

## PERFORMANCE AMBIENTAL “ENERGIA-CARBONO” DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE REFORMA A VAPOR

Douglas Peterson Munis da Silva<sup>1</sup>, Maria Sircia de Sousa<sup>2</sup> e Rafael Silva Capaz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pesquisador ANP/PRH, UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais [douglaspmsilva@gmail.com](mailto:douglaspmsilva@gmail.com)

<sup>2</sup>Engenheira Mecânica, UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais [msircia@gmail.com](mailto:msircia@gmail.com)

<sup>3</sup>Dr. Sistemas de Planejamento Energético, UNIFEI, UNIFEI, [rafacapaz@unifei.edu.br](mailto:rafacapaz@unifei.edu.br)

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
05 a 09 de outubro de 2025

**RESUMO:** O aumento do uso de energias renováveis é a forma mais eficaz de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, tornando-se fundamental para uma transição energética sustentável. O hidrogênio (H<sub>2</sub>) representa uma solução estratégica, mas o principal desafio consiste em garantir a sustentabilidade de toda a sua cadeia de abastecimento, de modo a criar um sistema energético limpo e socioeconomicamente viável. Este estudo explorou, através de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), as conexões entre emissões de gases com efeito de estufa (GWP), pegada hídrica (WSF) e a razão de energia fóssil (FER) na produção de H<sub>2</sub>. Considerando o papel-chave do Brasil no futuro mercado global de hidrogênio, os indicadores ambientais foram avaliados para as rotas de produção de H<sub>2</sub> a partir da reforma a vapor (SR) de metano fóssil (SMR), etanol de cana-de-açúcar, etanol de milho e biogás de aterro sanitário (SRBio). O GWP, que variou de 2,7 até 13,7 kg CO<sub>2</sub>eq/kg H<sub>2</sub>, não foi diretamente proporcional à dependência de energia fóssil, que variou de 2,4 a 243, indicando baixos índices de renovabilidade do H<sub>2</sub>.

**PALAVRAS-CHAVE:** Avaliação do Ciclo de Vida; Escassez Hídrica; Retorno Energético do Investimento; Potencial de Aquecimento Global; Brasil

## ENVIRONMENTAL “ENERGY-CARBON” PERFORMANCE OF HYDROGEN PRODUCTION FROM STEAM REFORMING

**ABSTRACT:** The increase in the use of renewable energies is the most effective way to reduce dependence on fossil fuels, making it fundamental for a sustainable energy transition. Hydrogen (H<sub>2</sub>) represents a strategic solution, but the main challenge lies in ensuring the sustainability of its entire supply chain in order to create a clean and socioeconomically viable energy system. This study explored, through a Life Cycle Assessment (LCA), the connections between greenhouse gas emissions (GWP), water scarcity footprint (WSF), and the fossil energy ratio (FER) in H<sub>2</sub> production. Considering Brazil's key role in the future global hydrogen market, environmental indicators were evaluated for H<sub>2</sub> production pathways based on steam reforming (SR) of fossil methane (SMR), sugarcane ethanol, corn ethanol, and landfill biogas (SRBio). The GWP, which ranged from 2.7 to 13.7 kg CO<sub>2</sub>eq/kg H<sub>2</sub>, was not directly proportional to fossil energy dependence, which varied from 2.4 to 243, indicating low renewability rates for hydrogen.

**KEYWORDS:** Life Cycle Assessment; Water scarcity; Energy Return on Investment; Global Warming Potential; Brazil

## INTRODUÇÃO

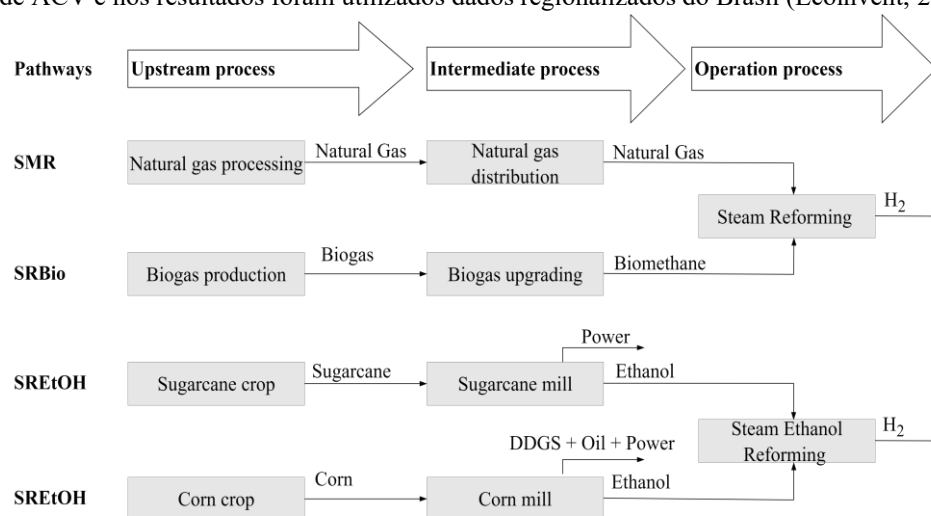
Os sistemas energéticos baseados em hidrogênio (H<sub>2</sub>) surgem como alternativa promissora para a transição energética, sendo fundamentais para a descarbonização de setores intensivos em emissões de gases de efeito estufa (GEE), como transporte, indústria química e processos industriais de alta temperatura (Hren *et al.*, 2023). A “Economia do H<sub>2</sub>” destaca-se pela elevada densidade energética do H<sub>2</sub> e pela versatilidade de sua produção a partir

