

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO

Bárbara Nascimento Novaes<sup>1</sup> (IC), Rafael Silva Capaz (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** : Análise do ciclo de vida. Armazenamento. Hidrogênio Verde.

## Introdução

A crescente importância da questão climática destaca a necessidade urgente de mudanças na matriz energética global, uma vez que os combustíveis fósseis representam 85% da mesma (IEA, 2023). A transição energética visa substituir gradualmente esses combustíveis por fontes renováveis e tecnologias com eventual melhor desempenho ambiental. Neste contexto, cita-se o hidrogênio, que tem grande potencial devido a sua versatilidade de uso, alto poder calorífico, e principalmente pela possibilidade de ser obtido de fontes renováveis.

Nesse contexto, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta essencial para medir os impactos ambientais, diretos e indiretos, dessas tecnologias desde a extração das matérias-primas até a disposição final dos resíduos. Dessa forma, essa pesquisa tem como objetivo estimar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas às formas de armazenamento convencional de hidrogênio com ênfase nos tanques tipo III e IV.

O trabalho se justifica devido à importância da etapa de armazenamento no contexto da infraestrutura específica para a utilização do H<sub>2</sub> como fonte de energia, que envolve cuidados com segurança e os riscos associados às propriedades do gás, como vazamentos e alta inflamabilidade. Além disso, apesar do crescente interesse no hidrogênio como alternativa sustentável, há uma carência de estudos sobre os impactos do armazenamento, com a maioria das análises focadas apenas na etapa de produção.

Para a realização da pesquisa, foi feita uma revisão bibliográfica, obtendo-se inventários para a construção de tanques Tipo III e Tipo IV. Assim, com base na análise no software Open LCA, e utilizando a metodologia IPCC 2013 GWP 100<sup>a</sup>, foram calculadas as emissões totais de GEE (em CO<sub>2e</sub>) associadas à produção dos tanques e a contribuição de cada etapa para o total.

## Metodologia

A partir de revisão bibliográfica sobre os temas “Análise do Ciclo e Vida” e “Hidrogênio” e “Hidrogênio Verde”, foi possível observar inúmeros estudos dentro

da etapa de produção, mas poucas pesquisas sobre armazenamento. Dos artigos encontrados e usados como base para este trabalho cita-se ROSSI et al., 2019, que oferece inventários de produtos relacionados a redes elétricas inteligentes e avalia o perfil ambiental de um nano-grid composto por sistema fotovoltaico, gerador de backup e armazenamento de energia, analisando um sistema solar residencial com baterias de íons de lítio e propondo um sistema híbrido com hidrogênio para lidar com a variabilidade sazonal da energia solar. No segundo, foram encontrados os dois inventários utilizados como base para a pesquisa. Ambos se encontram na tabela abaixo:

TIPO DE TANQUE	INPUTS	QTDE (kg/unidade)
Tipo III	Amônia para Fibra de Carbono	21.2
	Eletricidade para Fibra de Carbono	404.9 MJ
	Propileno para Fibra de Carbono	53
	Tubo de aço cromado	4
	Fibra de vidro reforçada (plástico, resina de poliéster, laminação manual)	6.1
	Poliuretano granulado de alta densidade	11.4
	Espuma de polímero	5.2
	Silício de grau eletrônico	1
	Aço de baixa liga	14.5
	OUTPUTS	
Tanque tipo III	258 L	
Tipo IV	INPUTS	QTDE (kg/unidade)
	Amônia para Fibra de Carbono	27
	Eletricidade para Fibra de Carbono	514.9
	Propileno para Fibra de Carbono	67.4
	Tubo de aço cromado	4
	Fibra de vidro reforçada (plástico, resina de poliéster, laminação manual)	4.6
	Poliuretano granulado de alta densidade	8
	Espuma de polímero	4
	Silício de grau eletrônico	1
	Aço de baixa liga	13.7
OUTPUTS		
Tanque tipo IV	149 L	

Tabela 1 – Inventários dos tanques tipo I e tipo IV.

Os inventários dos tanques Tipo III (258L) e Tipo IV (149L) mostram que, apesar das diferenças de volume e pressão operacional, ambos armazenam quantidades quase iguais de hidrogênio (aproximadamente 5 kg, sendo que o tanque tipo 3 opera a 350 bar e o tanque tipo 4 opera a 700 bar), comprovado por cálculos e conversões de unidade que foram realizados com auxílio da plataforma H2tools.org, mantida pelo Pacific Northwest National Laboratory e financiada pelo Departamento de Energia dos EUA, que disponibiliza ferramentas e dados referentes ao hidrogênio, incluindo uma planilha com informações sobre a densidade volumétrica do gás e gráficos relevantes para a análise.

Sendo assim, para facilitação dos cálculos da análise dos resultados, a unidade funcional utilizada foi a de uma unidade de tanque. Após essa etapa, os inventários foram inseridos no software Open LCA com seus respectivos providers e de acordo com a unidade funcional. Para o cálculo, assumiu-se um *Cutoff* de 10<sup>-8</sup> e a metodologia de avaliação de impacto IPCC 2013

GWP 100, para avaliação da emissão de carbono.

