

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO VIA REFORMA A VAPOR DO BIOGÁS UTILIZANDO WAR GUI

Arthur de Almeida Martins¹, Diego Rafael Mágero Elihimas¹, Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani¹, Caliane Bastos Borba Costa¹

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, Brasil (ra12879@uem.br/
arthurmartins2065@gmail.com)

Resumo: Neste trabalho, avaliou-se o impacto ambiental da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás utilizando o WAR GUI. Foram analisados cenários com diferentes fontes de eletricidade. Na ausência do impacto da eletricidade, o processo apresentou impacto global negativo. Ao considerar o impacto da geração de eletricidade, o processo que utiliza carvão como fonte para a produção de energia resultou no pior desempenho ambiental, com impacto positivo, enquanto o que utiliza gás natural apresentou impacto negativo e melhor desempenho, indicando a relevância da matriz energética..

Palavras-chave: Hidrogênio; Avaliação Ambiental; Reforma a vapor; Simulação; Biogás

INTRODUÇÃO

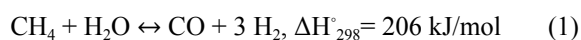
A transição energética global tem intensificado a busca por rotas produtivas mais limpas e pelo aproveitamento de recursos renováveis. Nesse cenário, o hidrogênio vem sendo apontado como um vetor energético de interesse crescente, sobretudo por não emitir dióxido de carbono em sua utilização final e por apresentar aplicações relevantes nos setores industrial, energético e de transportes.

Apesar desse potencial, a produção mundial de hidrogênio ainda depende majoritariamente de fontes fósseis. A reforma a vapor do metano oriundo do gás natural permanece como a principal rota industrial, respondendo por aproximadamente 50% da produção mundial de hidrogênio, enquanto parcela relevante adicional está associada ao refino de petróleo, gaseificação de carvão e outras fontes convencionais (Szablowski *et al.*, 2025). Entretanto, esse processo está ligado ao consumo de combustíveis fósseis e à emissão de gases de efeito estufa. Cho *et al.* (2022) destacam que a substituição de matérias-primas convencionais por alternativas renováveis pode reduzir em até 78,1% o potencial de aquecimento global, dependendo da rota adotada.

Entre as alternativas disponíveis, destaca-se o aproveitamento de resíduos agroindustriais. No contexto brasileiro, a vinhaça da cana-de-açúcar, um resíduo da destilação do etanol, tem o potencial de ser valorizada a novos produtos, como o biogás (Elihimas *et al.*, 2024). Quando submetida à digestão anaeróbia, a vinhaça pode ser convertida em biogás,

composto principalmente por metano e dióxido de carbono.

A reforma a vapor do biogás surge, portanto, como rota promissora para a produção de hidrogênio. Nessa tecnologia, o metano reage com vapor d'água, produzindo monóxido de carbono e hidrogênio. Em seguida, é possível realizar a reação de deslocamento gás-água (*Water Gas Shift*, WGS) para converter CO e ampliar a formação de hidrogênio. Essas duas reações são representadas, respectivamente, pelas Equações (1) e (2). O desempenho dessas etapas é fortemente influenciado por variáveis operacionais, como temperatura, pressão e razão molar H₂O/CH₄, as quais afetam diretamente o equilíbrio químico, a conversão do metano e a produção de hidrogênio.



Estudos anteriores reportaram a viabilidade da produção de hidrogênio por reforma do biogás proveniente de diferentes resíduos, como esterco suíno, esterco bovino e vinhaça (Madeira *et al.*, 2021; Tamilselvan *et al.*, 2024; Elihimas *et al.*, 2024). Contudo, ainda são limitadas as investigações voltadas à avaliação ambiental dessa rota quando aplicada especificamente ao biogás derivado da vinhaça, especialmente considerando a influência da fonte de eletricidade empregada no processo.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar ambientalmente a produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás utilizando o *software Waste Reduction Algorithm Graphic User Interface*

(WAR GUI) que é uma ferramenta gratuita da *Environmental Protection Agency* (EPA) que permite avaliar o impacto ambiental de processos industriais, com ênfase no efeito de diferentes matrizes energéticas sobre o desempenho ambiental do sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

O cenário avaliado neste trabalho foi baseado no estudo de Elihimas *et al.* (2024), no qual foi proposta a produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do biogás proveniente da vinhaça. O fluxograma adotado encontra-se apresentado na Figura 1.

