

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO FERRAMENTA PARA MEDIR A EFICIÊNCIA AMBIENTAL DO HIDROGÊNIO RENOVÁVEL

A LIFE CYCLE ASSESSMENT AS A TOOL FOR MEASURING THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF RENEWABLE HYDROGEN

Data de aceite: 05/07/2023 | Data de submissão: 03/07/2023

ABREU, Victor Hugo Souza de, Pós-doutorando

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: victor@pet.coppe.ufrj.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2557-2721>

CORALLI, Alberto, Pós-doutorando

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: alberto.coralli@coppe.ufrj.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3010-1342>

PROENÇA, Laís Ferreira Crispino, Pós-doutoranda

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: laiscrispino@poli.ufrj.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1508-3833>

SANTOS, Andrea Souza, Doutora

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, E-mail: andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-6313>

RESUMO:

O hidrogênio renovável tem ganhado destaque no cenário atual de transição energética global devido ao seu potencial de ser utilizado como matéria-prima, combustível ou transportador e armazenador de energia limpa, para equilibrar o fornecimento e a demanda de eletricidade. No entanto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) do hidrogênio renovável é necessária para quantificar as possíveis reduções de impactos ambientais de sua implementação em larga escala, inclusive em comparação com as tecnologias existentes. Dessa forma, este estudo aplica uma revisão sistemática com abordagem bibliométrica de estudos sobre a ACV aplicada ao hidrogênio renovável. Os resultados mostram que os estudos sobre a temática são bem atuais e apresentam diversas aplicações práticas, que são limitadas por disponibilidade de dados e generalizações de informação.

PALAVRAS-CHAVE:

Hidrogênio Renovável. Avaliação do Ciclo de Vida. Revisão Sistemática. Abordagem Bibliométrica.

ABSTRACT:

Renewable hydrogen has gained a prominent position in the current global energy transition landscape due to its potential to be used as a raw material, fuel, or clean energy carrier and storage solution to balance electricity supply and demand. However, Life Cycle Assessment (LCA) of renewable hydrogen is necessary to quantify the potential reductions of environmental impacts of its large-scale implementation, including in comparison to existing technologies. Thus, this paper applies a systematic review with a bibliometric approach of studies on LCA applied to green hydrogen. The results show that studies on the subject are very current and present several practical applications, which are limited by data availability and information generalizations.

KEYWORDS:

Renewable Hydrogen. Life Cycle Assessment. Systematic Review. Bibliometric Approach.

1. INTRODUÇÃO

A implementação em larga escala de fontes de energia renovável está sendo impulsionada pela proposta de metas de carbono neutro em vários países, pelo aprofundamento da ação global sobre a mudança climática e pela aceleração da recuperação da economia verde na era pós-Covid (SANTOS *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2022).

Segundo Gulotta *et al.* (2022), um dos principais obstáculos que têm impedido a ampla aplicação das fontes renováveis de energia, tais como a solar fotovoltaica e eólica é sua natureza intermitente. Além disso, o transporte de energia de longa distância doméstico e/ou internacional é outra barreira importante que deve ser enfrentada ao optar por uma fonte de energia mais econômica e ambientalmente correta (AKHTAR, DICKSON & LIU, 2021).

Dessa maneira, todas essas questões exigem sistemas de armazenamento e transporte de energia de alta eficiência acoplados às fontes renováveis (WANG *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2019). Vale ainda ressaltar que os setores da economia que mais contribuem para as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) são o transporte e a indústria, porque usam majoritariamente combustíveis fósseis ou são não eletrificáveis (IEA, 2021; EPE, 2022).

Nesse sentido, o uso do hidrogênio como vetor energético permite a renovabilidade desses setores por meio do conceito *Power-to-X* (CHEHADE *et al.*, 2019). Embora o hidrogênio seja geralmente considerado como um combustível limpo durante sua fase de uso (combustão direta ou uso em células de combustível), sua produção tem impactos negativos sobre o meio ambiente. (BHANDARI, TRUDEWIND & ZAPP, 2014). Portanto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificação da carga ambiental é gradualmente reconhecida pela indústria e academia para avaliar a tecnologia do hidrogênio e apoiar a tomada de decisões (LIU *et al.*, 2022).

Neste sentido, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática com abordagem bibliométrica sobre estudos que tratam da ACV do hidrogênio renovável, coletados por meio de buscas diretas na base de dados do *Web of Science*, que apresenta alcance e cobertura satisfatórios.

2. EFICIÊNCIA AMBIENTAL DO HIDROGÊNIO RENOVÁVEL

A construção de um sistema de produção e distribuição de hidrogênio, que apresenta maior poder calorífico e menores emissões de carbono do que os combustíveis fósseis (CHANBURANASIRI *et al.*, 2011; CHU *et al.*, 2015; LAL & YOU, 2023), tornou-se gradualmente um consenso global (SANTOS *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2022; WEIDNER, TULUS & GUILLÉN-GOSÁLBEZ, 2022; CAPURSO *et al.*, 2022; OLIVEIRA, 2022).

O hidrogênio pode ser usado como matéria-prima, combustível ou transportador e armazenador de energia para equilibrar a oferta e demanda de eletricidade (EUROPEAN COMMISSION, 2019; PROENÇA *et al.*, 2023), fazendo com que, globalmente, a demanda de H² possa ultrapassar US\$ 12 trilhões - equivalente a R\$ 62,56 trilhões - em 2050 (ONI *et al.*, 2022). Cabe destacar, entretanto, que a energia do hidrogênio geralmente é uma energia secundária, que precisa consumir energia primária para sua preparação, ou seja, o hidrogênio usualmente não é uma fonte de energia, mas um vetor energético, transportador de energia química, (BHANDARI, TRUDEWIND & ZAPP, 2014; OKONKWO *et al.*, 2021).

À medida que vários países implementam metas de neutralidade de carbono, o setor reconhece cada vez mais a necessidade de definir quantitativamente diferentes métodos de produção de hidrogênio com base nas emissões de GEE em todo o ciclo de vida (LIU *et al.*, 2022).

A pesquisa constatou mediante revisão bibliográfica que a maior parte da produção atual de hidrogênio está dividida principalmente em três categorias, que são: (i) de origem renovável, denominado em muitos casos de hidrogênio verde; (ii) de origem fóssil com Carbon Capture and Storage - CCS/ *Carbon Capture, Utilisation and Storage* - CCUS; e (iii) de origem fóssil.

