i>et al.</i> , 2023; Hermesmann <i>et al.</i> , 2023; Hassan <i>et al.</i> , 2024	Diminuição dos incêndios florestais	Zainal <i>et al.</i> , 2024	Contribuição para a saúde da população	Weidner <i>et al.</i> , 2023; Pastore <i>et al.</i> , 2022; Oner; Khalilpour, 2022; Hassan <i>et al.</i> , 2023
Liberção de menor quantidade de material particulado	Weidner <i>et al.</i> , 2023; Pastore <i>et al.</i> , 2022; Oner; Khalilpour, 2022			Melhora a saúde e o bem-estar dos indivíduos	Hassan <i>et al.</i> , 2023; Olabi <i>et al.</i> , 2023
Diminuição da poluição atmosférica	Guanawan <i>et al.</i> , 2021; Cremonese <i>et al.</i> , 2023; Long <i>et al.</i> , 2022			Redução das importações de petróleo	Long <i>et al.</i> , 2022
Melhoria na qualidade do ar	Guanawan <i>et al.</i> , 2021; Hassan <i>et al.</i> , 2023			Aproveitamento das fontes de energia renováveis	Long <i>et al.</i> , 2022
Diminuição de ondas de calor	Zainal <i>et al.</i> , 2024			Maior eficiência na conversão de energia	Marouani <i>et al.</i> , 2023
Diminuição dos incêndios florestais	Zainal <i>et al.</i> , 2024.			Novas oportunidades de emprego	Cremonese <i>et al.</i> , 2023; Marouani <i>et al.</i> , 2023; Olabi <i>et al.</i> , 2023; Hassan <i>et al.</i> , 2024
Diminuição de inundações frequentes	Zainal <i>et al.</i> , 2024.			Estimula o crescimento econômico	Hassan <i>et al.</i> , 2024.
Diminuição de secas	Zainal <i>et al.</i> , 2024			Atrair investimentos	Hassan <i>et al.</i> , 2024
Evitar o aumento do nível do mar	Zainal <i>et al.</i> , 2024			Contribuir para o desenvolvimento sustentável	Hassan <i>et al.</i> , 2024
				Estimula a investigação, o desenvolvimento e a inovação em vários setores, incluindo energia renovável	Hassan <i>et al.</i> , 2024
				Progresso em soluções de energia limpa	Hassan <i>et al.</i> , 2024
				Crescimento de indústrias no setor de produção de Hidrogênio	Hassan <i>et al.</i> , 2024
				Colaboração internacional de conhecimentos	Hassan <i>et al.</i> , 2024
				Novas oportunidades comerciais	Hassan <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A produção de hidrogênio verde contribui para uma melhor qualidade do ar sem a produção de hidrocarbonetos e gases intensificadores do efeito estufa, potencialmente moldando os futuros mercados globais de energia (GUANAWAN *et al.*, 2021; LONG *et al.*, 2022; CREMONESE *et al.*, 2023). Ao contrário dos combustíveis fósseis, quando o hidrogênio é queimado, não produz gases perigosos, como o Gás Carbônico, o Monóxido de Carbono e o Metano (LONG *et al.*, 2022). A produção de hidrogênio verde diminui ainda a dependência

de recursos finitos de combustíveis fósseis (OLABI *et al.*, 2023; MAROUANI *et al.*, 2023; HERMESMANN *et al.*, 2023; HASSAN *et al.*, 2024).

Algumas das vantagens da economia do hidrogênio verde podem ser resumidas, ainda, como segurança energética pela redução das importações de petróleo e sustentabilidade pelo aproveitamento das fontes de energia renováveis (LONG *et al.*, 2022).

Assim, o hidrogênio verde tem o potencial de impulsionar a penetração de fontes intermitentes na matriz elétrica, contribuindo para a descarbonização de setores de difícil abatimento. O produto é também aplicável para o transporte de energia renovável de regiões com recursos energéticos atrativos para outras que não possuam grande capacidade energética renovável. O uso dessa molécula dispensa ainda a construção de linhas de transmissão, uma vez que pode ser movimentado por gasodutos, navios ou caminhões (PALMER *et al.*, 2021).

O hidrogênio eletrolítico tem benefícios consideráveis na saúde humana devido à liberação de menor quantidade de material particulado e a diminuição de impactos relacionados às mudanças climáticas. Ele pode servir, ainda, como um meio para descarbonizar setores difíceis de reduzir e como um vetor de energia transportável de baixo carbono, potencialmente ajudando a limitar o aquecimento global a níveis habitáveis uma vez que o seu processo de utilização é isento de carbono (PASTORE *et al.*, 2022; ONER; KHALILPOUR, 2022; WEIDNER *et al.*, 2023).