Neste contexto, considerou-se a alimentação de biogás ao sistema com vazão total de 6.333 kg/h, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, sendo adotada a fração molar de 60% de CH_4 em base seca. O modelo termodinâmico utilizado na simulação foi o *Non-Random Two-Liquid* com equação de estado de Redlich-Kwong (NRTL-RK). Inicialmente, o biogás foi encaminhado ao reformador a vapor (B5), no qual reagiu com vapor d'água em excesso, sob condições operacionais de 972 K e 10 atm. A razão molar $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ foi fixada em aproximadamente 3, conforme o estudo de referência. Para representar essa etapa, utilizou-se um reator de Gibbs no simulador *Aspen Plus*, versão 15, considerando a ocorrência simultânea de múltiplas reações químicas e a formação dos componentes O_2 , H_2O , CH_4 , CO_2 , CO , $\text{C}_{(\text{s})}$ e H_2 . O gás de síntese produzido na etapa de reforma foi posteriormente encaminhado ao reator de deslocamento gás-água (B7), operando a 573 K e 10 atm, com o objetivo de converter monóxido de carbono em hidrogênio.

Nessa unidade, foi adotado um reator estequiométrico com 98% de conversão. Em seguida, a corrente foi submetida à etapa de purificação por membrana metálica, operando a 723 K e 10 atm. Considerou-se a eficiência de separação de 85%, resultando em uma corrente de hidrogênio com pureza molar superior a 99%. Por fim, incluiu-se uma etapa de compressão de até 200 bar, adequando o

produto final para transporte, armazenamento ou uso industrial.

Para a avaliação ambiental do processo, utilizou-se o *software* WAR GUI, ferramenta desenvolvida para estimar o potencial de impacto ambiental associado às correntes de processo e ao consumo energético. O método considera categorias como toxicidade humana, toxicidade aquática, potencial de aquecimento global e formação de ozônio, entre outras (EPA, 2023). A partir dos balanços de massa e energia obtidos no *Aspen Plus*, foi possível quantificar indicadores ambientais e comparar diferentes cenários operacionais.

Inicialmente, avaliou-se o desempenho intrínseco do processo, considerando apenas os impactos das correntes de entrada (*Iin*), saída (*Iout*) e geração interna (*Igen*), sem contabilizar a eletricidade consumida. As equações utilizadas para *Iin*, *Iout* e *Igen* estão detalhadas em Young *et al.* (2000). Na sequência, foram incorporados os impactos associados ao consumo de energia elétrica de equipamentos como compressores e bombas. Para essa etapa, utilizaram-se as três únicas fontes de geração elétrica disponíveis no banco de dados do *software* WAR GUI: carvão, gás natural e óleo combustível. A demanda total de eletricidade considerada foi de 1,68 MJ/s.

Dessa forma, foram avaliados quatro cenários para a rota de reforma a vapor: sem contabilização da eletricidade, eletricidade gerada a carvão, eletricidade gerada a gás natural e eletricidade gerada a óleo combustível. Cabe ressaltar que o *software* WAR GUI não permite a inserção de novas fontes energéticas, o que constitui uma limitação para o contexto brasileiro, cuja matriz elétrica apresenta predominância renovável.

A relação do impacto das correntes de saída com a eletricidade fornecida ao sistema foi calculada a partir de um fator denominado Índice de Impacto Energético (*IIE*). Esse índice permite quantificar o impacto ambiental por unidade de energia consumida, sendo calculado conforme a Equação (3).

