

RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

Felipe Ferreira de Souza Campos

felipe.fsc@aluno.ufop.edu.br

Universidade Federal de Ouro Preto

Ronilson Rocha

rocha@ufop.edu.br

Universidade Federal de Ouro Preto

Palavras-chave: produção de hidrogênio; calor residual; gerador termoelétrico; célula a combustível.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade exerce atualmente uma pressão para redução das emissões de CO₂ com o intuito de mitigar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade. No contexto da descarbonização, o hidrogênio é apontado como uma alternativa crucial para setores intensivos de energia, com potencial para transformar a matriz energética global. O calor residual de processos industriais pode ser capturado e armazenado usando geradores termelétricos para eletrólise da água, produzindo assim o hidrogênio, o qual pode ser aproveitado posteriormente para gerar eletricidade ou energia térmica. Além disso, a expansão do uso do hidrogênio provocaria mudanças geopolíticas significativas, com a possibilidade de transformar as relações socioeconômicas, energéticas e de preservação do planeta.

1.1. Pergunta Problema e Objetivos

Como o hidrogênio pode se tornar uma alternativa potencial e viável para muitos desafios associados à transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável? Este resumo sintetiza os avanços de pesquisas quanto à importância do hidrogênio como vetor energético, especialmente quando produzido a partir da recuperação de calor residual, uma solução inovadora e sustentável.

1.2 Relevância

Segundo previsão da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), a demanda global de energia está crescendo, com uma previsão de aumento entre 25% e 30% até 2040, o que aumentaria as emissões de CO₂ devido à dependência dos combustíveis fósseis. Neste sentido, o hidrogênio se destaca como uma excelente fonte de energia para a descarbonização, por ser capaz de armazenar e prover grandes quantidades de energia. Esta solução é muito atraente, pois o hidrogênio pode gradualmente substituir os tradicionais combustíveis e ser produzido a partir da recuperação do calor residual proveniente de gases de escape, uma energia térmica que seria naturalmente perdida.

2. MÉTODO

Esta revisão sistemática analisou estudos sobre a utilização de geradores termelétricos para a recuperação de calor residual e sua aplicação na produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água. Foram selecionadas fontes acadêmicas relevantes que exploram a integração de geradores termelétricos com células a combustível e sistemas de eletrólise. A pesquisa focou em como a eletricidade gerada pelos termelétricos pode alimentar células eletrolíticas para produzir hidrogênio de forma eficiente e sustentável. A análise ainda incluiu a identificação de desafios e impactos positivos, proporcionando uma visão das inovações na produção de hidrogênio e na eficiência energética.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Santos e Santos (2005) retratam que o hidrogênio é o elemento mais abundante e mais leve do universo, além de ser o mais simples da tabela periódica. Desse modo, um método promissor e não agressivo ao meio ambiente para a obtenção de hidrogênio é a eletrólise da água usando um eletrolisador com membranas de troca de prótons (PEM). Esse método, estudado no final dos anos 80 e 90, tem a vantagem de produzir hidrogênio de forma totalmente limpa. Christopher e Dimitrios (2012) descrevem que o uso de energia limpa torna-se uma questão urgente à medida que a demanda energética continua a aumentar. Nesse sentido, o hidrogênio se destaca como um portador de energia limpa, a depender do seu método de produção (Tabela 1).

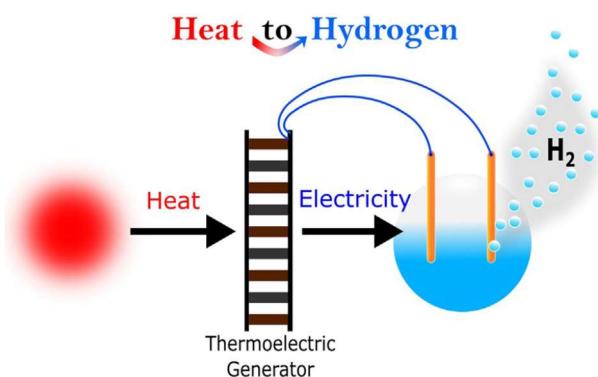
Tabela 1 – Métodos de produção de hidrogênio.

