



## Uma Visão Geral sobre a Avaliação do Ciclo de Vida do Hidrogênio Renovável

### *An Overview of Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen*

**Victor Hugo Souza de Abreu, Doutorando em Engenharia de Transportes do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro**

victor@pet.coppe.ufrj.br

**Alberto Coralli, Pós-Doutorando em Engenharia de Transportes do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro**

alberto.coralli@coppe.ufrj.br

**Laís Ferreira Crispino Proença, Pós-Doutoranda em Engenharia de Elétrica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro**

laiscrispino@poli.ufrj.br

**Andrea Souza Santos, Professora de Engenharia de Transportes do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro**

andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

#### Resumo

O hidrogênio renovável tem apresentado posição de destaque no atual quadro de transição energética global porque tem o potencial para ser usado como matéria-prima, combustível ou transportador e armazenador de energia limpa para equilibrar a oferta e demanda de eletricidade. Entretanto, faz-se necessária a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do hidrogênio renovável de modo a mensurar as possíveis reduções dos impactos ambientais da implementação em larga escala, inclusive em comparação às tecnologias já 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

*Green hydrogen has presented a prominent position in the current global energy transition framework because it has the potential to be used as a feedstock, a fuel or a carrier and storage of clean energy to*

*balance electricity supply and demand. However, a Life Cycle Assessment (LCA) of green hydrogen is needed in order to measure the potential reductions in environmental impacts of large-scale implementation compared 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 proposta de metas de carbono neutro em vários países, o aprofundamento da ação global sobre a mudança climática e a aceleração da recuperação da economia verde na era pós-covid tem impulsionado a implantação em larga escala de fontes de energia renováveis (SANTOS *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2022). Entretanto, 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 (GULOTTA *et al.*, 2022). 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). Tudo isso exige 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), transporte e indústria, 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).

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 H<sub>2</sub> 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).

Atualmente, a maior parte da produção atual de hidrogênio está dividida principalmente em três categorias, que são: (i) de origem renovável (denominado em muitos casos 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).

Entretanto, 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). Dessa maneira, 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. Procedimento Metodológico

Com 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.

Nesse sentido, os termos utilizados, os critérios de inclusão e qualificação, bem como os detalhes para a busca e extração do banco de dados, são apresentados na Tabela 1, em que a abreviação TS corresponde à Tópico e significa as palavras que são pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos estudos incluídos na base de dados.

**Tabela 1: Descrição das Estratégias de Buscas.**

Critério	Descrição
Tópicos	TS=( <i>'Life cycle' AND "Renewable Hydrogen"</i> ) OR TS=( <i>'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: elaborado pelos 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.

## 3. Resultados Bibliométricos

A partir da busca realizada na base *Web of Science*, foi possível verificar que 158 publicações estavam aptas a serem incluídas no repositório de pesquisa, ou seja, atendiam aos critérios de inclusão e de qualificação (qualidade e aplicabilidade). Nesse sentido, 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.