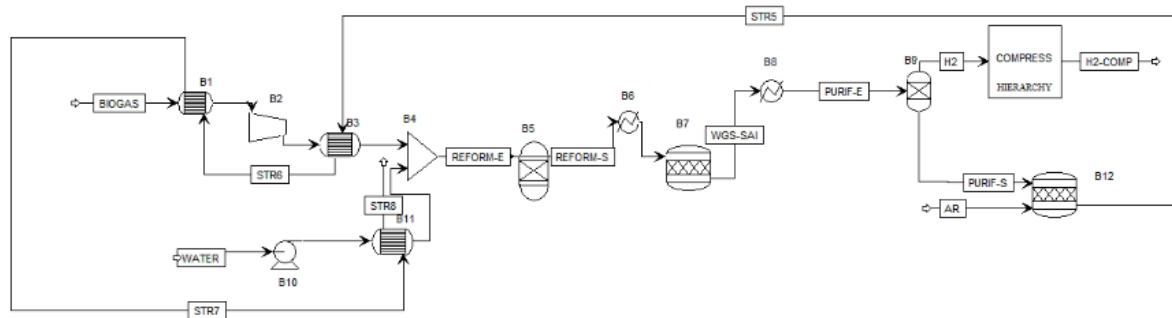


Figura 1. Fluxograma do processo de reforma a vapor.

Adicionalmente, com o objetivo de comparar o desempenho ambiental entre diferentes fontes energéticas, foi considerado o impacto ambiental total do processo, obtido a partir da soma dos impactos das correntes de saída e dos impactos gerados internamente, conforme descrito na Equação (4).

$$IEE = I_{out} / \text{Energia do processo} * 3600 \quad (3)$$

$$\text{Impacto} = I_{out} + I_{gen} \quad (4)$$

Realizou-se também a avaliação do impacto ambiental do processo, contemplando oito categorias de impacto: Potencial de Toxicidade Humana por Ingestão (*Human Toxicity Potential by Ingestion*, HTPI), Potencial de Toxicidade Humana por Exposição (*Human Toxicity Potential by Exposure*, HTPE), Potencial de Toxicidade Terrestre (*Terrestrial Toxicity Potential*, TTP), Potencial de Toxicidade Aquática (*Aquatic Toxicity Potential*, ATP), Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*, GWP), Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (*Ozone Depletion Potential*, ODP), Potencial de Criação de Ozônio Fotoquímico (*Photochemical Oxidation Potential*, PCOP) e Potencial de Acidificação (*Acidification Potential*, AP). Essas categorias permitem avaliar diferentes dimensões do impacto ambiental, abrangendo efeitos sobre a saúde humana, ecossistemas e atmosfera.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados da avaliação ambiental do processo de reforma a vapor do biogás da vinhaça para produção de hidrogênio, obtidos por meio do *software* WAR GUI. Os resultados estão organizados em quatro cenários, considerando: ausência de impacto da eletricidade e inclusão do impacto associado a diferentes fontes energéticas, carvão, gás natural e óleo combustível.

Os impactos da reforma a vapor, desconsiderando a contribuição do consumo de eletricidade, são apresentados na Figura 2. A análise dos índices de impacto ambiental por unidade de tempo (PEI/h) evidencia que o processo apresenta valor negativo para o termo de geração de impacto ($I_{gen} = -31,644$ PEI/h), indicando que as transformações químicas contribuem para a redução do potencial de impacto ambiental global. Por outro lado, o impacto associado às correntes de saída é positivo ($I_{out} = 3,369$ PEI/h), porém de baixa magnitude.

Como o valor absoluto de I_{gen} é aproximadamente nove vezes superior ao de I_{out} , o balanço ambiental global ($I_{out} + I_{gen}$) é negativo ($-28,275$ PEI/h), indicando comportamento ambientalmente favorável do processo na ausência de impactos energéticos. Esse resultado demonstra que as transformações

químicas promovem a conversão de compostos com maior potencial de impacto em produtos ambientalmente menos impactantes, reduzindo a carga ambiental líquida do sistema.

