

## ESTUDO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DE ENERGIA EÓLICA

MARCELA PLAMER LARROSSA<sup>1</sup>; MAELE COSTA DOS SANTOS<sup>2</sup>;  
JONES BITTENCOURT MACHADO<sup>3</sup>; THALIA SILVA DE SOUZA<sup>4</sup>;  
WILLIAN CÉZAR NADALETI<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas/UFPEL – marcelalarrossa947@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas/UFPEL – maelesantosengq@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas/UFPEL – jones.bittencourt@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas/UFPEL – thaliadepp@hotmail.com

<sup>5</sup>Universidade Federal de Pelotas/UFPEL – williancezarnadaletti@gmail.com

### 1. INTRODUÇÃO

A redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em setores ligados à energia enfrenta um obstáculo - a necessidade de combustíveis fósseis, que são responsáveis pela maioria das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no planeta. Nesse contexto, torna-se urgente buscar soluções energéticas limpas e sustentáveis. Uma alternativa viável é o hidrogênio verde, assim intitulado por ser produzido por meio da eletrólise da água, um processo que separa hidrogênio e oxigênio utilizando eletricidade (RAMAKRISHNAN *et al.*, 2024). Quando essa eletricidade provém de fontes renováveis, como a eólica, a produção de hidrogênio (H<sub>2</sub>) ocorre sem gerar emissões de GEE. Portanto, o hidrogênio verde representa uma solução estratégica para descarbonizar setores industriais e de transporte de difícil eletrificação, contribuindo de forma significativa para a transição energética e o enfrentamento das mudanças climáticas (OLIVEIRA; BESWICK; YAN, 2021).

A energia excedente gerada em usinas eólicas do Sul do Brasil, de natureza intermitente e dependente da capacidade da rede elétrica em absorver a produção, pode ser aproveitada de maneira estratégica para a produção de hidrogênio verde em usinas *OnShore*. Esse aproveitamento evita perdas energéticas e possibilita a conversão do excedente em uma fonte limpa e de alto valor agregado, contribuindo para a diversificação da matriz energética, a redução das emissões de gases de efeito estufa e o fortalecimento da segurança energética regional (SOUZA *et al.*, 2024).

Portanto, este estudo tem por objetivo avaliar o potencial de produção de hidrogênio verde a partir do aproveitamento da energia excedente gerada por usinas eólicas no Rio Grande do Sul - Brasil, considerando três diferentes cenários de disponibilidade energética.

### 2. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo foram utilizados os dados de geração anual de energia eólica no Rio Grande do Sul, disponíveis no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2025). Foram considerados três cenários (I-3%, II-7% e III-20%) de energia excedente ( $P_E$ ) que é desperdiçada pela rede (MACEDO, PEYERL, 2025) ou que poderia ser destinada somente à produção de hidrogênio. Com os dados obtidos da ONS, foram estimados a geração de hidrogênio verde ( $P_{H_2}$ ), a geração de energia química ( $EQ$ ), elétrica ( $EE$ ) e o armazenamento de hidrogênio ( $V_c$ ) em cilindros comprimidos, conforme mostra as Equações (1), (2), (3) e (4) abaixo, seguindo as metodologias proposta por Gupta (2008), Ayodele *et al.*, (2019) e Souza *et al.*, (2024). Além disso, foi considerado uma célula do tipo PEM para o processo de eletrólise, com a energia consumida pelo eletrolisador

( $ec_{el}$ ) de 5,5 kWh.Nm<sup>3</sup> e eficiência de conversão ( $\eta_c$ ) de 76%. O potencial de energia excedente ( $P_E$ ) em kWh/ano, foi obtido considerando os cenários propostos.

$$P_{H_2} \left( \frac{Nm^3}{ano} \right) = \frac{P_E \cdot \eta_c}{ec_{el}} \quad (1)$$