Assim, investir na produção de hidrogênio verde acarreta na diminuição de diversos efeitos nocivos das alterações climáticas, tais como a destruição de recifes de coral, ondas de calor, incêndios florestais, inundações frequentes, secas e aumento do nível do mar (ZAINAL *et al.*, 2024).

Com relação aos impactos socioeconômicos pode-se citar, que o desenvolvimento e a implantação de tecnologias de hidrogênio verde criam novas oportunidades de emprego em toda a cadeia de valor, incluindo a fabricação de materiais, construção, operação e manutenção de instalações (CREMONESE *et al.*, 2023; MAROUANI *et al.*, 2023; OLABI *et al.*, 2023; HASSAN *et al.*, 2024). A transição para uma economia baseada no hidrogênio pode estimular ainda o crescimento econômico, atrair investimentos e contribuir para o desenvolvimento sustentável (HASSAN *et al.*, 2024).

Com isso, HASSAN *et al.* (2024) discutem, também, que a inovação tecnológica, a transferência de conhecimento e a transição para uma economia baseada em hidrogênio verde estimula a investigação, o desenvolvimento e a inovação em vários setores, incluindo energia renovável, tecnologias de eletrólise, células de combustível e armazenamento de hidrogênio.

A produção de hidrogênio verde impulsiona, ainda, o progresso em soluções de energia limpa e apoia o crescimento de indústrias no setor, além de permitir a exportação de conhecimentos e tecnologias, promovendo a colaboração internacional e oportunidades comerciais. Por fim, como a produção de hidrogênio verde auxilia para melhorar a qualidade do ar, ela proporciona uma melhor saúde e bem-estar reduzindo o número de mortes e doenças relacionadas à poluição atmosférica (OLABI *et al.*, 2023).

5. Considerações finais, conclusões e recomendações

Diante do cenário global de promoção da transição energética e o potencial do hidrogênio verde para este fim, este estudo visa compreender os impactos ambientais associados à produção, armazenamento e transporte do hidrogênio verde, assegurando um desenvolvimento sustentável do setor. Os impactos mapeados foram elencados segundo os meios físico, biológico e socioeconômico.

Nesse contexto, foi possível inferir com a análise dos artigos científicos e dos relatórios técnicos que, apesar de serem considerados meios de produção sustentável, o hidrogênio pode ocasionar impactos ambientais negativos, como: alteração no microclima, aumento nos custos da produção de hidrogênio, restrição de atividades na região de instalação do empreendimento, dentre outros.

Entre seus impactos ambientais positivos, a maioria dos autores discute sobre a redução de emissões de gases intensificadores do efeito estufa, o que resulta na melhoria na qualidade do ar e na diminuição da poluição atmosférica. Em relação ao meio biológico, foram encontradas discussões sobre a contribuição do hidrogênio verde na diminuição da destruição de recifes de coral e diminuição de espécies faunísticas e florísticas, evidenciando a carência de estudos que analisem impactos ambientais da biota das regiões onde esses sistemas de produção são instalados. No meio socioeconômico, o impacto mais discutido foi o hidrogênio verde como uma alternativa de transporte de energia renovável, gerando novas oportunidades de emprego e contribuindo para a saúde da população.

Diante do exposto, faz-se necessário que as decisões para a produção de hidrogênio sejam baseadas não apenas em aspectos econômicos, mas também em impactos no meio faunístico, florístico e custos ambientais. Assim, a produção, armazenamento e transporte de hidrogênio, juntamente com as fontes de energia renováveis, podem se tornar uma estratégia eficaz para reduzir o aquecimento global e contribuir para a descarbonização mundial.

Recomenda-se para trabalhos futuros a análise mais detalhada dos impactos ambientais da produção, armazenamento e transporte e aplicação de um modelo que auxilie nas tomadas de decisão desde o planejamento até a operação de projetos de implantação de hidrogênio verde.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **CO2 Emissions in 2023** - A new record high, but is there light at the end of the tunnel?. França: IEA, 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>. Acesso em: 10 mai. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA) **Clean energy can help to ease the water crisis**. Paris: IEA, 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/clean-energy-can-help-to-ease-the-water-crisis>. Acesso em: 10 mai. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Net Zero by 2050** - A Roadmap for the Global Energy Sector. França: IEA, 2021a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Acesso em: 10 mai. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Global Hydrogen Review - 2021**. França: IEA, 2021b. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2024.

ARANI, Maryam Masjedi; ARANI, Maryam Ghiyasiyan; NIASARI, Masoud Salavati Synthesis and characterization of carbon sphere-supported sand-rose like N-GQDs/NiCo2S4. **Fuel**, v. 312, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122956>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121028179>. Acesso em: 19 mai. 2024.