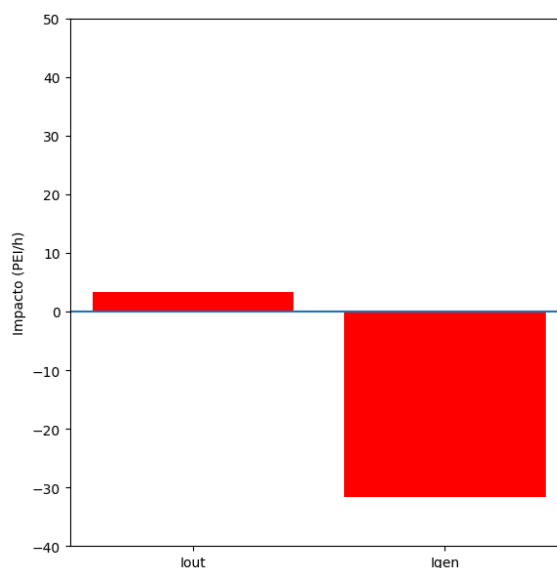


Figura 2. Potencial de impacto ambiental da reforma a vapor sem a contribuição do consumo de eletricidade.

Na análise com inclusão do consumo de eletricidade, a avaliação passa a considerar também os impactos indiretos associados ao fornecimento de energia. Considerando o carvão como fonte energética (Figura 3), observa-se que o impacto associado às correntes de saída é significativamente elevado ($I_{out} = 43,344$ PEI/h), superando o impacto gerado internamente ($I_{gen} = 8,341$ PEI/h). A inclusão da eletricidade proveniente do carvão promove uma mudança de sinal no impacto ambiental global, passando de $-28,275$ PEI/h (sem considerar o consumo de eletricidade) para $+51,685$ PEI/h, evidenciando que a matriz energética passa a dominar o desempenho ambiental do processo. Esse comportamento está diretamente associado às emissões indiretas de CO_2 , SO_x e NO_x , características da queima de carvão. O índice de impacto energético (IIE) obtido foi de aproximadamente $0,007$ PEI/MJ, indicando elevada intensidade ambiental por unidade de energia consumida.

Para o cenário com gás natural (Figura 4), observa-se redução expressiva do impacto ambiental em relação àquele que considera o uso de carvão. O impacto de saída permanece positivo ($I_{out} = 10,066$ PEI/h), porém significativamente inferior ao observado com carvão.

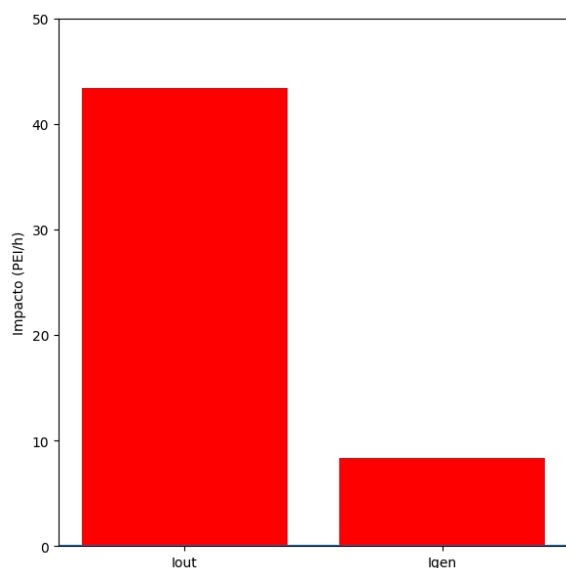


Figura 3 - Potencial de impacto ambiental da reforma a vapor considerando eletricidade oriunda do carvão.