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência energética
Água	Eletrólise alcalina	61% a 82%
Biomassa	Termólise via pirólise	35% a 50%
Biomassa	Termólise via gaseificação	35% a 50%
Carvão	Termólise via gaseificação	74% a 85%
Hidrocarbonetos	Oxidação parcial de combustíveis fósseis	60% a 75%
Gás natural	Reforma de metano a vapor	74% a 85%

Fonte: Lara e Richter (2023).

De acordo com Mulla e Dunnill (2019), a energia térmica pode auxiliar na produção de hidrogênio por meio de unidades de eletrólise que podem operar a temperaturas mais elevadas com calor fornecido externamente. Alternativamente, unidades de eletrólise podem ser integradas com tecnologia termelétrica, onde um gradiente de calor gera a corrente necessária para a eletrólise (Figura 1). Isso permite capturar energia térmica desperdiçada e convertê-la em hidrogênio.

Figura 1 – Representação esquemática da produção de hidrogênio.



Fonte: Mulla e Dunnill (2019).

O Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2, 2021) destaca que o desenvolvimento da economia do hidrogênio tem sido uma prioridade para vários países, incluindo o Brasil. Em 2019, o mercado global de hidrogênio foi avaliado entre US\$ 110 e US\$ 136 bilhões, com previsões de crescimento substancial, podendo alcançar até US\$ 200 bilhões. Este crescimento é impulsionado pela necessidade de descarbonizar a economia mundial para cumprir as metas do Acordo de Paris até 2050.

Segundo Upadhyumchard (2014), o calor residual pode ser definido como a energia térmica emanada de um processo a uma temperatura superior à temperatura ambiente da instalação, sendo que uma fração significativa desse calor é potencialmente recuperável e reutilizável de maneira economicamente viável. Dessa forma, a geração de calor residual é primariamente atribuída a dois fatores: ineficiências dos equipamentos e limitações

INOVA CONEPEI

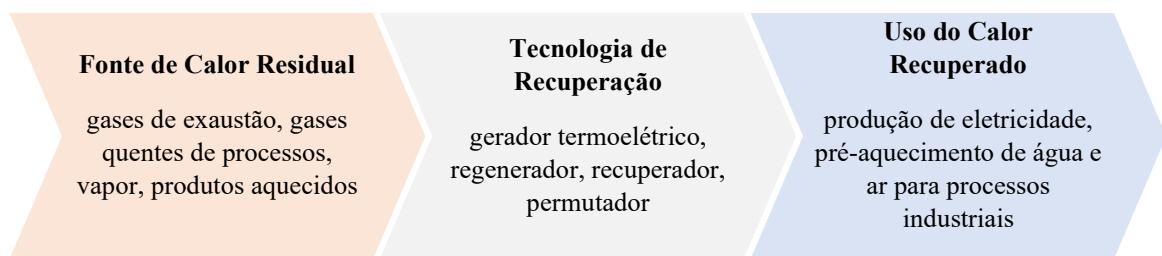
Congresso Nacional de Empreendedorismo, Pesquisa, Extensão e Inovação:
Integração entre o Mundo Acadêmico, Governo, Empresas e Sociedade

CENTRO DE INOVAÇÃO INOVA USCS
PARA O DESENVOLVIMENTO REGIONAL

Finep
INovação e Pesquisa

termodinâmicas intrínsecas aos equipamentos e processos. Este calor residual pode representar entre 20% e 50% do consumo energético industrial e uma das maneiras para as empresas reduzirem seu consumo de energia é a implementação de tecnologias de recuperação de calor residual que resulta da presença simultânea de três componentes, destacados na Figura 2 (OYEDEPO; FAKEYE, 2020).

Figura 2 – Componentes de um sistema de recuperação de calor.

