

Desempenho ambiental de biorrefinarias de cana-de-açúcar com produção alternativa de hidrogênioJúlia Ramos da Silva Carvalho¹ (IC), Rafael Silva Capaz (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave: Análise do ciclo de vida. Etanol. Hidrogênio Verde H₂. Vinhaça.****Introdução**

A intensificação das mudanças climáticas, impulsionada pelo uso de combustíveis fósseis, tem motivado a busca por fontes alternativas e sustentáveis de energia. Nesse cenário, os biocombustíveis destacam-se como uma alternativa promissora, especialmente no contexto brasileiro, cuja matriz elétrica é majoritariamente composta por fontes renováveis. A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é uma das principais atividades da indústria sucroenergética nacional, gerando não apenas o biocombustível, mas também uma série de subprodutos com potencial energético e agrônomico.^[1]

Nos últimos anos, o hidrogênio verde tem ganhado destaque como vetor estratégico na transição energética, principalmente por seu potencial de descarbonização de setores de difícil eletrificação.^[1] O Brasil, por sua alta disponibilidade de biomassa e matriz elétrica limpa, apresenta condições favoráveis para a produção sustentável de hidrogênio a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, destaca-se a possibilidade de integrar a produção de hidrogênio verde aos sistemas de biorrefinarias já existentes, como as de etanol, otimizando o uso de subprodutos e ampliando os ganhos ambientais.^[1;2;3]

Dentre esses subprodutos, a vinhaça, resíduo líquido resultante da destilação do vinho fermentado, representa um dos maiores desafios ambientais da cadeia produtiva do etanol. Estima-se que sejam gerados entre 10 a 13 litros de vinhaça por litro de etanol produzido, contendo elevada carga orgânica (alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), baixo pH, elevada corrosividade e grande concentração de nutrientes como potássio, cálcio e magnésio.^[2; 4; 5] Embora tradicionalmente utilizada como biofertilizante em práticas de fertirrigação, o manejo inadequado da vinhaça pode causar impactos negativos significativos, como a contaminação de corpos hídricos e a emissão de gases de efeito estufa.^[6]

Diante da necessidade de aprimorar o aproveitamento sustentável desse subproduto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental vinhaça. A Análise do Ciclo de Vida (ACV), no ciclo de vida do

etanol, comparando um cenário convencional, onde a vinhaça sai concentrada da etapa industrial e é enviada para fertirrigação, e um cenário alternativo, onde, antes de retornar ao campo, a vinhaça é encaminhada para biodigestão anaeróbia, com posterior aproveitamento e *upgrading* do biogás para a produção de hidrogênio verde (H₂). Ao propor a valorização energética da vinhaça por meio de rotas tecnológicas alternativas, este estudo busca contribuir para o aperfeiçoamento dos sistemas produtivos da indústria sucroenergética e reforçar o papel estratégico do hidrogênio na transição para uma matriz energética de baixo carbono no Brasil.^[2; 6; 7]

Metodologia**Avaliação do Ciclo de Vida**

A unidade funcional adotada foi 1 MJ de etanol combustível na porta da usina (20MJ/L) e considerando a geração de 10,75 L de vinhaça por litro de etanol. Para a integração da produção de hidrogênio, foi aplicada alocação energética, assumindo-se o poder calorífico de 120 MJ/kgH₂. O estudo seguiu a abordagem *cradle-to-grave* (berço ao túmulo), abrangendo as etapas agrícola, industrial e de aproveitamento da vinhaça. Os dados de inventário foram obtidos em literatura científica e trabalhos acadêmicos recentes, tais como [2,8,9,10]

A ACV deste estudo utilizou o método ReCiPe 2016 Midpoint (H), abrangendo as seguintes categorias de impacto: formação de partículas finas, ecotoxicidade aquática (água doce e água marinha), aquecimento global, toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica, ecotoxicidade terrestre e consumo de água.

Descrição do processo

O processo de produção de etanol foi definido com base numa planta industrial autônoma (produção exclusiva de etanol) otimizada (com alto rendimento em produção de etanol do caldo de cana (1G), sendo 93,2L/t de cana, e geração de eletricidade excedente, correspondente à 192kWh/t de cana.

Os materiais lignocelulósicos, como o bagaço e a palha, são utilizados para gerar vapor e eletricidade, suprimindo as necessidades energéticas da planta 1G. A

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

eletricidade excedente é comercializada e enviada para a rede. A unidade de biodigestão apresenta carga de entrada definida como 1 m³ de vinhaça e eficiência de remoção de DQO nos reatores de 75%. A composição do biogás é de 60% de metano (CH₄), 39% de dióxido de carbono (CO₂) e 1% de sulfeto de hidrogênio (H₂S).^[2] A vinhaça biodigerida é enviada ao campo para fertirrigação.