A fim de promover o desenvolvimento do mercado de hidrogênio limpo, os padrões de hidrogênio renovável têm sido discutidos em nível global (BHANDARI, TRUDEWIND & ZAPP, 2014; LIU *et al.*, 2022). O hidrogênio renovável não é produzido por combustíveis fósseis, representando uma melhor resolução a longo prazo para a economia descarbonizadora em diferentes setores (GULOTTA *et al.*, 2022).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O crescente número de políticas focadas na redução das emissões de GEE e no consumo de combustíveis fósseis, têm-se desenvolvido diversos estudos sobre a implementação de energias renováveis na produção do hidrogênio (GULOTTA *et al.*, 2022). Dessa forma, este estudo busca desenvolver uma revisão bibliográfica de artigos científicos recentes para analisar os aspectos bibliométricos, técnicos e metodológicos dos estudos sobre ACV aplicados ao hidrogênio renovável, por meio de um protocolo de revisão sistemática sólido para alcançar consistência, robustez e transparência na pesquisa.

Para ampliar a compreensão sobre a metodologia adotada na busca e seleção dos estudos, foram estabelecidos critérios específicos para a inclusão e qualificação dos artigos na revisão sistemática. O Quadro 1 apresenta em detalhes as informações sobre os termos utilizados, os critérios de inclusão e qualificação, bem como os procedimentos adotados para a busca e extração dos dados.

Para garantir a abrangência da pesquisa, foram utilizadas palavras-chave relevantes relacionadas ao tema em questão, que foram inseridas nos títulos, resumos e palavras-chave dos estudos selecionados. A sigla "TS" na tabela refere-se ao termo de busca utilizado, denominado "Tópico", que serviu para identificar os estudos relevantes na base de dados.

Quadro 1: Descrição das Estratégias de Buscas.

Critério	Descrição
Tópicos	<i>TS = ('Life cycle' AND "Renewable Hydrogen") OR TS=('Life cycle' AND "Green Hydrogen")</i>
Indexes	SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI
Inclusão	(I) Tempo de cobertura: todos os anos da base de dados (1945 – 2023); (II) Enquadramento com o objetivo proposto; (III) Fator de impacto do periódico; e (IV) Tipos de documentos: todos os tipos.
Qualificação	(I) A pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica bem fundamentada? (II) O estudo apresenta inovação técnica? (III) As contribuições são discutidas? (IV) As limitações são explicitamente declaradas? e (V) Os resultados e conclusões são consistentes com os objetivos pré-estabelecidos?
Data da Procura	10 de fevereiro de 2023, às 10h00min.

Fonte: Autores.

Para escolha do tópico de pesquisa, considerou-se adequado utilizar os termos as variações do termo em inglês '*Life cycle*' (ou seja, este booleano permite que tenham incluídas palavras-chave como '*Life Cycle Assessment*', '*Life Cycle Cost*' e '*Life Cycle Impact*') e os termos '*Renewable Hydrogen*' e '*Green Hydrogen*', que apesar de simples e intuitivo, fornece bons resultados para a coleta de dados. Cabe mencionar que a escolha do termo em inglês, em detrimento a outras línguas, como o próprio português, origina-se do fato de que a maioria dos estudos de prestígio publicados internacionalmente são desenvolvidos em inglês. Além disso, na maior parte das vezes, mesmo os estudos publicados em outras línguas possuem o Abstract em língua inglesa.

Salienta-se ainda que decidiu-se utilizar os bancos de dados do *Web of Science*, pertencentes ao *Clarivate Analytics*, como principal ferramenta de busca devido à sua difusão na comunidade acadêmica e à confiabilidade de seus padrões de seleção (AMEEN *et al.*, 2018). Além disso, essa base de dados apresenta alcance e cobertura satisfatórios (CHEN, 2010), atendendo aos requisitos desta pesquisa.

Outro aspecto que precisa ser mencionado é que, enquanto os critérios de inclusão servem principalmente para uma triagem mais superficial do estudo, até mesmo porque consideram aspectos relacionados ao ano, tipo de estudo e revista de

publicação, os critérios de qualificação são utilizados para uma triagem mais profunda dos estudos, analisando aspectos de aplicabilidade e qualidade, os quais só são possíveis de determinar por meio de análise e leitura mais específica dos estudos. Com o tratamento da base de dados, foram incluídos 158 estudos.

Após a coleta e organização dos dados necessários, a etapa seguinte consistiu na realização das análises bibliométricas e sistemáticas. Essa fase é crucial para a compreensão do panorama geral do tema em questão e permite identificar tendências e lacunas no conhecimento disponível. As análises bibliométricas foram realizadas a partir das informações obtidas diretamente das bases de dados utilizadas na pesquisa. Nesse processo, foram analisados aspectos como o número de publicações ao longo dos anos, as principais revistas que publicam sobre o assunto, os autores mais citados e os principais temas abordados. Já as análises sistemáticas demandaram uma investigação mais aprofundada de cada estudo identificado durante a busca bibliográfica. Nessa etapa, foram avaliados aspectos como a qualidade metodológica dos estudos, as principais conclusões alcançadas, as lacunas no conhecimento e as perspectivas futuras de pesquisa.

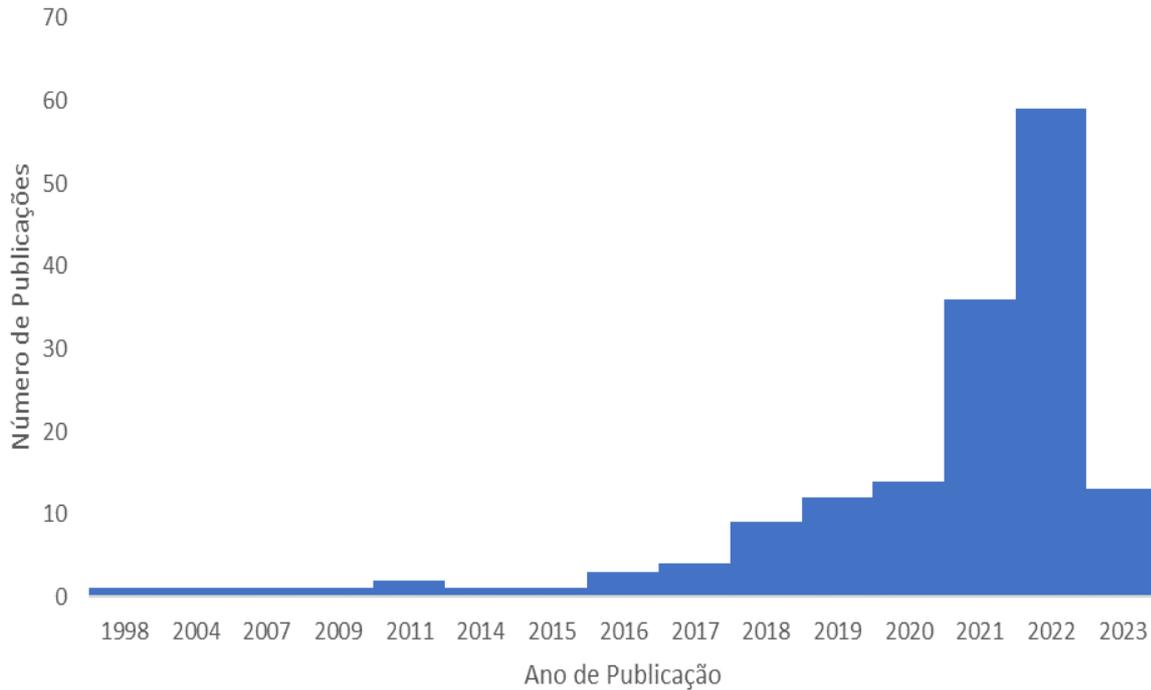
É importante ressaltar que as análises sistemáticas são fundamentais para a identificação de lacunas no conhecimento disponível sobre o tema em questão. Por meio dessa abordagem, é possível identificar quais são as áreas em que ainda há pouca produção científica e, assim, orientar futuras pesquisas nessa direção. Em resumo, a combinação das análises bibliométricas e sistemáticas permite uma compreensão mais completa e aprofundada do tema em questão, auxiliando na elaboração de conclusões robustas e na identificação de possíveis direções para a pesquisa futura.

4. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

Após a realização da busca na base de dados *Web of Science* e a aplicação dos critérios de inclusão e qualificação, foi constatado que 158 publicações atenderam aos requisitos estabelecidos para a inclusão no repositório de pesquisa. Esse número reflete a relevância e a importância do tema da avaliação do ciclo de vida do hidrogênio renovável na literatura científica atual.

A Figura 1 apresenta a evolução das publicações sobre o tema ao longo dos anos. Essa análise é fundamental para avaliar o nível de expansão da temática, bem como as novas oportunidades de estudos. Na Figura 1, verifica-se que a primeira publicação foi registrada em 1998; entretanto, apenas a partir de 2014, foram registradas publicações consecutivas, ou seja, existiram publicações para todos os anos após esta data. Além disso, cabe destacar que os 5 últimos anos correspondem a 85% das publicações com destaque para o ano de 2022, com 59 publicações.

Figura 1: Evolução das publicações por ano.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Torna-se também pertinente avaliar os artigos por periódico de publicação, de modo a identificar quais são as revistas que mais se interessam pelo assunto, bem como o fator de impacto de cada uma delas. Isso permite que pesquisadores direcionem seus esforços de publicação para periódicos que possuem foco direto no assunto estudado, evitando submissões sem direcionamento e perdas consideráveis de tempo. Cabe destacar que isto é especialmente importante para assuntos novos, que apresentam grupos de especialistas ainda em formação.

A Tabela 1 apresenta os periódicos com volume de publicações maior que 3, em que P (Publicações) refere-se à quantidade de artigos publicados no periódico sobre a área de interesse investigada e FI (Fator de Impacto) avalia a importância de periódicos científicos em suas respectivas áreas. É importante destacar que os valores apresentados na Coluna FI correspondem ao ano de 2021 e FI média a média dos últimos 5 FI de cada periódico.

Tabela 1: Principais periódicos.

Periódico	P	FI	FI média
<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	33	7,139	6,2
<i>Journal of Cleaner Production</i>	14	11,072	11,016
<i>Energies</i>	8	3,252	3,333
<i>Sustainability</i>	8	3,889	4,089
<i>Energy Conversion and Management</i>	6	11,533	10,818
<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	6	16,799	17,551
<i>Energy & Environmental Science</i>	5	39,714	39,151
<i>Science Of The Total Environment</i>	5	10,754	10,237

Fonte: Elaborado pelos autores.

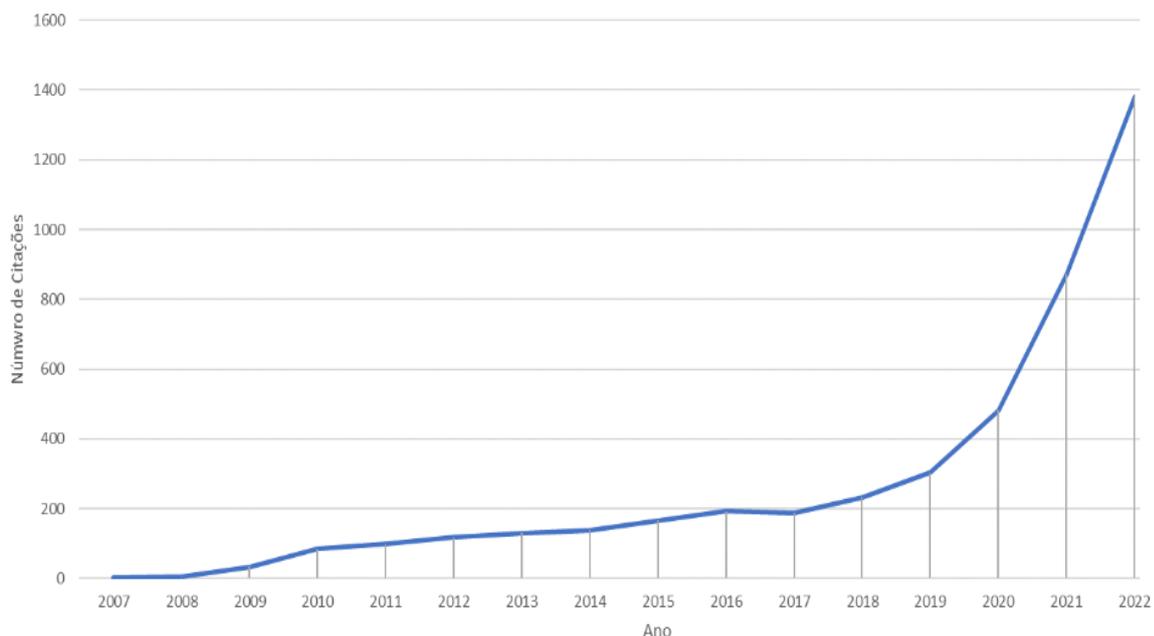
Por meio da rede de interligação entre as palavras-chave é possível visualizar a relação entre os conceitos e as suas interconexões, permitindo uma compreensão mais profunda do campo de estudo. Essa estratégia permite que pesquisadores encontrem mais facilmente estudos diretamente relacionados ao assunto investigado, bem como identifiquem novos rumos de pesquisa que podem ser tomados, o que é fundamental para o avanço do conhecimento na área. Além disso, a identificação de novos conceitos e temas emergentes pode indicar áreas de pesquisa promissoras e apontar possíveis oportunidades de desenvolvimento de pesquisas futuras.