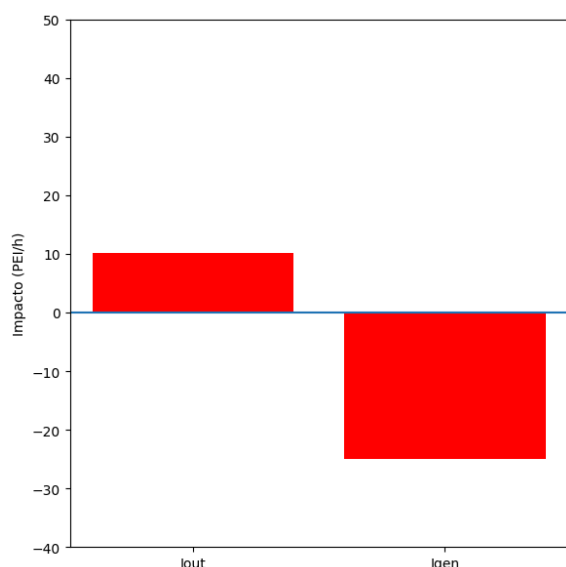


Figura 4 - Potencial de impacto ambiental da reforma a vapor com eletricidade oriunda de gás natural.

Além disso, o termo de geração apresenta valor negativo ($I_{gen} = -24,948$ PEI/h). Como resultado, o impacto ambiental global torna-se novamente negativo ($-14,882$ PEI/h), indicando que a substituição do carvão por gás natural não apenas reduz o impacto, mas restabelece o caráter ambientalmente favorável do processo. Esse comportamento é coerente com a maior eficiência de combustão e a menor intensidade de carbono do gás natural, comparado à eletricidade analisada no caso do carvão.

Por fim, no cenário com óleo combustível (Figura 5), o impacto total apresenta comportamento intermediário ($I_{out} = 29,430$ PEI/h e $I_{gen} = -5,580$

PEI/h), resultando em impacto global positivo. Embora haja contribuição negativa associada às transformações químicas, essa não é suficiente para compensar o impacto das emissões relacionadas à geração de energia. O índice de impacto energético obtido ($0,005$ PEI/MJ) posiciona o óleo combustível entre carvão e gás natural.

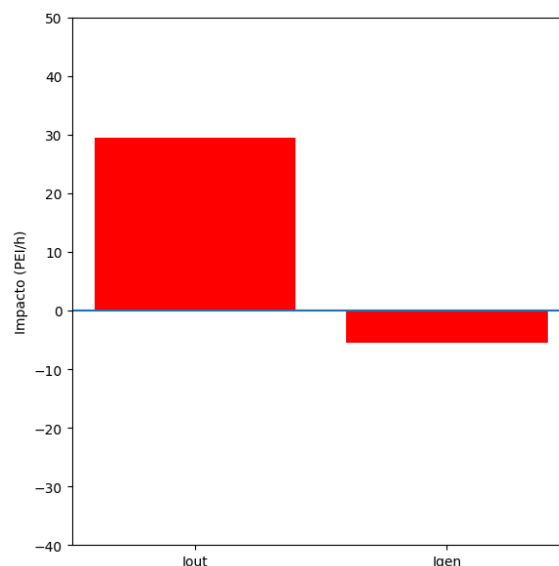


Figura 5 - Potencial de impacto ambiental da reforma a vapor com eletricidade oriunda de óleo combustível.

A Tabela 1 apresenta a comparação quantitativa dos cenários avaliados. A análise comparativa evidencia que o carvão apresenta o maior impacto ambiental total ($51,685$ PEI/h), seguido pelo óleo combustível ($23,850$ PEI/h) e pelo gás natural, que apresenta impacto negativo ($-14,882$ PEI/h). Esses resultados reforçam que a matriz energética é um fator determinante para o desempenho ambiental do processo.

A análise por categorias de impacto ambiental (Figuras 6 a 9) permite identificar os principais mecanismos responsáveis pelos impactos observados.

No cenário sem eletricidade (Figura 6), o impacto é dominado pelo potencial de aquecimento global (GWP = $2,39$ PEI/h), seguido pelo potencial de oxidação fotoquímica (PCOP = $0,58$ PEI/h) e pela toxicidade humana por exposição (HTPE = $0,41$ PEI/h), enquanto, em comparação com as demais categorias, estas apresentam contribuições desprezíveis.