ARSAD, S. R. *et al.* Recent advancement in water electrolysis for hydrogen production: A comprehensive bibliometric analysis and technology updates. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 60, p. 780-801, 2024.

BAEK, Sora *et al.* The most downloaded and most cited articles in radiology journals: a comparative bibliometric analysis. **European Radiology**, v. 28, p. 4832-4838, 2018.

BIONAZ, D.; MAROCCO, P.; FERRERO, D.; SUNDSETH, K.; SANTARELLI, M. Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications. **Energy Reports**, v. 8, p. 5080-5092, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.181>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722007363>. Acesso em: 19 mai. 2024.

CHISALITA, D.; PETRESCU, L.; GALUSNYAK, S.C.; CARMOS, C. Environmental evaluation of hydrogen production employing innovative chemical looping technologies – A Romanian case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 32, p. 12112-12128, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922025782>. Acesso em: 19 mai. 2024.

CREMONESE, L.; MBUNGU, G.K.; QUITZOW, R. The sustainability of green hydrogen: An uncertain proposition. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 51, p. 19422-19436, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.350>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923006341>. Acesso em: 19 mai. 2024.

- DUARTE, C. G.; DIBO, A. P. A.; SÁNCHEZ, L. E. What does the academic research say about impact assessment and environmental licensing in Brazil? *Ambient Soc.*, v.20, n.1, p.261–292, 2017.
- GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. Revisão sistemática da literatura: conceitualização, produção e publicação. *Logeion: Filosofia da informação*, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019.
- GONZÁLEZ, Mario Orestes Aguirre. **Processo para Gerenciar a Integração de Clientes no Processo de Desenvolvimento do Produto**. 2010. 242 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- GONZÁLEZ, M. O. A.; DE TOLEDO, J. C. **Customer integration in the product development process: A systematic bibliographic review and themes for research**. *Produção*, v. 22, n. 1, p. 14 26, 2012.
- GUANAWAN, T.A.; WILLIAMSON, I.; RAINE, D.; MONAGHAN, R.F.D. Decarbonising city bus networks in Ireland with renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 57, p. 28870-28886, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.164>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920344104>. Acesso em: 19 mai. 2024.
- HASSAN, Qusay; ALGBURI, Sameer; SAMEEN, Aws; SALMAN, Hayder; JASZCZUR, Marek. Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 50, p. 310-333, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.321>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923045056>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- HERMESMANN, M.; TSIKLIOS, C.; MULLER, T.E. The environmental impact of renewable hydrogen supply chains: Local vs. remote production and long-distance hydrogen transport. *Applied Energy*, v. 351, dec. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121920>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923012849>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- IRENA. (2022a). **World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway**, 2022a.
- IRENA. (2022b). **Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor**, 2022b. Disponível em: <https://www.irena.org/Digital-Report/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation>. Acesso em: 19 mai. 2024.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Green Hydrogen: A guide to policy making**. IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>. Acesso em: 19 mai. 2024.
- JOLAOSO, L.A.; ASADI, J.; DUAN, C.; KAZEMPOOR, P. A novel green hydrogen production using water-energy nexus framework. *Energy Conversion and Management*, v. 276, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116344>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422011220>. Acesso em: 19 mai. 2024.
- KUMAR, Sumit; ARZAGHI, Ehsan; BAALISAMPANG, Til; GARANIYA, Vikram; ABBASSI, Rouzbeh. Insights into decision-making for offshore green hydrogen infrastructure developments. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 174, p. 805-817, jun 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023003543>. Acesso em: 19 mai. 2024.
- LONG, N.V.D.; KIM, G.S.; TRAN, N.N.; LEE, D.Y.; FULCHERI, L.; SONG, Z.; SUNDMACHER, K. LEE, M.; HESSEL, V. Biogas upgrading using ionic liquid [Bmim][PF6] followed by thermal-plasma-assisted renewable hydrogen and solid carbon production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 100, p. 42075-42083, dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.231>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921034819>. Acesso em: 19 mai. 2024.

MACIEL, L.B.B.; VIOLA, L.; LAMAS, W.Q.; SILVEIRA, J.L. Environmental studies of green hydrogen production by electrolytic process: A comparison of the use of electricity from solar PV, wind energy, and hydroelectric plants. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 93, p. 36584-36604, dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.334>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923027519>. Acesso em: 30 jan. 2024.

MAROUANI Ismail; GUESMI, Tawfik; ALSHAMMARI, Badr; ALQUNUN, Khalid; ALZAMIL, Ahmed; ALTURKI, Mansoor; ABDALLAH, Hsan. Integration of Renewable-Energy-Based Green Hydrogen into the Energy Future. **Processes**, v. 11, n. 9, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11092685>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/9/2685>. Acesso em: 19 mai. 2024.