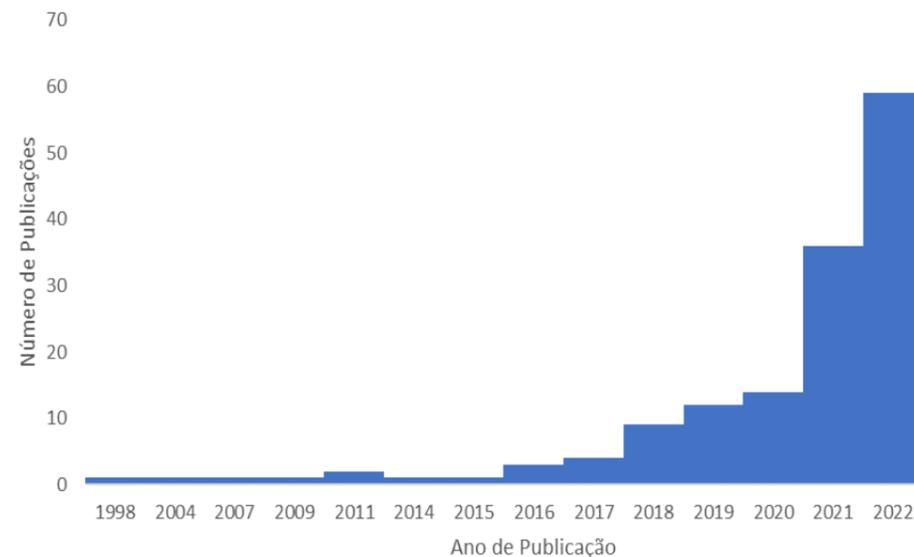


Figura 1: Evolução das publicações por ano. Fonte: elaborado pelos autores.

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.

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.

Nesse sentido, a Tabela 2 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 2: Principais periódicos.

Periódico	P	FI	FI média
<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	33	7,139	6,2

Periódico	P	FI	FI média
<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 &amp; Environmental Science</i>	5	39,714	39,151
<i>Science Of The Total Environment</i>	5	10,754	10,237

Fonte: elaborado pelos autores.

Na Tabela 2, nota-se que os periódicos que mais abordam sobre o assunto são: o *International Journal of Hydrogen Energy*, com 33 publicações, o *Journal of Cleaner Production*, com 14 publicações, e o *Energies* e o *Sustainability*, com 8 publicações cada. Cabe destacar ainda que ao todo foram constatadas 32 fontes de pesquisa. Além disso, nota-se que ao ordenar os periódicos por fator de impacto, foi possível identificar que os mais relevantes são: o *Energy & Environmental Science*, o *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, e o *Energy Conversion and Management*, com FI maior que 11 (o que representa uma excelente pontuação).

Observa-se a importância de avaliar as principais palavras-chave encontradas nos artigos incluídos no repositório de pesquisa, conforme identificado na rede de interligação apresentada na Figura 2, desenvolvida com auxílio do Software VOSviewer. Ao avaliar as principais palavras-chave encontradas nos artigos incluídos no repositório de pesquisa, é possível identificar as tendências e os temas mais relevantes no campo de estudo.



fontes energéticas, em comparação a outras opções de combustíveis, incluindo hidrogênio produzido a partir de fontes puramente fósseis, conforme exemplos destacados na Tabela 3.

Os resultados dos estudos considerados mostram que, com relação às questões técnicas, há uma variabilidade significativa nos impactos ambientais e econômicos, dada pelos limites do sistema selecionado, pelos usuários finais e pelo combustível utilizado pelos sistemas e, com relação às questões metodológicas, não há consenso sobre como modelar os estudos de ACV de acordo com unidades funcionais, limites do sistema, tipo de dados selecionados, ou externalidades ambientais modelo.

**Tabela 3: 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).	Os resultados da ACV mostraram que o CGH2-PL é a opção mais sustentável entre todos os caminhos averiguados, pois mostrou ter o menor potencial de aquecimento global (GWP) (1,57 kgCO2-eq/kgH2). Pelo contrário, a entrega via LOHC teve os piores resultados e teria as maiores emissões (3,58 kgCO2-eq/kgH2).
WEIDNER, TULUS & GUILLÉN-G OSÁLBEZ (2022)	Desenvolveu-se uma análise prospectiva do ciclo de vida para comparar diferentes opções para produzir 500 Mt/ano de hidrogênio, incluindo cenários que consideram prováveis mudanças nas futuras cadeias de suprimento. Os impactos ambientais e na saúde humana resultantes de tais níveis de produção são ainda mais contextualizados com a estrutura dos Limites Planetários - definem até onde o desenvolvimento humano pode chegar sem afetar de forma irreversível a capacidade regenerativa da Terra -, os conhecidos encargos com a saúde humana, os impactos da economia mundial e os custos de produção a preços externos que incorporam o impacto ambiental.	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 hidrogênio) quando se aplica uma análise prospectiva do ciclo de vida.