Definição dos cenários

Na ACV, dois cenários foram simulados e avaliados. As características de cada cenário estão descritas nas figuras 1 e 2.

Figura 1- Cenário 1: Configuração típica de uma biorrefinaria otimizada

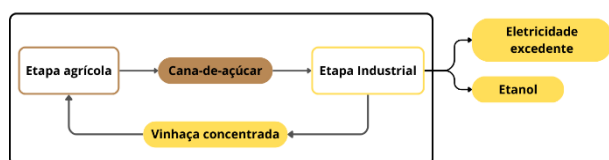
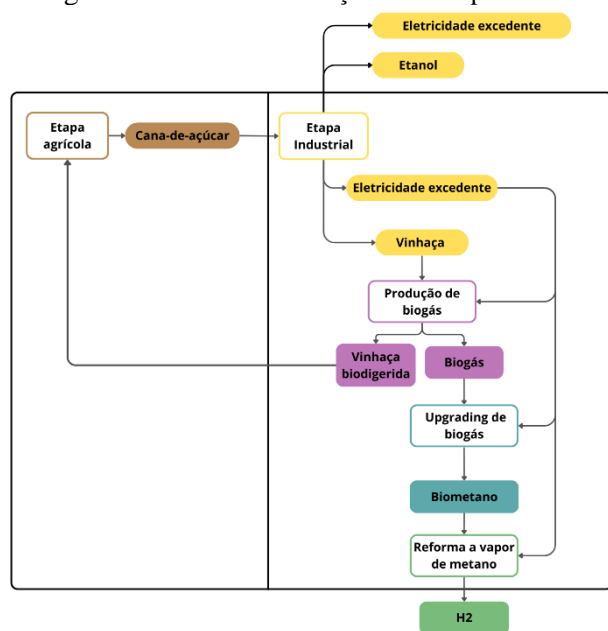


Figura 2- Cenário 2: Produção de H₂ a partir da vinhaça



Inventários e adaptações

Foram considerados dois cenários, o primeiro onde a vinhaça produzida na etapa de destilação já sai concentrada da usina e é destinada à fertirrigação e o segundo cenário apresenta a biodigestão da vinhaça para a produção de biogás e posterior produção de H₂. A vinhaça biodigerida retorna ao campo para a fertirrigação. Assumiu-se, no cenário 2 que a concentração de nutrientes da vinhaça biodigerida é similar à vinhaça concentrada gerada no cenário 1.

Etapa agrícola

O inventário da etapa agrícola contemplou os insumos químicos e orgânicos (vinhaça e terra de filtro) no cultivo

da cana-de-açúcar, o consumo de combustíveis fósseis no maquinário agrícola, a aplicação de pesticidas, além da incorporação de palha e raízes deixadas no campo. Também foi considerado o transporte de insumos até a lavoura. As emissões de óxido nitroso (N₂O) e amônia (NH₃) foram estimadas a partir da metodologia de cálculo de emissões definidas pelo IPCC (2006)^[11], enquanto as demais emissões atmosféricas foram obtidas de dados disponíveis na literatura.^[2; 8]

Etapa industrial

Na etapa industrial, o inventário incluiu como produtos principais o etanol, a vinhaça concentrada e a eletricidade excedente, gerada a partir da queima do bagaço de cana em caldeira. Foram considerados, ainda, o transporte da cana-de-açúcar até a usina e os insumos necessários às operações industriais para a produção de etanol.^[8]

Produção e upgrading de biogás

Para a produção do biogás considerou-se que a eletricidade necessária viria da própria usina e a vinhaça entraria concentrada no biodigestor. A suplementação nutricional dos microrganismos foi composta por ureia e hidróxido de sódio.^[2]

O inventário da etapa de *upgrading* do biogás (purificação) considerou que a eletricidade demandada seria suprida pelo excedente da usina e complementada por carvão vegetal. Nesse processo, identificaram-se emissões fugitivas de metano biogênico, dióxido de carbono fóssil e sulfeto de hidrogênio, este último decorrente do uso de químicos.^[9]

Reforma a vapor de metano

O inventário da reforma a vapor contemplou a entrada de biometano (densidade 0,76 kg/m³), água, vapor obtido pela queima de gás natural e eletricidade proveniente da própria usina. Esses insumos foram utilizados para a produção de hidrogênio verde.^[10]

Modelagem no OpenLCA

A modelagem foi implementada no software OpenLCA de modo a representar os fluxos de entrada e saída de cada cenário analisado. Foram definidos processos unitários correspondentes às principais etapas da cadeia: cultivo da cana-de-açúcar, produção de etanol de primeira geração (1G), concentração e destinação da vinhaça, biodigestão, *upgrading* do biogás e reforma a vapor para obtenção de hidrogênio (H₂).