Tabela 1. Tabela de comparação dos casos avaliados.

Fonte de eletricidade	Impacto total (PEI/h)	IEE	Fonte da eletricidade
Sem eletricidade	28,275	-	
Carvão	51,685	0,007	0,011
Gás natural	14,882	0,001	0,001
Óleo combustível	23,850	0,005	0,007

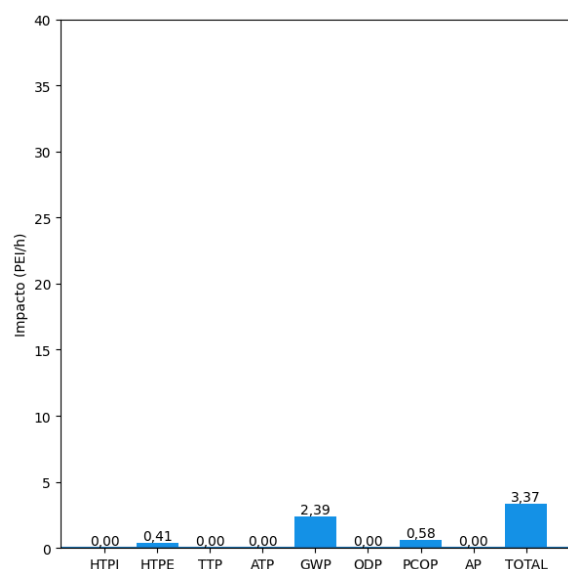


Figura 6 - Contribuição das categorias de impacto ambiental da reforma a vapor sem a contribuição do consumo de eletricidade.

Com a inclusão de eletricidade a partir do carvão (Figura 7) ocorre mudança significativa no perfil de impacto, com predominância do potencial de acidificação (AP de 36,00 PEI/h), seguido pelo GWP de 3,55 PEI/h e pelo ATP de 1,60 PEI/h. Esse resultado indica que a acidificação é o principal mecanismo de impacto associado à queima de carvão, devido às emissões de SO_2 e NO_x .

No caso do gás natural (Figura 8), o impacto total é reduzido (10,04 PEI/h), mantendo o AP como categoria dominante (6,01 PEI/h), porém com magnitude significativamente inferior. O potencial de aquecimento global permanece relevante (2,96

PEI/h), refletindo emissões de CO_2 associadas à combustão. O PCOP e o HTPE mantêm contribuições semelhantes às do cenário base.

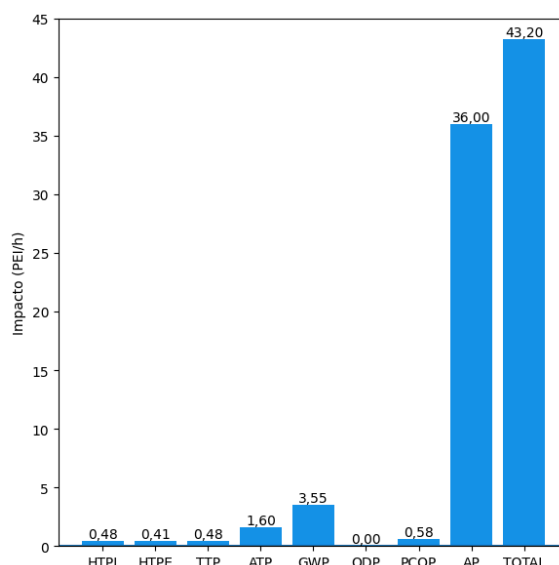


Figura 7 - Contribuição das categorias de impacto ambiental da reforma a vapor com eletricidade oriunda do carvão.