Referência	Objetivo	Resultados
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 CO2 dos gases de combustão de uma usina elétrica alimentada a carvão, e com um eletrolítico de água sustentado por energia renovável.	Os resultados da análise tecno-econômica indicaram que o custo de produção do metano é superior ao do gás natural (0,66 vs 0,17 euros/Nm3), mas inferior ao do biometano (1 euro/Nm3). O maior impacto sobre tais custos vem do eletrolítico PEM. A análise da LCA mostrou que o desempenho ambiental é melhor em algumas categorias e pior em outras com relação aos cenários tradicionais. Novamente, o eletrolisador PEM parece ser 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 CO2 equivalente ao aquecimento global, 51.930 kg SO2 equivalente à acidificação, 11.476 kg PO4- equivalente à eutrofização, e 2.629 kg C2H4 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 CO2-eq e 6,56E-3 kg SO2-eq. E este método tem vantagens significativas no impacto ambiental do ecossistema como um todo.

Referência	Objetivo	Resultados
JANG <i>et al.</i> (2022)	Dada a crescente preocupação com a mudança climática, buscou-se responder se as células combustíveis de hidrogênio podem ser realmente uma solução verde no setor de transporte marítimo a partir de uma perspectiva de ciclo de vida. Para isso, os impactos ambientais de vários métodos de produção de hidrogênio foram avaliados, incluindo a reforma do metano a vapor, gaseificação do carvão, craqueamento do metanol e eletrólise através da energia eólica. Foi levado em conta o desempenho de três tipos representativos de sistemas de células a combustível: combustível de membrana de troca de prótons, célula a combustível de carbonato fundido e célula a combustível de óxido sólido.	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 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 membranas eletrolíticas poliméricas (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 <sub>2</sub> .	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.

Referência	Objetivo	Resultados
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 <sub>2</sub> -eq. de uma produção de hidrogênio mais verde muda ao aplicar os diferentes cenários energéticos para cada tecnologia.	Em resumo, pode-se afirmar que o CO <sub>2</sub> -eq. diminui com uma participação crescente da energia eólica e solar no mix energético, uma vez que a participação das energias fósseis, que são os principais motores do CO <sub>2</sub> -eq., diminui. Além disso, a tecnologia SOEC tem a menor emissão de CO <sub>2</sub> -eq. para os cenários energéticos de 2019, 2030 e 2050. Isto se aplica à tecnologia AEC para o cenário das Energias Renováveis. Com relação aos valores comparativos dos processos de produção de hidrogênio convencionais e outros, bem como das alternativas convencionais, somente o cenário de Energia Renovável com energia eólica e solar proporciona resultados mais baixos. Assim, apenas o cenário de Energia Renovável é adequado para uma produção e utilização de hidrogênio ambientalmente correta, a fim de reduzir as emissões de CO <sub>2</sub> . Além disso, a tecnologia SOEC causa os menores impactos ambientais potenciais para os cenários energéticos em 2019 e 2030, levando em conta todos os indicadores LCIA. Isto se aplica à tecnologia PEMEC para o cenário energético em 2050 e para o cenário RE.
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 sensibilidade mais significativa decorre da interrupção do eletrolisador e da necessidade proporcional de amortecer a eletricidade solar com armazenamento ou eletricidade da rede. Em condições de linha de base, as emissões de GEE são cerca de um quarto do processo atualmente dominante para a produção de hidrogênio, a reforma do metano a vapor (do inglês, <i>steam methane reforming</i> - SMR). No entanto, a análise de sensibilidade mostra que as emissões de GEE podem ser comparáveis a SMR sob condições razoavelmente antecipadas. Os resultados da energia líquida são menores do que os dos combustíveis fósseis e suficientemente incertos para merecer mais atenção. Recomendamos que a avaliação do ciclo de vida e a análise de energia líquida sejam integradas ao planejamento do projeto para garantir que o hidrogênio atenda aos objetivos da produção verde.

Referência	Objetivo	Resultados
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 membrana eletrolítica de polímero (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 Européia 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 <sub>2</sub> 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.