Resultados e discussão

No cenário alternativo, a integração da rota de biodigestão e reforma do biogás permitiu a produção de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

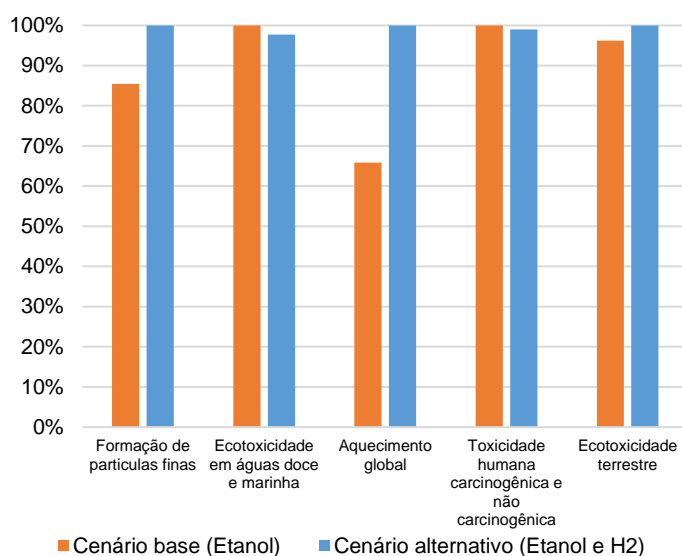
33g H₂/MJ de etanol. Esse valor representa a quantidade de hidrogênio verde gerado a partir da utilização da vinhaça como co-produto do processo.

A Tabela 1 e o Gráfico 1 apresentam os resultados das categorias de impacto avaliadas para os dois cenários: cenário base (produção de etanol) e cenário alternativo (produção conjunta de etanol e H₂). Os valores foram normalizados, de modo que o maior impacto em cada categoria corresponde a 100%, permitindo a comparação relativa entre os cenários.

Tabela 1- Resultados das categorias de impacto analisadas

Indicador	Cenário base	Cenário alternativo	Unidade
Formação particulados	41,41	48,45	mg PM _{2.5} eq
Ecotoxicidade aquática	544,01	531,51	g 1,4-DCBeq
Aquecimento global	15,04	22,83	g CO ₂ eq
Toxicidade humana	230,81	228,44	g 1,4-DCBeq
Ecotoxicidade terrestre	438,89	456,25	g 1,4-DCBeq

Gráfico 1- Resultados das categorias de impacto analisadas



De forma geral, a etapa agrícola foi a principal responsável pelos impactos, variando de 82% a 99,99%, em ambos os cenários, nas categorias analisadas, reforçando seu peso no desempenho ambiental das biorrefinarias. Ainda assim, a integração da produção de hidrogênio verde à planta promoveu incrementos relevantes em várias categorias de impacto, o que indica desafios ambientais associados a essa rota tecnológica.

A categoria aquecimento global apresentou aumento de aproximadamente 52% no cenário alternativo (22,83 gCO₂ eq) em comparação ao cenário base (15,04 gCO₂ eq). Esse resultado indica que, no estágio atual, a rota baseada na biodigestão da vinhaça seguida de reforma a

vapor apresenta alta intensidade de carbono, sobretudo devido ao uso de ureia como suplemento nutricional, que representa cerca de 20% das emissões de CO₂eq.

A formação de partículas finas também apresentou incremento no cenário alternativo, sendo de 48,45 mgPM_{2.5} eq no cenário alternativo e de 41,41 mgPM_{2.5} eq no cenário base, refletindo a dependência de combustível fóssil, como o gás natural, no fornecimento de vapor para a reforma. Esse resultado evidencia que a rota, embora renovável na origem, ainda mantém vínculos com processos fósseis, o que compromete sua atratividade ambiental.

Nas categorias relacionadas à toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica, verificou-se uma redução marginal no cenário alternativo (228,44 g1,4-DCB) em relação ao cenário base (230,81 g1,4-DCB). Essa diferença, pouco expressiva, indica que a rota de biodigestão da vinhaça seguida de reforma do biogás não promove alterações substanciais na exposição potencial de humanos a substâncias tóxicas.

Quanto às categorias de ecotoxicidade aquática (doce e marinha), os resultados também permaneceram muito próximos, sendo ligeiramente menores no cenário alternativo (531,51 g1,4-DCB) em comparação ao cenário base (544,01 g1,4-DCB). Em ambos os casos, a etapa agrícola da cana-de-açúcar foi responsável por quase todo o impacto, representando mais de 99% em ambos os cenários. A diferença entre os cenários está associada às variações no inventário agrícola e de insumos. No cenário alternativo, destaca-se o maior uso de ureia, sendo que a maior representação é na ecotoxicidade marinha com 1,15%, enquanto no cenário base observou-se maior contribuição de transporte, também com maior representação no indicador de ecotoxicidade marinha de 0,14% e de processos industriais, como a produção de ácido sulfúrico (0,07%). Ainda assim, a diferença observada não é suficiente para caracterizar ganhos ambientais significativos nessa categoria.