Na Figura 2 ainda é possível perceber palavras-chave mais intuitivas sobre o assunto, em virtude dos termos de busca utilizados, como avaliação do ciclo de vida (do inglês, '*life-cycle assessment*'); energia (do inglês, '*energy*') e hidrogênio verde (do inglês, '*green hydrogen*'). Além disso, é possível encontrar outras palavras-chave interessantes como eletrólise da água (do inglês, '*water electrolysis*'), biomassa (do inglês, '*biomass*'), biogás (do inglês, '*biogas*'), gás natural sintético (do inglês, '*synthetic natural gas*') e metano (do inglês, '*methane*').

Outra análise importante refere-se ao número de citações por ano, conforme apresentado na Figura 3. Essa análise permite identificar o crescimento de interesse sobre o tema ao longo dos anos e a evolução das publicações científicas. Com isso, é possível compreender como o assunto tem sido abordado pela comunidade acadêmica e científica, além de apontar possíveis lacunas ou áreas que necessitam de maior aprofundamento.

Com a Figura 3, observa-se que a primeira citação ocorreu no ano de 2007, 9 anos após a primeira publicação, e que o número de citações cresceu com o passar dos anos, atingindo o ápice de citações no ano de 2022 com 1.381, que corresponde a 30% do total de citações. Esses dados mostram, mais uma vez, que o interesse pelo assunto continua em expansão, o comprova a relevância deste artigo para o estudo sobre a ACV do hidrogênio renovável.

Figura 3: Evolução das citações por ano.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5. RESULTADOS SISTEMÁTICOS

O hidrogênio renovável pode desempenhar um papel crítico no cumprimento das demandas globais de energia, ao mesmo tempo em que adere às regulamentações ambientais (AKHTAR, DICKSON & LIU, 2021; PROENÇA *et al.*, 2023). As emissões da produção e uso de hidrogênio como combustível tornam-se dependentes não do tipo de uso ou da tecnologia de produção, mas das fontes primárias que estão sendo utilizadas para gerar o hidrogênio (WALKER, FOWLER & AHMADI, 2015).

Desta forma, uma crescente quantidade de estudos tem sido desenvolvida com o objetivo de verificar os ganhos ambientais e na saúde humana e até mesmo econômicos da introdução em larga escala de hidrogênio de origem renovável produzido a partir de diferentes tipos de fontes energéticas, em comparação a outras opções de combustíveis, incluindo hidrogênio produzido a partir de fontes puramente fósseis, conforme exemplos destacados no Quadro 2.

Quadro 2: Resultados encontrados em estudos sobre a ACR do hidrogênio renovável.

Referência	Objetivo	Resultados
AKHTAR, DICKSON & LIU (2021)	Realizou-se uma avaliação abrangente do ciclo de vida do berço ao portão para sete vias de fornecimento de hidrogênio: (i) gás comprimido via gasoduto (CGH2-PL), (ii) gás comprimido via reboque tubular (CGH2-TT), (iii) hidrogênio líquido (LH2), (iv) portador de hidrogênio orgânico líquido com gás natural como fonte de aquecimento (LOHC), (v) amônia líquida (LNH3), (vi) portador de hidrogênio orgânico líquido com hidrogênio como fonte de aquecimento (LOHC-Own), e (vii) a utilização direta do NH3 em veículo de célula combustível de amônia direta (LNH3-DAFCV).	De acordo com os resultados da ACV, o CGH2-PL foi identificado como a alternativa mais sustentável em comparação com outras opções avaliadas. Isso se deve ao seu menor potencial de aquecimento global (GWP) de apenas 1,57 kgCO ₂ -eq/kgH ₂ . Em contrapartida, a entrega por meio de LOHC apresentou os piores resultados, com emissões mais altas de 3,58 kgCO ₂ -eq/kgH ₂ .
WEIDNER, TULUS & GUILLÉN-GOSÁLBEZ (2022)	Foi realizada uma análise prospectiva do ciclo de vida com o objetivo de comparar diferentes opções para a produção de 500 Mt/ano de hidrogênio. A análise incluiu cenários que levaram em consideração possíveis mudanças nas cadeias de suprimentos futuras. Além disso, os impactos ambientais e na saúde humana decorrentes desses níveis de produção foram contextualizados em relação à estrutura dos Limites Planetários. Esses limites definem até onde o desenvolvimento humano pode chegar sem afetar irreversivelmente a capacidade regenerativa da Terra. A análise também considerou os impactos na saúde humana, os efeitos na	Os resultados indicam que os impactos da mudança climática dos níveis de produção projetados são 3,3-5,4 vezes maiores do que os limites planetários alocados, com apenas o hidrogênio renovável da energia eólica permanecendo abaixo dos limites. Os impactos na saúde humana e outros impactos ambientais são menos severos em comparação, mas o esgotamento de metais e os impactos da ecotoxicidade do hidrogênio renovável merecem mais atenção. Os danos ambientais causados pelos preços aumentam mais fortemente o custo do hidrogênio azul (de ~2 a ~5 USD/kg de hidrogênio), enquanto tais custos reais caem mais fortemente para o hidrogênio renovável da energia solar fotovoltaica (de ~7 a ~3 USD/kg de