Cabe ainda destacar que, embora a ACV avalie os impactos ambientais potenciais do hidrogênio renovável, sua confiabilidade depende estritamente de dados completos e confiáveis que representam o sistema analisado. Entretanto, na maioria das vezes os dados representativos nem sempre estão disponíveis e existem numerosas incertezas embutidas nos modelos que afetam os resultados. Assim, torna-se necessário conduzir uma análise de sensibilidade para testar as influências de parâmetros incertos e priorizar pesquisas adicionais (GULOTTA *et al.*, 2022).

Além disso, muitos pesquisadores apontam que a energia consumida durante a fase de operação ou a fase de produção de hidrogênio gera os maiores impactos durante todo o ciclo de vida dos dispositivos PEM. Ela está geralmente associada ao custo das tecnologias emergentes e às emissões ambientais associadas ao tipo de combustível relatado (como o gás natural ou eletricidade da rede). Entretanto, em muitos casos, os resultados são apresentados com indicadores de agrupamento e ponderação, o que torna difícil identificar os principais pontos quentes dos estudos (GULOTTA *et al.*, 2022).

Finalmente, embora a discussão sobre os resultados seja sempre relatada nos artigos selecionados que identificam os principais pontos quentes, a incerteza e a qualidade dos dados não são relatadas corretamente em todos os estudos (GULOTTA *et al.*, 2022). No entanto, a

incerteza deve ser comunicada para garantir a transparência e credibilidade dos estudos do ciclo de vida e evitar interpretações errôneas de profissionais não especializados em ACV (GAVANKAR, ANDERSON & KELLER, 2015).

## 5. 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 têm-se 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.

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.

## 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.

## 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, Wade 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.

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 CO<sub>2</sub> content by water-gas shift reaction. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 11, p. 4092-4100, 2015.

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\\_Sintese\\_2022\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_Sintese_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](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.

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.

## Captura segura de *Spunbond Meltblown Spunbond* em sala operatória para *upcycling* em projeto socioambiental

### *Spunbond Meltblown Spunbond safe capture in the operating room for upcycling for socio environmental projects*

**Danielly Nogueira Negrão Guassu Nogueira, Dra. - UEL**

dani.negrao@uel.br

**Laryssa Guilherme Mota, Graduada – UEL**

laryssa-guilherme@hotmail.com

**Suzana Barreto Martins, Dra. – UEL**

suzanabarreto@uel.br

**Fernanda de Oliveira Massi, Graduada – UEL**

ferdmassii@gmail.com

**Matheus Nascimento Bataglia, Graduando – UEL**

matheus.nascimento0@uel.br

#### Resumo

Este trabalho busca apresentar a definição de etapas para Captura Segura de SMS em Centros Cirúrgicos e a estimativa de geração deste material em Hospital na cidade de Londrina como forma de propor novas utilizações por meio do *upcycling*. Trata-se de um estudo descritivo, exploratório do tipo longitudinal com abordagem quantitativa. Como resultado obteve-se algumas sugestões de aplicação do material capturado assim como implementação de sistema de Captura Segura e reuso do SMS em novos produtos como *ecobags* para os pacientes do Hospital Universitário de Londrina, e para parceiros, a exemplo de cama pet para o Hospital Veterinário da Universidade Estadual de Londrina.

**Palavras-chave:** captura segura, resíduo hospitalar, *upcycling*, *spunbond meltblown spunbond*.

#### Abstract

*This work seeks to present the definition of stages for the Safe Capture of SMS in Surgical Centers and the estimated generation of this material in a Hospital in the city of Londrina as a way of proposing new uses through upcycling. This is a descriptive, exploratory longitudinal study with a quantitative approach. As a result, some suggestions for the application of the captured material were obtained, as well as the implementation of a Secure Capture system and SMS reuse in new products for the Hospital, ecobags for Londrina University Hospital patients, and for partners, such as the pet bed for the Londrina Veterinary Hospital.*