

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E EFICIÊNCIA DO HIDROGÊNIO PELA ROTA DE FERMENTAÇÃO ESCURA

Marcel A. R. C. Ribeiro¹ (IC), Regina M. Barros (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: ACV. Fermentação Escura. Hidrogênio

Introdução

A produção de hidrogênio por meio da fermentação escura de biomassa tem sido estudada como uma potencial rota, associada eventualmente a baixas emissões de GEE em comparação com métodos tradicionais, como a reforma do gás natural. No entanto, a avaliação de sua pegada ambiental vai além da simples análise da etapa de produção. Ela pode abranger todo o ciclo de vida, desde a aquisição de matérias-primas até o descarte final dos resíduos. Isso é crucial para identificar os pontos críticos de impacto, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de água e uso de recursos naturais, ao longo do processo.

Ao considerar o ciclo de vida da produção de hidrogênio a partir da fermentação escura, os tomadores de decisão podem avaliar alternativas para otimizar a eficiência do processo e reduzir os impactos ambientais, considerando por exemplo: a escolha de matérias-primas mais sustentáveis, a implementação de tecnologias de tratamento de resíduos mais eficazes e a adoção de práticas de produção energeticamente eficientes.

Embora a produção de hidrogênio a partir de biomassa por fermentação escura possa ser ambientalmente mais atraente do que outras, ela ainda é muito recente e por isso apresenta algumas desvantagens como, o baixo rendimento e a taxa de produção mais lenta, tornando sua aplicação prática em escala industrial um desafio (SINGH, et. al., 2015) sendo necessários avanços tecnológicos. Assim este estudo pretende avaliar a rota de fermentação escura sobre uma ótica de avaliação do ciclo de vida, comparando diferentes cenários e biomassas utilizadas neste processo.

Neste artigo de revisão, o objetivo principal é fornecer uma visão abrangente da via de produção do hidrogênio de fermentação escura e realizar uma revisão sistemática da literatura que avaliou o

desempenho ambiental desta rota. Os objetivos específicos foram: analisar comparativamente o rendimento de produção de hidrogênio sobre diferentes substratos e pré-tratamentos oferecidos e discutir as eficiências das rotas de produção do hidrogênio bem como o desempenho ambiental.

Metodologia

A revisão sistemática proposta neste trabalho baseou-se numa análise bibliométrica realizada em julho de 2023 na base de dados SCOPUS para o período 20 anos entre os anos de 2003 a 2023. O período de análise foi definido a partir de 2003 porque antes desta data pouquíssimas publicações foram encontradas.

Um total de 10 combinações de 5 palavras-chaves selecionadas foram formadas com base nas características específicas do estudo: “*Life Cycle*”, “*Anaerobic Digestion*”, “*Dark Fermentation*”, “*Hydrogen*” ou “*Biohydrogen*”. Tabela 1.

Tabela 1. Palavras-chave e resultados da pesquisa na base de dados SCOPUS.

Palavras Chaves	Número de Resultados
“ <i>Biohydrogen</i> ”	3946
“ <i>Hydrogen</i> ” E “ <i>Life Cycle</i> ”	2749
“ <i>Dark Fermentation</i> ”	1867
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Hydrogen</i> ”	1742
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Biohydrogen</i> ”	1100
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Anaerobic Digestion</i> ”	330
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Anaerobic Digestion</i> ” E “ <i>Hydrogen</i> ”	291
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Anaerobic Digestion</i> ” E “ <i>Biohydrogen</i> ”	158
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Life Cycle</i> ”	29
“ <i>Dark Fermentation</i> ” E “ <i>Hydrogen</i> ” E “ <i>Life Cycle</i> ”	24

As palavras foram procuradas nos campos “Título do artigo”, “Resumo” e “Palavras chaves” dentro da plataforma Scopus. O objetivo foi filtrar os artigos para apenas aqueles abrangessem os temas de avaliação do ciclo de vida para hidrogênio obtido a partir de fermentação escura. Os requisitos para seleção foram apresentar os seguintes aspectos: software, método, limites do sistema, unidade funcional, alocação, inventário do ciclo de vida e análise multicritério (com mais de uma categoria de impacto), como indicado pela norma ISO 14044.