## Resultados e discussão

É possível observar que a emissão de GEE do Tanque Tipo III foi de 282,29 kg CO<sub>2e</sub>, enquanto a do Tanque Tipo IV foi de 317,96. Considerando uma vida útil de 10 anos para ambos os tanques (mesma considerada pelo artigo citado), isso resulta em 28,23 kg de CO<sub>2e</sub> por ano emitidos pelo Tanque III e 31,8 kg emitidos pelo Tanque IV. Ainda pode-se encontrar a emissão de CO<sub>2e</sub> por kg de H<sub>2</sub> armazenado durante sua vida útil, calculado na etapa anterior. Os resultados são apresentados na Tabela 2:

Emissões (kg CO <sub>2</sub> )	Tanque Tipo III	Tanque Tipo IV
Total	282,29	317,96
Por ano	28,23	31,80
Por kg de H <sub>2</sub> armazenado	43,77	50,81

Tabela 2 – Resultados da pegada de carbono para os tanques analisados.

Analisando os resultados obtidos por processo de produção, no Software OpenLCA, constatou-se que as maiores contribuições para a emissão de carbono em ambos os casos foram da produção de propileno e amônia (aproximadamente 30% e 12% respectivamente), seguidas pela geração de eletricidade e produção de aço. A alta contribuição do propileno se deve ao fato de ser um produto refinado do petróleo, enquanto a amônia também tem um impacto significativo devido ao uso de gás natural em seu processo de produção.

Considerando a capacidade dos tanques de 15.000 ciclos, ou seja encheimentos e esvaziamentos durante a vida útil de 10 anos, a emissão por kg de H<sub>2</sub> em cada ciclo é de cerca de 0,003 kg CO<sub>2e</sub> para ambos os tanques, e a emissão total por ciclo é de aproximadamente 0,02 kg CO<sub>2e</sub>. Pawłowski et al. (2023), traz dados da pegada de carbono de alguns métodos de produção. Ao comparar esses dados com a pegada de carbono de diferentes métodos de produção de hidrogênio verde, observa-se que a emissão dos tanques representa uma fração mínima das emissões totais, variando de 0,08% a 0,22% dependendo da fonte de energia utilizada.

## Conclusões

As emissões associadas ao armazenamento de H<sub>2</sub> referem-se apenas a construção dos tanques e foram estimadas em cerca de 32 kgCO<sub>2e</sub>/tanque. A análise dos dados mostrou que as emissões de CO<sub>2</sub> dos Tanques Tipo III e IV são semelhantes, mas o Tanque Tipo IV apresenta uma emissão total 12,63% maior por unidade de tanque.

Porém, quando contabilizada a vida útil dos

tanques (em número de ciclos), a contribuição das emissões de CO<sub>2e</sub> é quase insignificante (menos de 1%) em comparação com as emissões da produção de hidrogênio. Essa análise é importante devido a vida útil relativamente longa dos tanques, ou seja, essas emissões serão distribuídas pelas diversas vezes em que serão utilizados para armazenar H<sub>2</sub> ao longo dos anos (a cada abastecimento e desabastecimento de hidrogênio, é considerado um ciclo completo). No entanto, ressalta-se que o estudo se concentrou apenas nas emissões associadas aos materiais usados na construção dos tanques, sem incluir o transporte ou as operações de abastecimento. Da mesma forma, em termos de desempenho ambiental, foi considerado apenas as emissões de GEE.

## Agradecimentos

À UNIFEI e orientações e sugestões dos professores Rafael Silva Capaz e Bruno Silva de Souza, ambos vinculados ao projeto PID1317-2022 Avaliação Teórico-Experimental da produção e uso de hidrogênio verde em Minas Gerais.

## Referências

- ARTUR PAWŁOWSKI; AGNIESZKA ŻELAZNA ; JAROSŁAW ŻAK. Is the Polish Solar-to-Hydrogen Pathway Green? A Carbon Footprint of AEM Electrolysis Hydrogen Based on an LCA, 2023.
- CHENG, Qian; ZHANG, Ruiqiang; SHI, Zhusheng; et al. Review of Common Hydrogen Storage Tanks and Current Manufacturing Methods for Aluminium Alloy Tank Liners. International journal of lightweight materials and manufacture, v. 7, n. 2, p. 269–284, 2024.
- GÖTZ, Manuel; LEFEBVRE, Jonathan; FRIEDEMANN MÖRS; et al. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renewable energy, v. 85, p. 1371– 1390, 2016.
- Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production Walter Jose Martinez-Burgos a , Esteffany de Souza Candeo b , Adriane Bianchi Pedroni Medeiros a , Julio Cesar de Carvalho a , Valcineide Oliveira de Andrade Tanobe a , Carlos Ricardo Soccol a , Eduardo Bittencourt Sydney b, \* 2020
- MUELLER, Daniela ; MARC FRANÇOIS RICHTER. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA/Novos Cadernos NAEA (Impresso), v. 26, n. 1, 2023.
- OSMAN, A. I. et al. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. Environmental Chemistry Letters, [s. l.], vol. 20, p. 1-36, 2021.
- ROSSI, Federico; MARIA LAURA PARISI; MARANGHI, Simone; et al. Environmental analysis of

a nano-grid: A Life Cycle Assessment. Science of the total environment, v. 700, p. 134814–134814, 2020.

ROSSI, Federico; MARIA LAURA PARISI; MARANGHI, Simone; et al. Life Cycle Inventory Datasets for Nano-grid configurations. ResearchGate, 2019.

H2tools. Hydrogen Tools. H2tools.org. Disponível em: <<https://h2tools.org/>>. Acesso em: 5 out. 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA – International Energy Agency. IEA. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 5 out. 2024.