Referência	Objetivo	Resultados
	economia mundial e os custos de produção com preços externos que incorporam o impacto ambiental.	hidrogênio) quando se aplica uma análise prospectiva do ciclo de vida.
CHIRONE <i>et al.</i> (2022)	Neste artigo, um novo layout de sistema para a produção catalítica de metano foi combinado com uma unidade de <i>looping</i> de cálcio para a captura de CO ₂ dos gases de combustão de uma usina elétrica alimentada a carvão, e com um eletrolítico de água sustentado por energia renovável.	A partir dos resultados da análise tecn-econômica, foi constatado que o custo de produção do metano é superior ao do gás natural (0,66 vs 0,17 euros/Nm ³), mas inferior ao do biometano (1 euro/Nm ³). O eletrolisador PEM tem o maior impacto sobre esses custos. Por sua vez, a análise da ACV revelou um desempenho ambiental que é superior em algumas categorias, mas inferior em outras, quando comparado com os cenários tradicionais. Nesse sentido, mais uma vez, o eletrolisador PEM é identificado como responsável pela maior parte dos impactos ambientais do processo.
CHEN & LAM (2022)	Aplicou-se uma ACV para avaliar o impacto ambiental de dois sistemas de energia em rebocadores. Nesse sentido, compara-se: (i) células a combustível de hidrogênio - combinação de hidrogênio produzido de diferentes fontes, que contém 96,5% de hidrogênio cinza da reforma do gás natural e 3,5% de hidrogênio renovável da eletrólise da água; e (ii) motores a diesel.	Os resultados indicam um potencial evidente de redução no aquecimento global (83,9-85%), acidificação (45%), eutrofização (54%) e oxidação fotoquímica (50%) ao adotar o hidrogênio. Especificamente, o rebocador movido a hidrogênio pode reduzir até 48.552.160 kg CO ₂ equivalente ao aquecimento global, 51.930 kg SO ₂ equivalente à acidificação, 11.476 kg PO ₄ - equivalente à eutrofização, e 2.629 kg C ₂ H ₄ equivalente à oxidação fotoquímica em comparação com o rebocador a diesel.
ZHANG <i>et al.</i> (2022)	Realizou-se uma avaliação abrangente do ciclo de vida para três métodos de produção de hidrogênio por energia solar: (i) produção de hidrogênio por eletrólise de membrana eletrolítica polímera (do inglês, <i>polymer electrolyte membrane</i> - PEM, em inglês) de água acoplada à geração de energia fototérmica; (ii) produção de hidrogênio por eletrólise de membrana eletrolítica polímera de água acoplada à geração de energia fotovoltaica; e (iii) produção de hidrogênio por método de divisão termoquímica de água utilizando a tecnologia fototérmica solar acoplada ao Ciclo S-I.	Após conduzir uma análise quantitativa dos três métodos com os fatores ambientais sendo considerados, foi tirada uma conclusão: O potencial de aquecimento global e o potencial de acidificação da divisão termoquímica da água pelo acoplamento do Ciclo S-I à tecnologia solar fototérmica são 1,02 kg CO ₂ -eq e 6,56E-3 kg SO ₂ -eq. E este método tem vantagens significativas no impacto ambiental do ecossistema como um todo.
JANG <i>et al.</i> (2022)	Investigou-se a viabilidade das células de combustível de hidrogênio como solução sustentável para transporte marítimo, considerando ciclo de vida. Avaliaram-se impactos ambientais de métodos de produção de hidrogênio, como reforma a vapor, gaseificação de carvão, craqueamento de metanol e eletrólise eólica. Consideraram-se	Os processos de reforma do metano a vapor e de gaseificação do carvão foram considerados como tendo o maior potencial ambiental ao longo de sua vida útil. No entanto, este documento aponta que a reforma do metano a vapor poderia fazer melhores méritos de ciclo de vida do que os produtos convencionais a diesel ou GNL, se os

Referência	Objetivo	Resultados
	três tipos de células de combustível: membrana de troca de prótons, carbonato fundido e óxido sólido.	caminhos de produção forem propostos adequadamente. Além disso, ao utilizar o GNL como fonte primária de combustível para as células de combustível, descobriu-se que a fase upstream do GNL produziria cerca de 100 vezes mais emissões do que a fase <i>downstream</i> .
ZHAO <i>et al.</i> (2019)	Este artigo implementa a análise do custo do ciclo de vida da produção de hidrogênio por PEM e aplicações para fins de eletricidade e mobilidade. Cinco cenários são desenvolvidos para comparar o custo das aplicações de hidrogênio com as fontes de energia convencionais, considerando o custo de emissão de CO ₂ .	As comparações mostram que o custo do uso do hidrogênio para fins energéticos ainda é maior do que o custo do uso de combustíveis fósseis. O maior contribuinte do custo é o consumo de eletricidade. Na análise de sensibilidade, suportes políticos como a tarifa de alimentação (FITs) poderiam trazer complementos de hidrogênio com combustíveis fósseis no mercado energético atual.
GERLOFF (2021)	Os impactos ambientais potenciais de uma produção de hidrogênio renovável foram analisados levando em conta as três tecnologias mais importantes de eletrólise de água: eletrólise alcalina (AEC), membrana eletrolítica de polímero (PEMEC) e célula de eletrólise de óxido sólido (SOEC). O estudo mostra como o potencial de CO ₂ -eq. de uma produção de hidrogênio mais verde muda ao aplicar os diferentes cenários energéticos para cada tecnologia.	Os resultados mostram que o CO ₂ -eq. diminui com maior participação de energia eólica e solar, reduzindo as energias fósseis. Além disso, a Tecnologia SOEC tem menor emissão de CO ₂ -eq. em cenários de 2019, 2030 e 2050, aplicando-se também à tecnologia AEC em cenário de Energias Renováveis. Apenas o cenário de Energia Renovável, com eólica e solar, tem resultados mais baixos comparando produção de hidrogênio convencional e alternativas. Assim, apenas esse cenário é adequado para produção e uso ambientalmente corretos de hidrogênio, reduzindo emissões de CO ₂ . A tecnologia SOEC tem menores impactos ambientais em cenários de 2019 e 2030, considerando indicadores LCIA, aplicando-se também à tecnologia PEMEC em cenário de 2050 e RE.