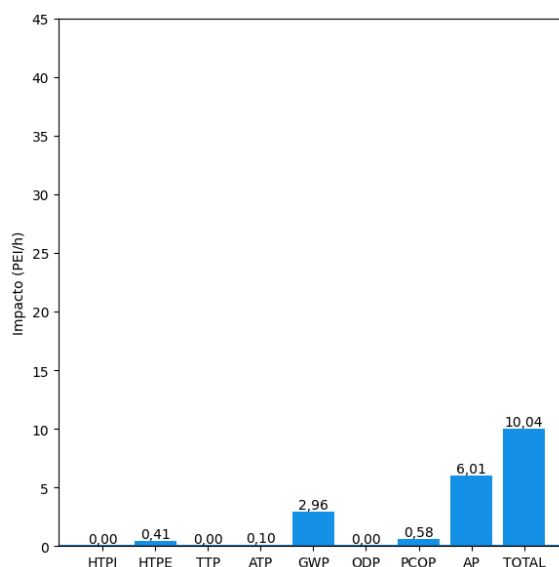


Figura 8 - Contribuição das categorias de impacto ambiental da reforma a vapor com eletricidade oriunda do gás natural.

Para o óleo combustível (Figura 9), o impacto total é intermediário (cerca de 30 PEI/h), com predominância novamente do potencial de acidificação (cerca de 23 PEI/h). O GWP contribui com 3,3 PEI/h, valor semelhante ao do carvão, e o ATP por volta de 1,3 PEI/h. O uso de óleo combustível para gerar eletricidade, embora menos impactante que o carvão, permanece mais prejudicial ao ambiente que o gás natural.

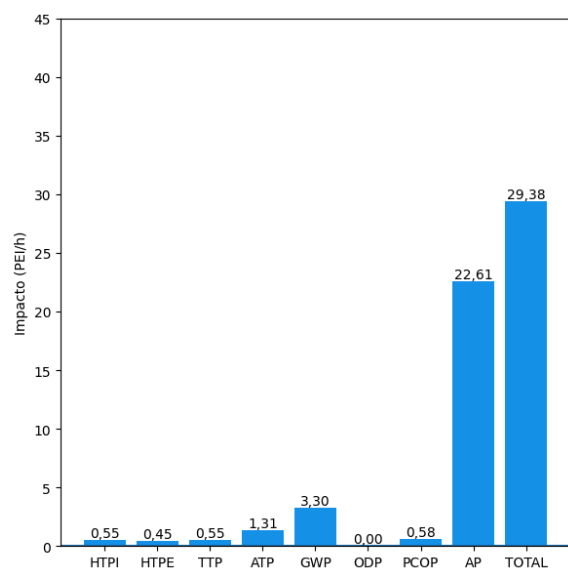


Figura 9 - Contribuição das categorias de impacto ambiental da reforma a vapor com eletricidade oriunda do óleo combustível.

A Figura 10 consolida a comparação entre os cenários. A análise conjunta dos cenários evidencia uma hierarquia clara de impacto ambiental, resultando em processo que utiliza eletricidade advinda do uso de carvão como causador de maior impacto, seguido por óleo combustível e, por fim, gás natural. Além disso, observa-se que o potencial de acidificação (AP) é o principal fator diferenciador entre as matrizes energéticas avaliadas, enquanto o potencial de aquecimento global (GWP) permanece relevante em todos os cenários com combustíveis fósseis, resultando na faixa de impacto de aproximadamente 3 PEI/h. Além disso, categorias como ODP, TTP e HTPI permanecem com contribuições nulas em quase todos os cenários.

