

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NOS ATERROS SANITÁRIOS GAÚCHOS: UMA ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA

JEFERSON PERES GOMES¹; BRUNO MULLER VIEIRA²; WILLIAN CEZAR
NADALETI³

¹Universidade Federal de Pelotas – gomesjefersonpg@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – bruno.prppg@hotmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – williancezarnadaletti@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 98,8% do resíduo sólido urbano (RSU) produzido no Rio Grande do Sul (RS) é adequadamente disposto em aterros sanitários, totalizando 2,51 milhões de toneladas por ano (MDR, 2021). Após ser disposta nos aterros, a parcela orgânica do RSU passa pelo processo de digestão anaeróbia, o qual gera o biogás como um dos seus principais produtos. O biogás é, na verdade, uma mistura de gases composta majoritariamente por metano (CH₄) e dióxido de carbono que é geralmente apenas queimada em flares para reduzir o impacto climático de sua emissão. Porém, após a purificação do biogás até o estágio de biometano, torna-se possível produzir hidrogênio verde (H₂V) a partir do, já consolidado, processo de reforma a vapor; o que permite, portanto, o reaproveitamento do metano que seria outrora desperdiçado.

O H₂V pode ser considerado como uma ponte para o desenvolvimento sustentável (BALAT, Mustafa; BALAT, Mehmet, 2009). Há dois principais motivos que levam a essa afirmação: o primeiro vem do fato de que o hidrogênio apresenta o maior poder calorífico dentre todos combustíveis conhecidos e o segundo tem relação com a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) promovida pelos sistemas de H₂V. Quando o mesmo é utilizado em veículos movidos a células a combustível (FCEVs), por exemplo, o único subproduto gerado no processo é o vapor de água, o que denota a relevância ambiental do processo.

Portanto, entende-se que o H₂V pode ser essencial para a descarbonização da economia gaúcha e que, devido à alta disponibilidade de biogás, os aterros sanitários podem representar uma fonte promissora para a produção do mesmo. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial produtivo e o custo da geração de H₂V a partir da reforma a vapor do biometano em aterros sanitários localizados no RS.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho teve início no levantamento dos aterros sanitários operantes no RS (MDR, 2021). Em seguida, os aterros de Minas do Leão, São Leopoldo, Santa Maria, e Caxias do Sul foram selecionados para compor a amostra em decorrência da considerável quantidade de RSU que recebem anualmente.

Posteriormente, o potencial de produção de metano foi estimado a partir da metodologia *tier 1* do *International Panel on Climate Change* (IPCC) (2000) seguindo as recomendações do IPCC (2006), utilizando uma composição gravimétrica base para os RSU do estado, e considerando que seria possível recuperar apenas 55% do metano produzido (GOVERNO DO RS, 2014).

Em seguida, o potencial de produção de H₂V foi calculado com base no processo de reforma a vapor do biometano. Portanto, se considerou uma perda de 3% devido ao processo de purificação do biogás, um fator de capacidade de 95% e uma taxa de

conversão de $2,46 \text{ Nm}^3\text{H}_2/\text{Nm}^3\text{CH}_4$ (NOCK et al., 2014; SAUR e MILBRANDT, 2014; IEA, 2017).

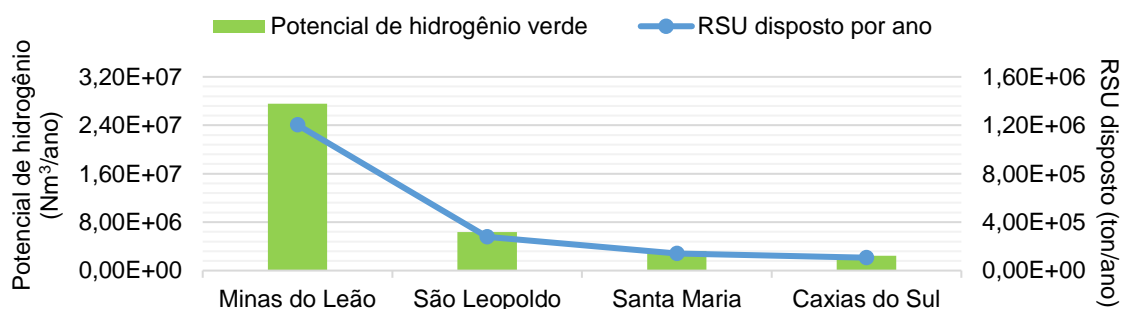
Após, se fez a estimativa do número de FCEVs que poderia ser abastecido pelo potencial de H_2V dos aterros (MMA, 2014; H2.LIVE, c2022; KANE, 2018; PELEGI, 2018). A seguinte distribuição do potencial foi considerada: 40% para abastecer caminhões pesados, 40% para ônibus urbanos, e 20% para automóveis leves (carros). Além disso, também se fez o cálculo da redução das emissões de GEE gerada pela substituição da frota tradicional por FCEVs (MMA, 2014).