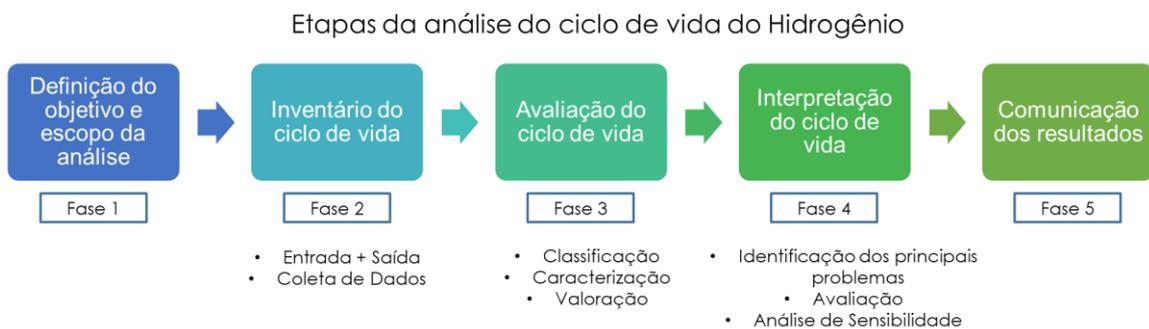
Referência	Objetivo	Resultados
PALMER <i>et al.</i> (2021)	Estudos de avaliação de ciclo de vida/análise de energia líquida de hidrogênio renovável geralmente incluem suposições simplificadoras, como operação em estado estacionário sob condições médias. Embora simplificações possam ser necessárias para a análise preliminar, diferenças marcantes decorrentes de variações específicas do contexto e restrições operacionais podem ser negligenciadas. Para resolver essa lacuna, o estudo realiza uma avaliação do ciclo de vida/análise de energia líquida de uma hipotética usina de eletrólise solar em larga escala, com foco nas sensibilidades operacionais.	Os resultados mostram que a interrupção do eletrolisador e a necessidade de amortecer a eletricidade solar afetam significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Em condições normais, as emissões de GEE são cerca de um quarto do processo dominante atual, o <i>steam methane reforming</i> (SMR) para produção de hidrogênio. No entanto, a análise de sensibilidade revela que as emissões de GEE podem ser comparáveis às de SMR em condições antecipadas. Os resultados de energia líquida são inferiores aos dos combustíveis fósseis e incertos o suficiente para requerer mais atenção. Recomenda-se integrar a avaliação do ciclo de vida e a análise de energia líquida no planejamento do projeto para garantir que o hidrogênio atenda aos objetivos de produção verde.
IANNUZZI, HILBERT & LORA (2021)	O objetivo deste artigo é construir a primeira comparação de ACV, desde a extração da matéria-prima até o seu consumo como combustível, entre os ônibus com motor de combustão interna atualmente utilizados na cidade de Rosário, Província de Santa Fé, Argentina, e algumas alternativas tecnológicas e suas variantes com foco em ônibus com um motor elétrico movido a hidrogênio (hidrogênio renovável e de origem fóssil) comprimido que alimenta células de combustível de PEM.	Os resultados mostram que os ônibus cujo combustível seria o hidrogênio renovável atendem a um dos principais critérios de sustentabilidade dos biocombustíveis da União Europeia levados em consideração no Diretiva de Energia Renovável (RED) 2009/28 e Diretiva RED da UE 2018/2001 que precisam de redução significativa nos GEE líquidos de matéria-prima de origem de biomassa respeitam combustíveis fósseis: pelo menos 70% dos GEE seriam evitadas, no pior e atual cenário do fator de emissão da rede elétrica da Argentina no ponto de uso que é de cerca de 0,40 kg CO ₂ eq/kWh com energia e carga ambiental de 100% em o fator de alocação na etapa de produção de hidrogênio da ACV.
VALENTE, IRIBARREN & DUFOUR (2017)	Este trabalho realiza uma revisão completa da literatura sobre as escolhas metodológicas feitas em estudos de ACV de sistemas de energia de hidrogênio. Com base no processo de produção de hidrogênio, esses estudos de caso são classificados em três categorias tecnológicas: termoquímica, eletroquímica e biológica.	A maioria dos sistemas de energia de hidrogênio aplica limites berço/portão a portão, enquanto os limites berço/portão ao túmulo são encontrados principalmente para uso de hidrogênio em mobilidade. A unidade funcional geralmente é baseada em massa ou energia para estudos berço/portão a portão e distância percorrida para estudos berço/portão ao túmulo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

6. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A ACV, conforme esquema básico apresentado na Figura 4, é fundamental para determinar os impactos ambientais do hidrogênio renovável. No entanto, os impactos climáticos estimados das diversas rotas de produção de hidrogênio apresentam uma ampla variação na literatura de ACV, o que pode dificultar a escolha da melhor opção em termos de hidrogênio de baixa emissão pelos responsáveis pela formulação de políticas, investidores e consumidores (DE KLEIJNE et al., 2022). Nesse sentido, recentemente, foram criados protocolos de harmonização para a avaliação do ciclo de vida comparativa de sistemas de energia do hidrogênio, com o objetivo de evitar conclusões equivocadas em relação à pegada de carbono e à demanda acumulada de energia (VALENTE, IRIBARREN & DUFOUR, 2019).

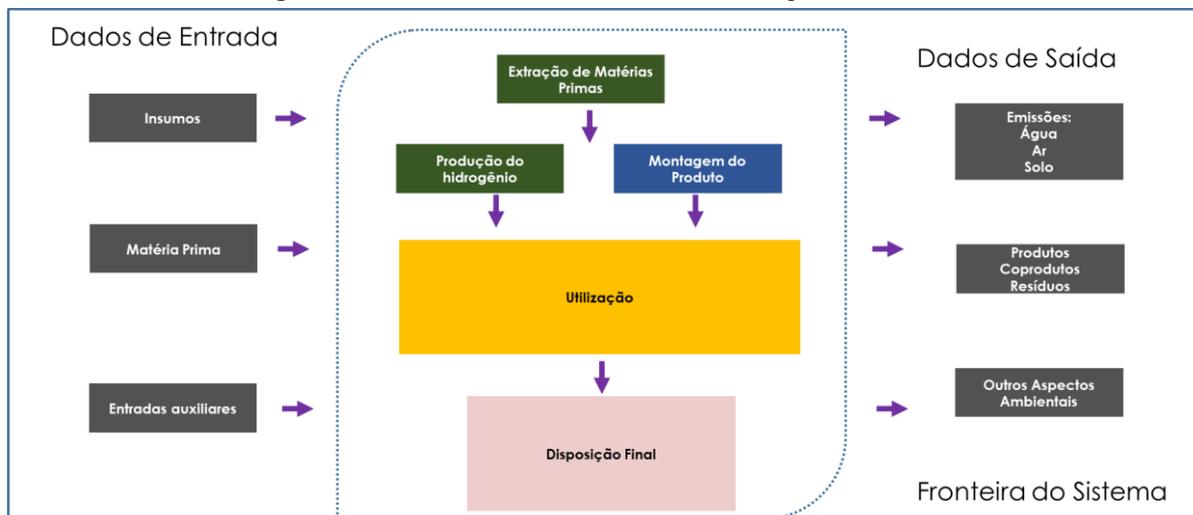
Figura 4: Esquema de aplicação do ACV.



Fonte: Elaborado pelos autores

É importante também destacar que a precisão dos resultados depende fortemente da qualidade dos dados utilizados na análise, conforme também relatado por Valente, Iribarren & Dufour (2017). Infelizmente, nem sempre é fácil obter dados confiáveis e representativos do sistema analisado. Desta forma, faz-se necessário desenvolver um bom Inventário do ciclo de vida do hidrogênio renovável, conforme raciocínios apresentados na Figura 5.

Figura 5: Inventário do ciclo de vida do hidrogênio renovável.