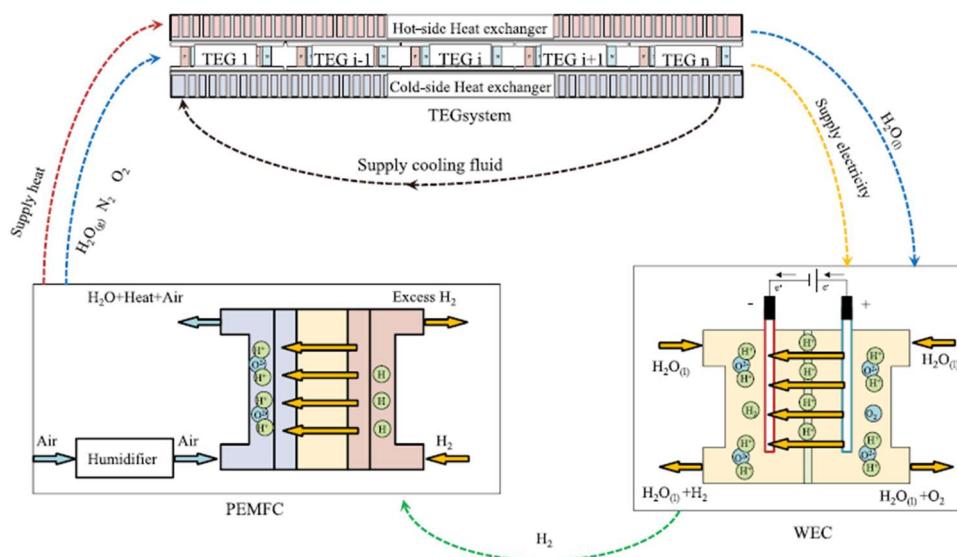


Fonte: Adaptado de Johnson, Choate e Davidson (2008).

Os módulos termoelétricos são dispositivos que realizam a conversão de energia térmica, proveniente de um gradiente de temperatura, em energia elétrica, ou vice-versa. O módulo termoelétrico gera uma corrente elétrica, absorvendo calor num dos extremos e rejeitando-o no outro; um módulo termoelétrico é composto por dois materiais semicondutores - um com carga positiva (tipo p) e outro com carga negativa (tipo n), ligados em série eletricamente e em paralelo termicamente (HENDRICKS; CHOATE, 2006).

Lan *et al.* (2023) investigaram um sistema (Figura 3) que combinou uma célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC), um gerador termoelétrico (TEG) e uma célula de eletrólise da água (WEC) para geração de energia e produção de hidrogênio com o objetivo de recuperar o calor residual dos gases de exaustão da PEMFC para gerar eletricidade adicional que foi então utilizada para produzir hidrogênio.

Figura 3 – Sistema PEMFC-TEG-WEC.

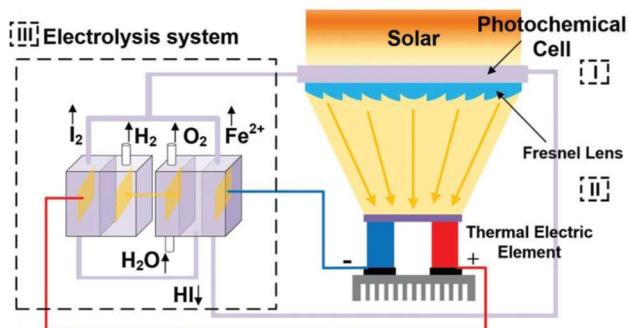

 Fonte: Lan *et al.* (2023).

A estrutura do sistema envolveu a passagem dos gases de exaustão pelo módulo TEG, permitindo a recuperação e utilização da energia térmica. Os resultados indicaram que o sistema integrado foi capaz de recuperar eficientemente o calor residual dos gases de exaustão da PEMFC, melhorando a eficiência geral, resultando em uma eficiência de até 28%. A eletricidade gerada pelos TEGs foi suficiente para alimentar a WEC, possibilitando a produção contínua de hidrogênio a uma taxa máxima de 46,4 ml/min ou 2,78 L/h, correspondente a uma eficiência de 2,8% (LAN *et al.*, 2023).

Ohta *et al.*, apud Mulla e Dunnill (2019), relataram a implementação de tecnologia termelétrica e exploraram um conceito denominado “*Heat to Hydrogen*” que utiliza a energia térmica desperdiçada para a produção de hidrogênio propondo uma unidade híbrida de divisão termoquímica da água que utiliza principalmente a radiação solar. O sistema (Figura 4) foi baseado em geradores termoelétricos que convertem calor em eletricidade para alimentar unidades de eletrólise da água. Três principais tipos de células eletrolíticas foram discutidos:

células de eletrólise alcalina (AFC), células de eletrólise de membrana de troca de prótons (PEMFC) e células de eletrólise de óxido sólido (SOFC).

Figura 4 – Modelo proposto de uma unidade híbrida de divisão de água.



Fonte: Mulla e Dunnill (2019).