Por fim, o custo nivelado da produção de hidrogênio (LCOH) foi estimado seguindo a metodologia de Silveira e Gomes (1999). Assim, os gastos com capital foram estimados a partir do método de custo-para-capacidade utilizando *Chemical engineering plant cost indexes* (CEPCI) para a atualização temporal dos valores (TOWLER e SINNOTT, 2008; MAXWELL, 2020). Ademais, os gastos com operação e manutenção foram baseados em custos com água, eletricidade, mão de obra e seguro da planta (CIUCHI, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, o potencial de produção de H_2V dos aterros sanitários selecionados é apresentado.

Figura 1 – potencial de hidrogênio verde dos aterros sanitários estudados



O aterro sanitário de Minas do Leão exibiu o maior potencial de H_2V dentre os quatro estudados. Isso ocorreu porque o mesmo abriga 48% de todo RSU disposto corretamente no RS, sendo o maior aterro do estado (MDR, 2021). A quantidade de RSU disposta nos aterros é determinante para a estimativa do potencial de H_2V uma vez que a metodologia utilizada considera que tais parâmetros possuem uma relação linear positiva entre si (IPCC, 2000). Assim sendo, os aterros de São Leopoldo, Santa Maria e Caxias do Sul apresentaram potenciais menores já que são o destino final de 11; 5,6; e 4,2% dos RSU dispostos no estado (MDR, 2021).

Os resultados da aplicação analisada para o potencial de H_2V estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – resultados da aplicação do potencial de hidrogênio dos aterros sanitários no setor de transportes

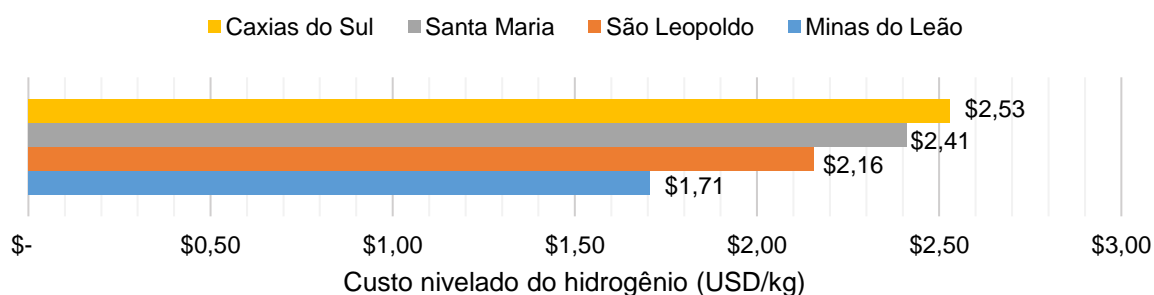
Aterro sanitário	Nº de carros (20%)	Nº de ônibus urbanos (40%)	Nº de caminhões pesados (40%)	Emissões evitadas (tonCO ₂ e/ano)
Minas do Leão	6.586	376	238	2,78E+05
São Leopoldo	1.521	87	55	6,42E+04
Santa Maria	775	44	28	3,27E+04
Caxias do Sul	583	33	21	2,46E+04
Total	9.465	540	342	4,00E+05

Seria possível abastecer automóveis leves em maiores quantidades que qualquer outro tipo de veículo de célula a combustível embora apenas 20% do potencial de H₂V seja direcionado para isso. Isso ocorreu por dois principais motivos. Primeiramente, porque carros percorrem uma distância anual cerca de cinco vezes menor que os veículos mais pesados (MMA, 2014). E, em segundo lugar, porque automóveis leves movidos a células a combustível apresentam uma economia de combustível significativamente alta, em torno de 115 km/kgH₂ (H2.LIVE, c2022).