de recursos fósseis e renováveis, contribuindo para um sistema energético diversificado e resiliente (Valente *et al.*, 2020).

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho ambiental da produção de H<sub>2</sub> em termos de emissões de GEE (GWP) e o consumo de energia fóssil primária (CED). As rotas para produção de H<sub>2</sub> selecionadas foram: reforma a vapor do gás natural (SMR); reforma a vapor de biogás de aterro (SRBio); reforma a vapor de etanol de cana-de-açúcar (SREtOH cana-de-açúcar) e de etanol de milho (SREtOH milho).

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho baseou-se na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (ABNT, 2009) para produzir 1,0 kg H<sub>2</sub> em 200 bar de pressão, considerando abordagem atribucional do berço ao portão (Figura 1). Os coprodutos dos processos intermediários foram tratados por alocação energética enquanto, na produção de H<sub>2</sub>, toda a carga ambiental foi atribuída à produção de H<sub>2</sub>. Para aprimorar a precisão dos resultados e reduzir incertezas nos inventários de ACV e nos resultados foram utilizados dados regionalizados do Brasil (Ecoinvent, 2023).



**Figura 1 – Fronteiras dos processos**

O software SimaPro v9.5 foi utilizado para modelar os sistemas de ACV da produção de H<sub>2</sub> e avaliar as categorias de impacto: CED e GWP. O processo SMR foi escolhido como referência, visto que representa 95% da produção de H<sub>2</sub> do Brasil (Santana *et al.*, 2023).

O processo de reforma a vapor pode utilizar gás natural, biometano ou até mesmo etanol para produzir H<sub>2</sub>. Uma alternativa ao gás natural é o biometano, que pode ser obtido e purificado a partir do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros. Na purificação do biogás foi assumido um percentual de 2,0% de emissões fugitivas de metano. Os processos de SMR e SRBio foram modelados conforme descrito por (Spath; Mann, 2001). A Tabela 1 apresenta as principais considerações do processo de reforma.

**Tabela 1 – Descrição dos processos**

Parâmetro	SR	SREtOH	Unit
Horas de operação anual	7.900	7.580	h/ano
Vida útil	20	20	anos
Produção de H <sub>2</sub>	5.600	65	kg H <sub>2</sub> /h
Etanol	-	158	MJ/kg H <sub>2</sub>
Eletricidade	0,3	0,3	kWh/kg H <sub>2</sub>
Gás Natural	115	-	MJ/kg H <sub>2</sub>
Biometano	131	-	MJ/kg H <sub>2</sub>

Este estudo também avaliou o CED e o GWP do H<sub>2</sub> produzido pela reforma a vapor do etanol de cana-de-açúcar e de milho (SREtOH). A operação de SREtOH foi adaptada de (NREL, 2018). O etanol é utilizado tanto

como matéria-prima quanto como combustível para o queimador (Llorca *et al.*, 2013). O cultivo das culturas de cana e milho, principais matérias-primas para a produção de etanol no Brasil, foram incluídos nos limites do estudo de ACV (Bonomi *et al.*, 2016; Moreira *et al.*, 2020).

O GWP foi estimado utilizando o método “IPCC 2021 GWP 100”, baseado no AR6 Climate Change 2021. O CED contabilizou o uso de recursos fósseis ao longo do ciclo de vida da produção do H<sub>2</sub>. Esse indicador é utilizado para medir a renovabilidade dos sistemas energéticos e para avaliar a dependência de recursos fósseis.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, espera-se que GWP e o CED apresentem tendências semelhantes, uma vez que o consumo de energia fóssil está diretamente associado às emissões de GEE. No entanto, essa relação não se observa para a rota SRBio, que apresenta o menor CED, mas não as menores emissões. No caso do SRBio, o baixo consumo de energia fóssil é atribuído à renovabilidade do biogás. Essa rota alcança cerca de 70% de redução de GEE em relação ao SMR, devido às emissões fugitivas de metano (61,8 gCH<sub>4</sub>/kg H<sub>2</sub>) no processo de purificação do biogás.