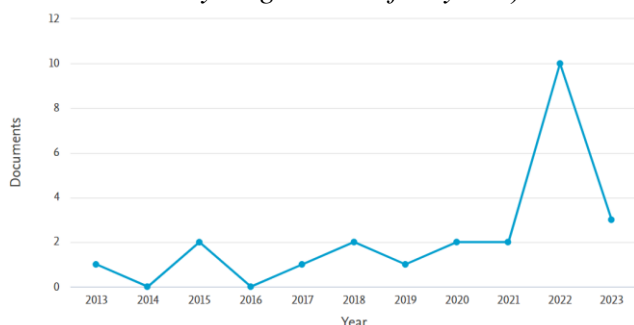
Os documentos considerados foram apenas de artigos e revisões, desconsiderando os capítulos de livros e artigos de conferências.

Resultados e discussão

Um total de 12 artigos foram selecionados para a análise proposta neste estudo, pois apresentaram metodologia de análise do ciclo de vida com tecnologia de fermentação escura.

Os resultados mostraram que a partir de 2021 houve um aumento substancial nas pesquisas relacionadas a essa área, sendo 10 dos 24 artigos, ou (41,6%) do total publicados apenas em 2022. Sendo eles 33,3% revisões e 66,7% artigos originais de pesquisa.

Figura 1. Publicações entre os anos 2003 a 2023 com as palavras chaves (“Dark Fermentation”, “Hydrogen” e “Life Cycle”)



Fonte: Scopus

Quase todos os artigos relacionados à fermentação escura apresentam um inventário completo (exceto 2) e a maioria deles (7) usa o software SimaPro para suportar os cálculos. Os tipos de matérias primas utilizados e as unidades funcionais (UF) são muito variadas, embora metade dos estudos tenham

assumido UF que expressam a quantidade de hidrogênio produzido.

As formas de obtenção dos dados utilizados ACV variaram entre estudos que utilizaram experimentos reais de pesquisa para a produção de hidrogênio de fermentação escura (6) e estudos no qual basearam seu inventário em dados secundários da literatura ou em modelos computacionais (4). Alguns ainda utilizaram uma mistura de dados primários e secundários (2).

Os estudos avaliaram múltiplos cenários envolvendo diferentes variáveis, tais como matérias-primas (Camacho et al., 2022), (Masilela and Pradhan, 2021) e (Djomo e Blumberga, 2011), modalidades de produção ou tecnologias (Barghash et. al., 2022), (Katakajwala e Venkata Mohan, 2022) ,(Reaño, 2020), (Mehmeti et al., 2018) e (Escamilla-Alvarado e Poggi-Varaldo, 2017) e diferentes esquemas de produção envolvendo ou não outros materiais aditivos, como visto por (Akhbari et al., 2021) (Wang et al., 2022). O propósito subjacente é determinar a trajetória com o menor impacto ambiental e os desfechos mais vantajosos.

O desempenho ambiental da rota de fermentação escura foi ainda comparado com outras rotas de produção do hidrogênio em estudos de (Aydin e Dincer, 2022) e (Dincer e Acar, 2015) em ambas esta rota se destacou como vias ambientalmente mais benignas a produção de hidrogênio, junto com os métodos de base fotônica como (fotocatálise, método fotoeletroquímico e fotofermentação). Porém a baixa eficiência de conversão da biomassa em hidrogênio, sendo 33% para açúcares segundo Gómez; et. al. (2011) são fatores limitantes que dificultam o estabelecimento desta rota em escalas industriais.

Conclusões

Ao todo foram encontrados 12 artigos que utilizaram metodologias ACV e atenderam os requisitos de escopo apresentados pelas normas ISO 14040 e 14044 para avaliar o desempenho ambiental da produção de H₂ pela rota de fermentação escura. O resultado da busca na plataforma Escopus com a combinação das palavras chaves (“Dark Fermentation”, “Hydrogen” e “Life Cycle”) indicou

que a partir de 2021 houve um aumento considerável no interesse das pesquisas nessa área.

As publicações encontradas, analisaram diferentes cenários, em diferentes contextos de produção e com diferentes metodologias de análises, o que dificultou uma comparação de desempenho entre elas, porém foi verificado que em todas elas a ACV serviu de ferramenta para identificação e otimização dos cenários propostos. Entretanto quando comparado com relação a outras rotas, a fermentação escura apresentou significativa vantagem dos indicadores ambientais, principalmente com relação as rotas mais utilizadas hoje em dia que utilizam recursos fósseis como matéria prima para produção de H₂, altamente prejudiciais ao meio ambiente.

Foi ainda verificado que a baixa eficiência de conversão da biomassa em H₂, devido às limitações e complexidade do processo de fermentação escura, dificulta o estabelecimento dessa rota de produção no mercado de hidrogênio, a níveis industriais e portanto requer avanços nos estudos e desenvolvimento de tecnologias que venham tornar está uma rota viável em escala industrial.