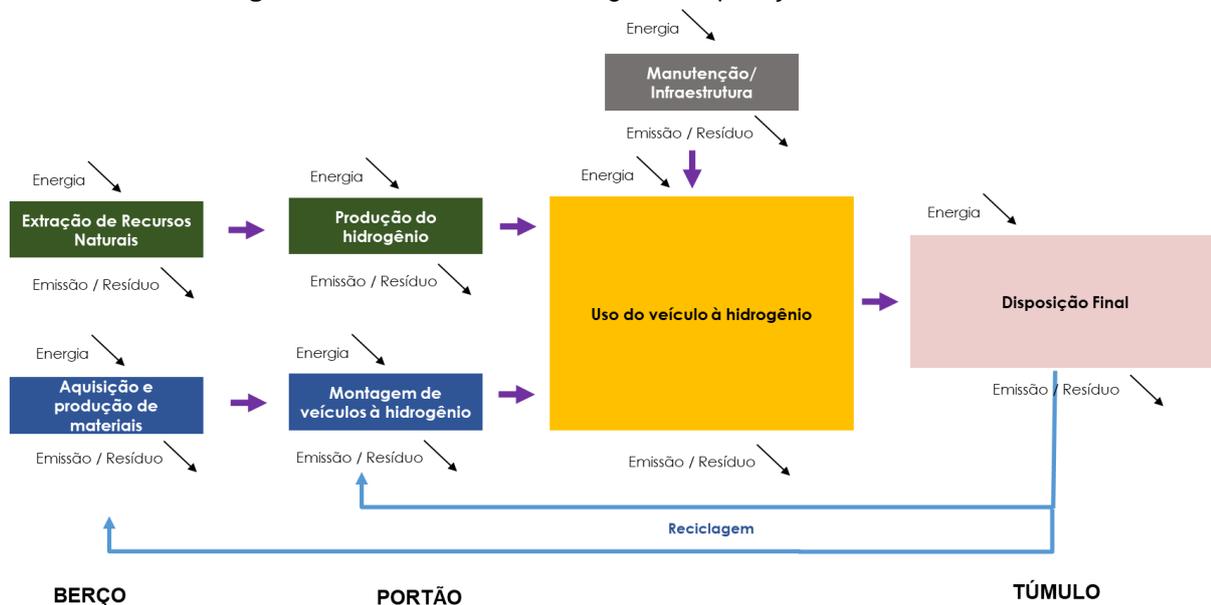
Fonte: Baseado em Campos (2012).

Além disso, os modelos usados para calcular a ACV podem conter várias incertezas que podem afetar os resultados. Por isso, é fundamental que sejam conduzidas análises de sensibilidade para testar a influência desses parâmetros incertos e que sejam priorizadas pesquisas adicionais para melhorar a precisão e a confiabilidade da ACV do hidrogênio renovável (GULOTTA *et al.*, 2022).

A comunicação adequada da incerteza e qualidade dos dados é fundamental para garantir a credibilidade e transparência dos estudos de ciclo de vida. É importante lembrar que a ACV é uma ferramenta que lida com muitos dados e informações, e, por isso, é comum que existam incertezas nos resultados. No entanto, essas incertezas precisam ser relatadas de forma clara e precisa para que os pesquisadores possam compreender a confiabilidade dos resultados e, assim, tomar decisões mais informadas (VALENTE, IRIBARREN & DUFOUR, 2017). Torna-se também essencial que os estudos de ACV sejam bem interpretados, especialmente por profissionais não especializados na área. Muitas vezes, a interpretação inadequada dos resultados pode levar a conclusões equivocadas e ações inapropriadas. Por isso, é importante que os pesquisadores sejam claros ao comunicar seus resultados e discutam suas limitações, de forma a evitar interpretações errôneas (GAVANKAR, ANDERSON & KELLER, 2015).

Além disso, muitos pesquisadores destacam que é importante avaliar os impactos ambientais do hidrogênio renovável ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima (berço) até a disposição final dos resíduos (túmulo). Neste sentido, um esquema básico aplicado ao setor de mobilidade encontra-se apresentado na Figura 6.

Figura 6: Ciclo de vida do Hidrogênio – aplicação em mobilidade.



Fonte: Baseado em Vaughan, Faghri & Li (2016).

No entanto, em muitos casos, os resultados das análises da ACV são apresentados com indicadores de agrupamento e ponderação, o que dificulta a identificação dos principais pontos quentes dos estudos (GULOTTA *et al.*, 2022). Dessa forma, é fundamental que a comunidade científica seja capaz de avaliar a contribuição relativa de cada etapa do ciclo de vida do hidrogênio renovável, a fim de identificar

áreas em que a eficiência e a sustentabilidade podem ser melhoradas. Para isso, é necessário obter dados precisos e confiáveis e desenvolver modelos que possam avaliar adequadamente os impactos ambientais do hidrogênio renovável. Essas informações são essenciais para orientar a tomada de decisões informadas e conscientes sobre o uso do hidrogênio renovável como uma alternativa energética mais limpa e sustentável.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo desenvolver uma revisão sistemática da literatura com abordagem bibliométrica sobre a Análise do Ciclo de Vida (ACV) do hidrogênio renovável. Os resultados bibliométricos mostram que o assunto é extremamente atual com diversas oportunidades de estudos, sendo inclusive publicados em importantes periódicos internacionais como o *Energy & Environmental Science*, o *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, e o *Energy Conversion and Management*.

Além disso, as análises sistemáticas indicam que se têm desenvolvido ACV para comparar o desempenho ambiental do hidrogênio renovável, tanto em relação ao combustível fóssil, quanto ao hidrogênio obtido de fontes não renováveis e os resultados mostram resultados bem satisfatórios do desempenho do hidrogênio renovável, mas o esgotamento de metais e os impactos da ecotoxicidade desse tipo de hidrogênio merecem mais atenção. Além disso, sugere-se que ainda precisam ser elaborados mais estudos utilizando dados completos e confiáveis, que representem adequadamente o sistema analisado.

Por fim, é importante destacar que a qualidade dos dados utilizados na ACV é fundamental para garantir a precisão dos resultados. Dessa forma, é fundamental que os pesquisadores tenham acesso a dados completos e confiáveis, que representem de forma adequada o sistema analisado. Caso contrário, a confiabilidade dos resultados pode ser comprometida, e os estudos de ACV podem não cumprir seu papel de auxiliar na tomada de decisões mais sustentáveis.

Com a crescente importância do uso de ACV no setor de hidrogênio renovável, é essencial que novos estudos sejam realizados para explorar sua aplicação em setores específicos, como transporte e indústria, além de tipos específicos de produção de hidrogênio renovável, como as tecnologias eletrolíticas. Esses estudos podem fornecer insights valiosos sobre o impacto ambiental dessas atividades e ajudar a orientar políticas públicas e estratégias de negócios para uma transição sustentável. Portanto, é aconselhável que pesquisadores continuem a desenvolver revisões sistemáticas para explorar a aplicação do ACV nesses contextos específicos e estudos de caso.

REFERÊNCIAS

AKHTAR, Malik Sajawal; DICKSON, Rofice; LIU, J. Jay. **Life cycle assessment of inland green hydrogen supply chain networks with current challenges and future prospects**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 9, n. 50, p. 17152-17163, 2021.

AMEEN, Wadea *et al.* **An overview of selective laser sintering and melting research using bibliometric indicators.** *Virtual and Physical Prototyping*, v. 13, n. 4, p. 282-291, 2018.