A quantidade de FCEVs que poderia ser abastecida nos aterros não é significativa em contraste com a atual frota de veículos do estado, pois representa apenas cerca de 1% da mesma (MI, 2022). Contudo, vale ressaltar que aterros sanitários se situam próximos à demanda urbana de combustíveis, o que diminui os gastos com infraestrutura e facilita a introdução do hidrogênio no setor. Além disso, também vale observar que a circulação dos FCEVs abastecidos pelo potencial de H₂V dos aterros causaria a redução de 3% das emissões de GEE do setor de transportes do RS (SEEG, 2019).

Os resultados da análise econômica conduzida no presente estudo estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Custo nivelado do hidrogênio para os aterros analisados



Em decorrência do efeito de economia de escala, o aterro de Minas do Leão apresentou o menor LCOH entre os quatro. Tal aterro mostrou-se, inclusive, capaz de alcançar um custo de produção menor que a meta internacionalmente reconhecida de 2 USD/kg, a qual, em diversos contextos, denota o início da viabilidade econômica dos sistemas de H₂V. Ademais, o aterro de São Leopoldo exibiu um custo apenas 8% maior que a meta mencionada, mostrando que mesmo aterros sanitários menores podem alcançar custos positivos. Os demais aterros, embora não tenham ficado próximos aos 2 USD/kg, ainda apresentaram custos consideravelmente promissores ao estarem abaixo de 3 USD/kg.

4. CONCLUSÕES

A geração de hidrogênio verde nos aterros sanitários gaúchos permite uma produção localizada próxima a demanda urbana, de baixo custo e ambientalmente amigável. Além disso, também possibilita o desenvolvimento da economia circular por meio do reaproveitamento do biogás. Portanto, é possível inferir que a produção de hidrogênio verde nos aterros sanitários gaúchos pode representar uma estratégia fundamental para o desenvolvimento do setor no estado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALAT, Mustafa; BALAT, Mehmet. Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**. v.34, n.9, p. 3589-3603. 2009.

CIUCHI, I. **Modelling of Hydrogen production systems through Steam Methane Reforming and CO₂ capture for industrial application**. 2019. 128f. Dissertação (Mestrado em Inovação em Produção de Energia e Energia Nuclear) – Politécnico de Torino.

GOVERNO DO RS – GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul 2015-2034**. Porto Alegre - RS. 2014.

H2.LIVE. **Hydrogen cars**. c2022. Acessado em: 01 dez. 2021 Online. Disponível em: <https://h2.live/en/fahren/>.

IEA. **Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS**. Cheltenham, United Kingdom. 2017.

IPCC – International Panel on Climate Change. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Volume 5, Waste. Hayama – Japan, 2006.

IPCC. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama – Japan. 2000.

KANE, M. **Hyundai and H₂ Energy to Launch 1,000 Hydrogen trucks in Switzerland**. 2018. Acessado em: 01 dez. 2021 Online. Disponível em: <https://insideevs.com/news/340501/hyundai-and-h2-energy-to-launch-1000-hydrogen-trucks-in-switzerland/>.

MAXWELL, C. **Cost indices**: Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI). 2020. Acessado em: 02 nov. 2021 Online. Disponível em: <https://www.toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/#chemical-engineering-plant-cost-index-cepci>.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos**. Brasília – DF. 2021.

MI – MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Frota de veículos – 2022**. 2022. Acessado em: 19 jul. 2022 Online. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasília – DF. 2014.

NOCK, W. J. et al. Modeling the Water Scrubbing Process and Energy Requirements for CO₂ Capture to Upgrade Biogas to Biomethane. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. v.53; n.32. p.12783-12792. 2014.

PELEGI, A. **Ônibus movido a hidrogênio desenvolvido no Brasil é destaque em conferência mundial**. 2018. Acessado em: 01 dez. 2021 Online. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2018/06/17/onibus-movido-a-hidrogenio-desenvolvido-no-brasil-e-destaque-em-conferencia-mundial/>.

SAUR, G.; MILBRANDT, A. **Renewable Hydrogen Potential from Biogas in the United States**. Golden, United States of America. 2014.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissões por município**. 2019. Acessado em: 20 jul. 2022 Online. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/cities/statistics>.

SILVEIRA, J.L.; GOMES, L.A. Fuel cell cogeneration system: a case of technoeconomic analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.3, n.2-3, p. 233-242. 1999.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. **Chemical Engineering Design**: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. Burlington: Elsevier, 2008, 1ed.