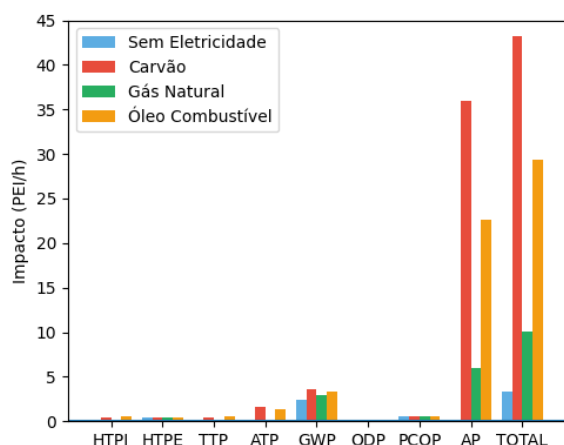


Figura 10 - Contribuição das categorias de impacto ambiental da reforma a vapor para os cenários analisados.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos por meio da ferramenta WAR GUI, conclui-se que o desempenho ambiental do processo de reforma a vapor para produção de hidrogênio é fortemente influenciado pela matriz energética adotada. Embora o valor de *I_{gen}* seja predominantemente negativo (−31,644 PEI/h), indicando que as transformações químicas contribuem para a redução do potencial de impacto ambiental, o impacto associado às correntes de saída e, principalmente, à fonte de eletricidade utilizada, determina o balanço ambiental global.

Na ausência de impactos energéticos, o processo apresenta caráter ambientalmente favorável (−28,275 PEI/h). No entanto, a inclusão do consumo de eletricidade pode inverter esse comportamento, como observado no cenário com carvão (51,685 PEI/h). Em contrapartida, o gás natural apresentou impacto líquido negativo (−14,882 PEI/h), configurando-se como a alternativa mais favorável entre as fontes avaliadas.

Observou-se também mudança no mecanismo dominante de impacto ambiental, com o potencial de aquecimento global (GWP) predominando no cenário sem contribuição do consumo de eletricidade e o potencial de acidificação (AP) tornando-se dominante nos cenários com combustíveis fósseis.

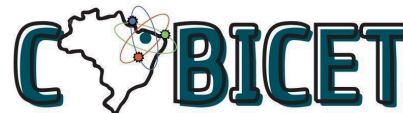
Dessa forma, a viabilidade ambiental da produção de hidrogênio via reforma a vapor do biogás depende fundamentalmente da escolha da matriz energética, sendo a descarbonização do suprimento energético um fator determinante. Como limitação, destaca-se que o software WAR GUI considera apenas fontes fósseis de energia, não representando adequadamente matrizes energéticas majoritariamente renováveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Estadual de Maringá (UEM), da empresa Origem Energia S.A., da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos 141891/2023-8, 307705/2025-0, 309026/2022-9 e 406544/2023-9.

REFERÊNCIAS

- CHO, H. H.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Environmental impact assessment of hydrogen production via steam methane reforming based on emissions data. **Energy Reports**, v. 8, p. 13585-13595, 2022.
- ELIHIMAS, D. R. M.; MARTINS, A.A. RAVAGNANI, M. A. S. S.; COSTA, C. B. B. Hydrogen production via steam reforming of biogas derived from sugarcane vinasse. XXI Convención



Científica De Ingeniería Y Arquitectura (CCIA 21), 2024, Havana. Memorias CCIA 2024, 2024. p. 953. Disponível em: https://ccia.cujae.edu.cu/public/Programa_General_y_Memorias_CCIA_2024.pdf.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). WAR Introduction and Tutorial. EPA, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/chemical-research/waste-reduction-algorithm-chemical-process-simulation-waste-reduction>.

MADEIRA, J. G. F.; OLIVEIRA, E. M.; SPRINGER, M. V.; CABRAL, H. L.; et al. Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis. **International journal of hydrogen energy**, v. 46, n. 13, p. 8961-8971, 2021.

SZABLOWSKI, L.; WOJCIK, M.; DYBINSKI, O. Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. **Energy**, v. 316, p. 134540, 2025.

TAMILSELVAN, R.; SELWYNRAJ, A. I. Model development for biogas generation, purification and hydrogen production via steam methane reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 50, p. 211-225, 2024.

YOUNG, D.; SCHARP, R.; CABEZAS, H. The waste reduction (WAR) algorithm: environmental impacts, energy consumption, and engineering economics. **Waste management**, v. 20, n. 8, p. 605-615, 2000.