Em relação à ecotoxicidade terrestre, observa-se comportamento oposto: o cenário alternativo apresentou valor superior (456,25 g1,4-DCB) em comparação ao cenário base (438,89 g1,4-DCB). A análise de contribuição indica que o principal fator associado a esse aumento é a inclusão da ureia como insumo na etapa de biodigestão da vinhaça no cenário alternativo, responsável por 5,97% do total, cujas emissões indiretas ao longo da cadeia de seu uso e produção intensificam os impactos no compartimento solo.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**Conclusões**

A aplicação da Análise de Ciclo de Vida evidenciou que a integração da produção de hidrogênio verde às biorrefinarias de cana-de-açúcar não resultou em benefícios ambientais generalizados. Pelo contrário, houve aumento expressivo em categorias sensíveis, como aquecimento global, e formação de partículas finas, indicando que o processo ainda enfrenta desafios ambientais relevantes.

Em contraste, as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade aquática apresentaram diferenças marginais entre os cenários, indicando que a valorização da vinhaça por meio da biodigestão e subsequente reforma do biogás não compensa os impactos adicionais gerados.

De modo geral, a valorização da vinhaça para produção de hidrogênio verde apresenta-se como uma alternativa promissora pelo potencial de diversificação da matriz energética das biorrefinarias. Entretanto, a produção de hidrogênio foi relativamente baixa (33 g de H₂ por 1 MJ de etanol), o que limita os benefícios ambientais e energéticos da rota na configuração atual. Sua adoção ainda apresenta restrições ambientais e só poderá ser considerada viável com avanços tecnológicos e na escolha dos insumos, como a substituição da ureia por insumos de menor impacto e a redução da dependência de gás natural na etapa de reforma do biometano.

Agradecimentos

Ao apoio recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC). À FAPEMIG, por fornecer os recursos necessários para a realização desta pesquisa no âmbito do projeto "Avaliação teórico-experimental da produção e uso de hidrogênio verde em Minas Gerais" (PIBID317-2022), Edital 07/2021. Sou grata também à Universidade Federal de Itajubá, ao meu orientador Rafael Silva Capaz pela oportunidade de aprendizado e enriquecimento acadêmico.

Referências

[1] BEN – BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024.

[2] ROCHA, Mateus Henrique. *Uso da análise do ciclo de vida para a comparação do desempenho ambiental de quatro alternativas para tratamento da vinhaça*. 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2009.

[3] GONÇALVES, Felipe et al. *Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil*. Rio de Janeiro: FGV Energia, jan. 2023.

[4] TORQUATO, Sérgio Alves; JESUS, Katia Regina Evaristo de. *Complementaridade da matriz energética brasileira: o potencial da cana-de-açúcar e seus co-produtos*. AGRENER GD - 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, São Paulo, 2015.

[5] SEABRA, Joaquim Eugênio Abel. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. Orientador: Dr. Isaias de Carvalho MACEDO. 2008. Tese de doutorado (Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas SP, 2008.

[6] JIMENEZ, A. C. M.; DIAS, I. L. R.; CARDOSO, T. F.; CARVALHO, J. L. N.; JUNQUEIRA, T. L.; MAGIOLI, N. M.; CHAGAS, M. F.; MARIANO, A. P.; CUNHA, M. P.; BONOMI, A. *Different approaches to sugarcane vinasse use and management in Brazil: A technical, economic, and environmental analysis*. *ScienceDirect*, v. 193, fev, 2025.

[7] LARSEN FILHO, L.; OLIVEIRA, G. A. de; MARQUES, L. G.; SANTOS JUNIOR, J. A. dos; ALVES, J. da S.; MEDRANO, M. del C. F.; SILVA, K. H. da; ARAÚJO, L. A. de. *Potencial da vinhaça como biofertilizante e fonte de geração de energia renovável do tipo biogás*. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, v. 22, n. 6, 2024.

[8] CAPAZ, Rafael Silva. *Alternative aviation fuels in Brazil: environmental performance and economic feasibility*. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Delft University of Technology; Universidade Estadual de Campinas, Delft; Campinas, 2020.

[9] Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). *Selection of appropriate biogas upgrading technology—a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation*. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 51, pp. 521–532). Elsevier Ltd.

[10] Ingale, G. U., Kwon, H. M., Jeong, S., Park, D., Kim, W., Bang, B., Lim, Y. Il, Kim, S. W., Kang, Y. B., Mun, J., Jun, S., & Lee, U. (2022). *Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming*. *Energies*, 15(22).

[11] *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use*. Edited by Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, and Kiyoto Tanabe. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.