**Tabela 2 – Resultados para o CED e GWP**

Rotas	CED (MJfossil/kg H <sub>2</sub> )	GWP (kg CO <sub>2eq</sub> /kg H <sub>2</sub> )
SMR	243,1	13,7
SREtOH Milho	22,8	2,9
SREtOH Cana-de-açúcar	20,4	2,7
SRBio	2,4	4,1

Como mencionado, o SRBio resultou na maior renovabilidade do sistema produtor de H<sub>2</sub>. Além disso, para o SREtOH, o CED da produção de etanol é elevado tanto para o milho (6,2) quanto para a cana-de-açúcar (7,0), levando a um CED favorável para o H<sub>2</sub> produzido via SREtOH.

As maiores emissões de carbono e uso de energia fóssil foram estimadas para a rota SMR, e estão alinhadas com dados da literatura (Spath; Mann, 2001). No caso do SRBio, foi estimado um CED de 2,4 que é comparável ao valor relatado por (Hajjaji *et al.*, 2016): 4,5 MJ/kg H<sub>2</sub>. A diferença entre resultados pode ser atribuída às necessidades de eletricidade para a reforma do biogás.

Por sua vez, as menores emissões de carbono associaram-se às rotas de reforma a vapor de etanol, visto que não haver emissões diretas fósseis de GEE no processo de síntese de H<sub>2</sub>. As emissões concentram-se nas etapas agrícolas da cana e do milho, que contabilizam mais de 80% do GWP para essa rota.

O estudo identificou um GWP de 4,1 kg CO<sub>2eq</sub>/kg H<sub>2</sub>. Considerando créditos por evitar a queima de biogás, (Yoo; Kim; Song, 2018) relataram 3,9 kg CO<sub>2eq</sub>/kg H<sub>2</sub> para biogás de aterros. No SREtOH, mais de 80% das emissões vêm do cultivo agrícola. O H<sub>2</sub> brasileiro derivado do etanol de milho tem 76% menos GWP comparado ao dos EUA (12,2 kg CO<sub>2eq</sub>/kg H<sub>2</sub>), devido ao uso de biomassa nas destilarias nacionais, enquanto as americanas usam combustíveis fósseis (Siddiqui; Dincer, 2019).

## CONCLUSÃO

Este estudo utilizou ACV para avaliar o desempenho ambiental da produção de H<sub>2</sub>, destacando o potencial sustentável das rotas baseadas em biomassa. O uso de combustíveis fósseis e fertilizantes nitrogenados durante o cultivo da biomassa eleva as emissões de GEE e o consumo de energia fóssil. Rotas baseadas em resíduos tendem a gerar emissões negativas, pois os impactos são atribuídos ao produtor da biomassa, mas o vazamento de metano pode comprometer esse balanço na rota SRBio.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Programa Institucional de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP nº 46.1) pelo apoio concedido ao mestrado de Douglas Peterson Munis da Silva. Agradecemos à FAPEMIG pelo aporte de recursos essenciais à execução desta pesquisa, por meio do projeto “Avaliação Teórica e Experimental da Produção e Utilização do Hidrogênio Verde em Minas Gerais” (Chamada 07/2021; PIBID 317-2022).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR ISO 14044:2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. 2009.
- BONOMI, A. *et al.* **Virtual Biorefinery**. Cham: Springer International Publishing, 2016. (Green Energy and Technology).
- ECOINVENT. Ecoinvent Version 3.9. *In*: 2023.
- HAJJAJI, N. *et al.* Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 14, p. 6064–6075, 2016.
- HREN, R. *et al.* Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 113113, 2023.
- LLORCA, J. *et al.* Hydrogen from Bioethanol. *In*: RENEWABLE HYDROGEN TECHNOLOGIES. [S. l.]: Elsevier, 2013. p. 135–169.
- MOREIRA, M. M. R. *et al.* Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 3, p. 209–216, 2020.
- NREL. **H2A: hydrogen analysis production case studies**. 2018.
- SANTANA, J. C. C. *et al.* Economic and Environmental Assessment of Hydrogen Production from Brazilian Energy Grid. **Energies**, v. 16, n. 9, p. 3769, 2023.
- SIDDIQUI, O.; DINCER, I. A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 12, p. 5773–5786, 2019.
- SPATH, P. L.; MANN, M. K. Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming, Technical Report (NREL/TP-570-27637). **National Renewable Energy Laboratory**, n. February, p. 1–16, 2001.
- VALENTE, A. *et al.* Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 47, p. 25758–25765, 2020.
- YOO, E.; KIM, M.; SONG, H. H. Well-to-wheel analysis of hydrogen fuel-cell electric vehicle in Korea. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 41, p. 19267–19278, 2018.