MELO, S.; TOGHYANI, S.; CERDAS, F.; LIU, X.; GAO, X.; LINDNER, L.; BARKE, A.; THIES, C.; SPENGLER, T.S.; HERRMANN, C. Model-based assessment of the environmental impacts of fuel cell systems designed for eVTOLs. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 8, p. 3171-3187, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.083>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922047292>. Acesso em: 19 mai. 2024.

Ministério de Minas e Energia (MME). **PNH2: Plano de trabalho trienal 2023-2025**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>> Acesso em: 19 mai. 2024.

NUNES, João Paulo Costa e Silva. **Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte**. 2020. 219 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

OLABI, A.G.; ABDELKAREEM, M.A.; MAHMOUD, M.S.; ELSAID, K.; OBAIDEEN, K.; REZK, H.; WILBERFORCE, T.; EISA, T.; CHAE, K.; SAYED, E.T. Green hydrogen: Pathways, roadmap, and role in achieving sustainable development goals. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 177, p. 664-687, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.069>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023005670>. Acesso em: 19 mai. 2024.

ONER, Oytun; KHALILPOUR, Kaveh. Evaluation of green hydrogen carriers: A multi-criteria decision analysis tool. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112764>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122006499>. Acesso em: 19 mai. 2024.

Organização das Nações Unidas (ONU). **World Population Prospects**. 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp2019/>. Acesso em: 10 maio 2024.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Paris Agreement**. 2015 Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Sustainable Development Goals**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 19 maio 2024.

OSMAN, A. I., MEHTA, N., ELGARAHY, A. M., HEFNY, M., AL-HINAI, A., AL-MUHTASEB, A. A. H., & Rooney, D. W. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, p. 153-188, out. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01322-8#citeas>. Acesso em: 19 mai. 2024.

SAULNIER, Rain; MINNICH, Keith; STURGEISS, Kim. **Water for the Hydrogen Economy**. 2020. Disponível em: https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy_WaterSMART-Whitepaper_November-2020.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

PALMER, G.; ROBERTS, A.; HOADLEY, A.; DARGAVILLE, R.; HONNERY, D. Life-cycle greenhouse gas emissions and net energy assessment of large-scale hydrogen production via electrolysis and solar PV. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n 10, p. 5113-5131, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1ee01288f>.

Disponível em:

<https://research.monash.edu/en/publications/life-cycle-greenhouse-gas-emissions-and-net-energy-assessment-of->
Acesso em: 19 mai. 2024.

PASTORE, L.M.; BASSO, G.L.; SANTOLI, L. Towards a dramatic reduction in the European Natural Gas consumption: Italy as a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 369, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133377>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622029614>. Acesso em: 19 mai. 2024.

SCHNEIDERS, T.; STADLER, I.; HUNT, J.D.; SCHNEIDER, P.S. **Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional**. 2023. ISBN: 978-65-84854-33-8.

SUSMOZAS Ana; IRIBARREN, Diego; DUFOUR, Javier. Life-Cycle Performance of Hydrogen Production via Biofuel Reforming in Europe. **Resources**, v. 4, n. 2, p. 398-411, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources4020398>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9276/4/2/398>. Acesso em: 19 mai. 2024.

VALVERDE, Jimena; KORAYEM, Amira; TSATSARONIS, George; MOROSUK, Tatiana. "Colors" of hydrogen: Definitions and carbon intensity. **Energy Conversion and Management**. v. 291, p.117294, set. 2023. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006404> Acesso em: 19 mai. 2024.

WEI, Shijie *et al.* Future environmental impacts of global hydrogen production. **Energy & Environmental Science**, 2024.

WEIDNER, Till; TULUS, Victor; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo. Environmental sustainability assessment of large-scale hydrogen production using prospective life cycle analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 22, p. 8310-8327, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922052570>. Acesso em: 19 mai. 2024.

WILLIAMS, C. Research methods. **Journal of Business & Economic Research**, v.5, n. 3, p. 65-72, 2007.

ZAINAL, B. S.; KER, P.J.; MOHAMED, H.; ONG, H.C.; FATTAH, I.M.R.; RAHMAN, S.M.A.; NGHIEM, L.D.; MAHLIA, T.M.I. Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123007992>. Acesso em: 02 mar. 2024.

ZHOU, J.; YU, L.; ZHU, Q.; Huang, C.; YU, Y. Defective and ultrathin NiFe LDH nanosheets decorated on V-doped Ni₃S₂ nanorod arrays: A 3D core-shell electrocatalyst for efficient water oxidation. **Journal of Materials Chemistry A**, [s. l.], v. 7, n. 30, p. 18118–18125, 2019.