$$EQ \left( \frac{MJ}{ano} \right) = P_{H_2} \cdot PCI_{H_2} \quad (2)$$

$$EE \left( \frac{kWh}{ano} \right) = EQ \cdot \eta \cdot 0,2778 \quad (3)$$

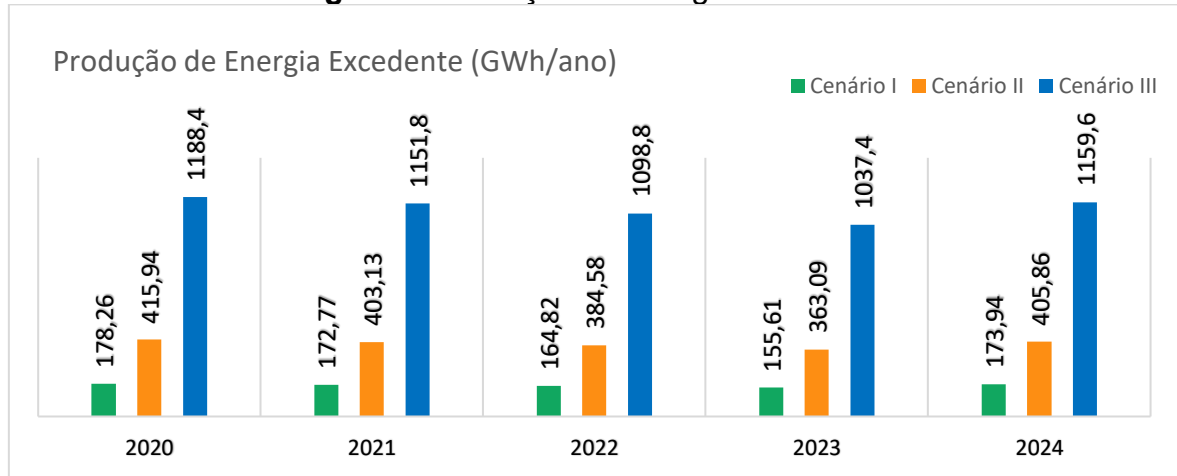
$$V_c (m^3) = \frac{m_{H_2} \cdot \eta_{compressão}}{d_{H_2C}} \quad (4)$$

Em que:  $PCI_{H_2}$  é o poder calorífico do H<sub>2</sub> de 10,77 (MJ/m<sup>3</sup>);  $\eta$  é a eficiência do gerador de energia elétrica sendo de 70%;  $m_{H_2}$  é a massa de H<sub>2</sub> em (kg);  $\eta_{compressão}$  é a eficiência de compressão (95%) e  $d_{H_2C}$  é a densidade do gás H<sub>2</sub> comprimido sendo de (36 kg/m<sup>3</sup>).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o potencial de energia excedente nos últimos cinco anos para os cenários estudados:

**Figura 1.** Produção de energia excedente no RS

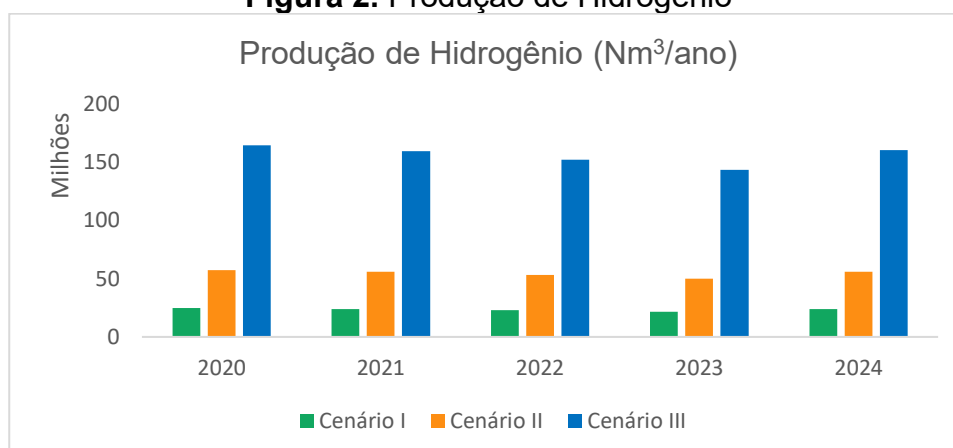


Fonte: Autores (2025).

Observou-se que o Cenário I apresentou os menores valores, variando de 178,26 a 155,61 GWh/ano, enquanto o Cenário II registrou potencial intermediário, com 415,94 a 363,09 GWh/ano, e o Cenário III destacou-se como o mais promissor, com valores entre 1.188,4 e 1.037,4 GWh/ano. Embora tenha ocorrido uma leve redução na geração de energia em 2023, a geração anual no RS de energia eólica apresenta pouca variação anual, corroborando desta forma para seu uso na geração de H<sub>2</sub> verde. De acordo com Macedo e Peyerl (2022), cerca de 93% da energia gerada em eólicas e solares é utilizada, o restante torna-se excedente e com este em torno de 3%, a planta poderia se dedicar à geração de H<sub>2</sub> apenas por 700 horas ao longo do ano.

A Figura 2 apresenta a produção de hidrogênio em milhões de Nm<sup>3</sup>/ano em média, no período entre 2020 e 2024, evidenciando as diferenças significativas entre os cenários analisados:

**Figura 2. Produção de Hidrogênio**



Fonte: Autores (2025).

O Cenário I (3%) apresentou os menores valores, mantendo-se estável em torno de 25 milhões de Nm<sup>3</sup>/ano, refletindo baixa capacidade de expansão. O Cenário II (7%) mostra desempenho intermediário, com potencial de geração variando entre 50 a 60 milhões de Nm<sup>3</sup>/ano. Já o Cenário III (20%) se destaca por apresentar os maiores volumes, superiores a 143 milhões Nm<sup>3</sup>/ano, com baixas oscilações anuais, considerando a forte dependência climática da geração de energia. Esses resultados indicam que o Cenário III é o mais promissor para a ampliação da produção de hidrogênio, possivelmente associado a maiores investimentos tecnológicos e estratégicos, enquanto os demais representam alternativas de menor competitividade.

Souza *et al.*, (2024) analisaram o potencial de geração de H<sub>2</sub> verde para a região Sul do Brasil, considerando potencial de energia excedente de usinas eólicas e hidrelétricas em cenários de 5% e 3%. Para o Rio Grande do Sul nos cenários de 5% e 3% foi encontrado um potencial de 9,57E+06 Nm<sup>3</sup> e 5,74E+06 Nm<sup>3</sup>. Segundo Macedo e Peyerl (2022), para gerar hidrogênio de forma economicamente viável, as usinas devem operar acima de 3.000 horas e CAPEX deve custar menos de US\$ 650/kWe para armazenar. A Tabela 1, apresenta os resultados das estimativas da energia química, elétrica, massa de hidrogênio obtida pela densidade e volume comprimido de armazenamento:

**Tabela 1.** Estimativas do potencial de energético na geração de hidrogênio

Cenários	EQ (MJ/ano)	EE (kWh/ano)	mH2 (kg)	Vc (m <sup>3</sup> )
I	2,57E+08	5,00E+07	2,00E+06	5,28E+04
II	6,00E+08	1,17E+08	4,67E+06	1,23E+05
III	1,71E+09	3,33E+08	1,33E+07	3,52E+05

Fonte: Autores (2025).

Como esperado conforme destina-se energia excedente para a geração de hidrogênio, maiores são os valores dos produtos energéticos obtidos, destacando o cenário III. As energias química e elétrica encontradas em uma média anual para o cenário III foram cerca de 1,71E+09 MJ/ano e 3,33E+08, respectivamente. Enquanto que a massa de hidrogênio em média anual foi de no máximo 13 300 toneladas. Esta massa, quando armazenada em cilindros comprimidos, poderia gerar cerca de 352 000 m<sup>3</sup>. Este volume seria o suficiente para preencher cerca 35

mil cilindros de 10 m<sup>3</sup>, que poderiam então ser acoplados a pequenos veículos de transporte, como carros ou comercializados para a indústria química e de fertilizantes, por exemplo (SANTOS *et al.*, 2025).

#### 4. CONCLUSÕES

A geração de hidrogênio a partir do excesso de energia renovável se encaixa nos princípios da economia circular, por se tratar de uma fonte de energia limpa e de baixo impacto. A inclusão do hidrogênio na matriz energética contribui para fortalecer a segurança e a equidade do abastecimento, além de acelerar a mudança para um setor com menor emissão de carbono no Sul do Brasil. Contudo, este estudo recomenda uma análise da viabilidade econômica da implantação deste sistema energético, considerando estes e outros cenários de energia excedente, além de quantificar a capacidade de redução de CO<sub>2</sub> que a troca de combustíveis fósseis por hidrogênio pode proporcionar.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYODELE, T. R.; MUNDA, J. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 33, p. 17669-17687, 2019.

GUPTA, R. B. (Ed.). **Hydrogen fuel: production, transport, and storage**. CRC press, 2008.

MACEDO, S. F.; PEYERL, D. Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 19, p. 10460-10473, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.133>

OLIVEIRA, A. M.; BESWICK, R. R.; YAN, Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 33, p. 100701, 2021. DOI: [10.1016/j.coche.2021.100701](https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701)

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Geração de Energia**. 2025. Disponível em: [https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao\\_energia.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx). Acesso em: 04 de Agosto de 2025

RAMAKRISHNAN, S.; DELPISHEH, M.; CONVERY, C.; NIBLETT, D.; VINOTHKANNAN, M.; MAMLOUK, M. Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 195, p. 114320, 2024.

SANTOS, M. et al. Biogas, hydrogen, green ammonia and electricity production from canned peach processing residues: Aspects of the circular economy for the Brazilian agroindustry. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 105, p. 45-55, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.173>

SOUZA, E. G. de; NADALETI, W. C.; THUE, P. S.; SANTOS, M. C. dos. Exploring the capacity and economic viability of green hydrogen production by utilising surplus energy from wind farms and small hydropower plants in Southern Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 64, p. 1-14, 25 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.155>