Contudo o apelo mundial pela descarbonização das indústrias e criação de matriz energética mais limpa e sustentável apoiado por metas e compromissos assumidos por diversos países do mundo reforçam a ideia de que está poderá sim vir a ser uma rota viável de produção do hidrogênio. Sendo uma alternativa promissora para produção de hidrogênio sustentável, e para valorização dos resíduos de biomassa.

Desta forma é imperativo dizer que a ACV se faz ferramenta importante e necessária para avaliar e identificar as melhores rotas e cenários possíveis para a produção de hidrogênio, e assim auxiliar as tomadas de decisão pautadas em dados concretos e confiáveis.

Agradecimentos

Em primeiro momento, agradeço a Unifei pela oportunidade e a FAPEMIG pelo apoio por meio do fornecimento de bolsa de Iniciação Científica. Agradeço também a minha orientadora e ao professor Rafael Capaz pela paciência e disponibilidade em todos os momentos.

Referências

SINGH, Anoop; SEVDA, Surajbhan; REESH, Ibrahim Abu; VANBROEKHOVEN, Karolien; RATHORE, Dheeraj; PANT, Deepak. Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass: technology and sustainability. **Energies**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 13062-13080, 17 nov. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en81112357>.

CAMACHO, Claudia Irene; ESTÉVEZ, Sofia; CONDE, Julio J.; FEIJOO, Gumersindo; MOREIRA, María Teresa. Dark fermentation as an environmentally sustainable WIN-WIN solution for bioenergy production. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 374, p. 134026, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134026>.

MASILELA, Phumlani; PRADHAN, Anup. A life cycle sustainability assessment of biomethane versus biohydrogen – For application in electricity or vehicle fuel? Case studies for African context. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 328, p. 129567, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129567>.

DJOMO, Sylvestre Njakou; BLUMBERGA, Dagnija. Comparative life cycle assessment of three biohydrogen pathways. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 102, n. 3, p. 2684-2694, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.139>.

BARGHASH, Hind; ALRASHDI, Zuhoor; OKEDU, Kenneth E.; DESMOND, Peter. Life-Cycle Assessment Study for Bio-Hydrogen Gas Production from Sewage Treatment Plants Using Solar PVs. **Energies**, [S.L.], v. 15, n. 21, p. 8056, 29 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en15218056>.

KATAKOJWALA, Ranapratap; MOHAN, S. Venkata. Multi-product biorefinery with sugarcane bagasse: process development for nanocellulose, lignin and biohydrogen production and lifecycle analysis. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 446, p. 137233, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.137233>.

REAÑO, Resmond Lat. Assessment of environmental impact and energy performance of rice husk utilization in various biohydrogen production pathways. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 299, p. 122590, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122590>.

MEHMETI, Andi; ANGELIS-DIMAKIS, Athanasios; ARAMPATZIS, George; MCPHAIL, Stephen; ULGIATI, Sergio. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: from conventional to emerging technologies. **Environments**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 24, 6 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/environments5020024>.

ESCAMILLA-ALVARADO, Carlos; POGGI-VARALDO, Héctor M.; PONCE-NOYOLA, M. Teresa. Bioenergy and

bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: a comparative life cycle assessment with prospective application to Mexico. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 24, n. 33, p. 25602-25617, 3 jun. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6939-z>.

AKHBARI, Azam; ONN, Chiu Chuen; IBRAHIM, Shaliza. Analysis of biohydrogen production from palm oil mill effluent using a pilot-scale up-flow anaerobic sludge blanket fixed-film reactor in life cycle perspective. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 46, n. 68, p. 34059-34072, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.186>.

WANG, Zi-Han; LI, Lan-Qing; ZHAO, Lei; CHEN, Chuan; YANG, Shan-Shan; REN, Nan-Qi. Comparative life cycle assessment of biochar-based lignocellulosic biohydrogen production: sustainability analysis and strategy optimization. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 344, p. 126261, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126261>.

AYDIN, Muhammed Iberia; DINCER, Ibrahim. A life cycle impact analysis of various hydrogen production methods for public transportation sector. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 47, n. 93, p. 39666-39677, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.125>.

DINCER, Ibrahim; ACAR, Canan. Review e evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 40, n. 34, p. 11094-11111, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.

GÓMEZ, X.; FERNÁNDEZ, C.; FIERRO, J.; SÁNCHEZ, M.e.; ESCAPA, A.; MORÁN, A.. Hydrogen production: two stage processes for waste degradation. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 102, n. 18, p. 8621-8627, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.055>.