O modelo foi estruturado subsistemas e foram realizadas análises de eficiência energética, considerando a relação entre a corrente aplicada e a quantidade de hidrogênio gerada. Também foram analisadas melhorias no design das células eletrolíticas que minimiza a resistência ôhmica e melhora a eficiência do sistema. O sistema híbrido demonstrou uma taxa de produção de hidrogênio de 1 litro por hora com uma eficiência estimada entre 15% e 25%. O conceito conseguiu aproximar a eficiência das células alcalinas à das células PEMFC, mas com custos de capital significativamente reduzidos devido à escolha de materiais disponíveis e à ausência de platina (MULLA; DUNNILL, 2019).

Os principais desafios dos trabalhos, supramencionados, envolveram a otimização do acoplamento térmico entre os módulos TEG e gases de exaustão, a otimização da captura e conversão de energia térmica em eletricidade e a implementação de tecnologias de eletrólise mais eficientes e economicamente viáveis. Além disso, foi necessário garantir a compatibilidade eletroquímica entre os diferentes componentes do sistema. Os impactos positivos incluem um aumento na eficiência energética global, redução nas emissões de gases de efeito estufa, devido ao aproveitamento do calor residual e à produção de hidrogênio como

fonte de energia limpa e a possibilidade de utilizar calor desperdiçado dos processos, contribuindo para a redução de desperdícios energéticos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recuperação de calor residual para produção de hidrogênio é uma abordagem inovadora que pode reduzir emissões e melhorar a eficiência energética. Tecnologias termoelétricas têm mostrado avanços na conversão de calor em eletricidade, contribuindo para a produção de hidrogênio verde e a descarbonização. Apesar dos desafios, pesquisas contínuas e desenvolvimento de materiais termoelétricos são essenciais para otimizar essas tecnologias. A colaboração entre setores e acadêmicos é crucial para promover uma transição energética mais sustentável.

REFERÊNCIAS

CHRISTOPHER, K.; DIMITRIOS, R. A review on exergy comparison of hydrogen production methods from renewable energy sources. *Energy & Environmental Science*, v. 5, n. 5, p. 6640–6651, 26 abr. 2012.

Electricity Market Report – Update 2023 – Analysis. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-update-2023>. Acesso em: 31 jul. 2024.

HENDRICKS, T.; CHOATE, W. **Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1218711/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

Hidrogenio Relatorio diretrizes.pdf. , [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatorioDiretrizes.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2024

JOHNSON, I.; CHOATE, W. T.; DAVIDSON, A. **Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry.** [s.l.] BCS, Inc., Laurel, MD (United States), 1 mar. 2008. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1218716>. Acesso em: 31 jul. 2024.

LAN, Yuncheng, LU, Junhui, MU, Lianbo, WANG, Suilin, ZHAI, Huixing. Waste heat recovery from exhausted gas of a proton exchange membrane fuel cell to produce hydrogen using thermoelectric generator. *Applied Energy*, v. 334, p. 120687, 15 mar. 2023.

CONEPEI

Congresso Nacional de Empreendedorismo, Pesquisa, Extensão e Inovação:
Integração entre o Mundo Acadêmico, Governo, Empresas e Sociedade

CENTRO DE INOVAÇÃO INOVA USCS
PARA O DESENVOLVIMENTO REGIONAL



LARA, D. M. DE; RICHTER, M. F. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos NAEA**, v. 26, n. 1, 27 abr. 2023.

MULLA, R.; DUNNILL, C. Powering the Hydrogen Economy from Waste Heat: A Review of Heat-to-Hydrogen Concepts. **ChemSusChem**, v. 12, 8 ago. 2019.

OHTA, T, ASAOKURA, S, YAMAGUCHI, M, KAMIYA, N, GOTOH, N, OTAGAWA, T. Photochemical and thermoelectric utilization of solar energy in a hybrid water-splitting system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 1, n. 2, p. 113–116, 1 jan. 1976.

OYEDEPO, S.; FAKEYE, A. WASTE HEAT RECOVERY TECHNOLOGIES: PATHWAY TO SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT. **Journal of Thermal Engineering**, v. 7, p. 324–348, 30 dez. 2020.

SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. Combustível “hidrogénio”. **Millenium**, p. 252–270, maio 2005.

UPATHUMCHARD, U. Waste Heat Recovery Options in a Large Gas-Turbine Combined Power Plant. **Open Access Theses**, 1 out. 2014.