BHANDARI, Ramchandra; TRUDEWIND, Clemens A.; ZAPP, Petra. **Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis—a review.** *Journal of cleaner production*, v. 85, p. 151-163, 2014.

BUFFI, Marco; PRUSSI, Matteo; SCARLAT, Nicolae. **Energy and environmental assessment of hydrogen from biomass sources: Challenges and perspectives.** *Biomass and Bioenergy*, v. 165, p. 106556, 2022.

CAMPOS, Marcel Gonin de. **Abordagem de Ciclo de Vida na avaliação de impactos ambientais no processamento primário offshore.** 2012.

CAPURSO, T. *et al.* **Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition.** *Energy Conversion and Management*, v. 251, p. 114898, 2022.

CHANBURANASIRI, Naruewan *et al.* **Hydrogen production via sorption enhanced steam methane reforming process using Ni/CaO multifunctional catalyst.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 50, n. 24, p. 13662-13671, 2011.

CHEHADE, Zaher *et al.* **Review and analysis of demonstration projects on power-to-X pathways in the world.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 51, p. 27637-27655, 2019.

CHEN, Xiaotian. **The declining value of subscription-based abstracting and indexing services in the new knowledge dissemination era.** *Serials Review*, v. 36, n. 2, p. 79-85, 2010.

CHEN, Zhong Shuo; LAM, Jasmine Siu Lee. **Life cycle assessment of diesel and hydrogen power systems in tugboats.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 103, p. 103192, 2022.

CHIRONE, Roberto *et al.* **Carbon capture and utilization via calcium looping, sorption enhanced methanation and green hydrogen: A techno-economic analysis and life cycle assessment study.** *Fuel*, v. 328, p. 125255, 2022.

CHU, Hsuanyu *et al.* **Investigation of hydrogen production from model bio-syngas with high CO₂ content by water-gas shift reaction.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 11, p. 4092-4100, 2015.

DE KLEIJNE, Kiane *et al.* **The many greenhouse gas footprints of green hydrogen.** *Sustainable Energy & Fuels*, v. 6, n. 19, p. 4383-4387, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese 2022.** 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_Síntese_2022_PT.pdf

EUROPEAN COMMISSION. **European green deal.** 2019. Disponível em: <https://policycommons.net/artifacts/1337481/european-green-deal/1945374/>

GAVANKAR, Sheetal; ANDERSON, Sarah; KELLER, Arturo A. **Critical components of uncertainty communication in life cycle assessments of emerging technologies: nanotechnology as a case study.** *Journal of Industrial Ecology*, v. 19, n. 3, p. 468-479, 2015.

- GERLOFF, Niklas. **Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production**. *Journal of Energy Storage*, v. 43, p. 102759, 2021.
- GULOTTA, Teresa Maria *et al.* **Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of unitized regenerative fuel cell: A systematic review**. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 92, p. 106698, 2022.
- IANNUZZI, Leonardo; HILBERT, Jorge Antonio; LORA, Electo Eduardo Silva. **Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 57, p. 29694-29705, 2021.
- International Energy Agency - IEA. **Global Hydrogen Review 2022**. 2022. Disponível em: [iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022](https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022)
- JANG, Hayoung *et al.* **Parametric trend life cycle assessment for hydrogen fuel cell towards cleaner shipping**. *Journal of Cleaner Production*, v. 372, p. 133777, 2022.
- LAL, Apoorv; YOU, Fengqi. **Targeting climate-neutral hydrogen production: Integrating brown and blue pathways with green hydrogen infrastructure via a novel superstructure and simulation-based life cycle optimization**. *AIChE Journal*, v. 69, n. 1, p. e17956, 2023.
- LIU, Wei *et al.* **Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 58, p. 24584-24591, 2022.
- OLINDO, Roberta; SCHMITT, Nathalie; VOGTLÄNDER, Joost. **Life cycle assessments on battery electric vehicles and electrolytic hydrogen: The need for calculation rules and better databases on electricity**. *Sustainability*, v. 13, n. 9, p. 5250, 2021.
- OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf
- OKONKWO, Eric C. *et al.* **Sustainable hydrogen roadmap: A holistic review and decision-making methodology for production, utilization and exportation using Qatar as a case study**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 72, p. 35525-35549, 2021.
- ONI, A. O. *et al.* **Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions**. *Energy Conversion and Management*, v. 254, p. 115245, 2022.
- PALMER, Graham *et al.* **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, 2021.
- PROENÇA, Laís Ferreira Crispino *et al.* **Opportunities and Challenges for the New Hydrogen Economy: Advances in Renewable Hydrogen**. *Transportation Systems Technology and Integrated Management*. 2023.
- SANCHEZ, Nestor *et al.* **Biomass Potential for Producing Power via Green Hydrogen**. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 8366, 2021.



SANTOS, Andrea Souza *et al.* **An overview on costs of shifting to sustainable road transport:** A challenge for cities worldwide. Carbon Footprint Case Studies: Municipal Solid Waste Management, Sustainable Road Transport and Carbon Sequestration, p. 93-121, 2021.

VALENTE, Antonio; IRIBARREN, Diego; DUFOUR, Javier. **Life cycle assessment of hydrogen energy systems:** a review of methodological choices. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, p. 346-363, 2017.

VALENTE, Antonio; IRIBARREN, Diego; DUFOUR, Javier. **Harmonising methodological choices in life cycle assessment of hydrogen:** A focus on acidification and renewable hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 35, p. 19426-19433, 2019.

VAUGHAN, Michael L.; FAGHRI, Ardeshir; LI, Mingxin. **An interactive expert system based decision making model for the management of transit system alternate fuel vehicle assets.** Intelligent Information Management, v. 9, n. 1, p. 1-20, 2016.

WALKER, Sean B.; FOWLER, Michael; AHMADI, Leila. **Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles.** Journal of Energy Storage, v. 4, p. 62-73, 2015.

WANG, Yifei *et al.* **A review on unitized regenerative fuel cell technologies, part-A: Unitized regenerative proton exchange membrane fuel cells.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 961-977, 2016.

WATABE, Akihiro *et al.* **Life cycle emissions assessment of transition to low-carbon vehicles in Japan:** combined effects of banning fossil-fueled vehicles and enhancing green hydrogen and electricity. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 22, p. 1775-1793, 2020.

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, 2022.

ZHANG, Jinxu *et al.* **Life cycle assessment of three types of hydrogen production methods using solar energy.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, n. 30, p. 14158-14168, 2022.

ZHAO, Guangling *et al.* **Life cycle cost analysis:** A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 19, p. 9517-9528, 2019.

AGRADECIMENTOS

Esta publicação é uma realização conjunta da UFRJ e do projeto H2Brasil. O projeto H2Brasil integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e é implementado pela *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH e pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e financiado pelo Ministério Federal da Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha.