

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR DARK FERMENTATION: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA LITERATURA RECENTE (2021–2025)

Daniel da Rosa Taschetto¹, Michel Brondani¹, Flávio Dias Mayer¹, Francisco Dalcin Vezaro¹, João Vittor Sigal Jobim¹, Kamila dos Santos Rodrigues¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
(daniel.taschetto@acad.ufsm.br)

Resumo: Este trabalho apresenta uma revisão e análise bibliométrica sobre a produção científica de hidrogênio verde a partir da rota tecnológica fermentação escura (*dark fermentation*), entre os anos de 2021 a 2025, utilizando a base de dados Scopus. Foram avaliadas tendências de publicação, participação dos principais países, tipos de substratos utilizados, inóculos empregados e rendimentos de produção de hidrogênio, buscando identificar os principais direcionamentos e desafios atuais da área.

Palavras-chave: Hidrogênio; Dark Fermentation; Variáveis operacionais.

INTRODUÇÃO

A preocupação com as questões ambientais e geopolíticas a partir do uso de combustíveis fósseis, aliada ao aumento da população global, que acarreta em um aumento da demanda energética, traz à tona uma necessidade significativa alternativas sustentáveis e limpas de energia (Tripathy et al., 2025). Dentre as alternativas, destaca-se o hidrogênio. Este recurso energético possui diversas vantagens em comparação aos demais, devido a sua emissão nula de dióxido de carbono durante o processo de combustão, liberando apenas água, e também a sua elevada densidade energética (143 MJ/kg), tornando o hidrogênio atrativo para o uso em motores ou geração de energia elétrica (Namdarimonfared et al., 2023).

Apesar dessas vantagens, 95% da produção de, atualmente, é proveniente de fontes não renováveis, por meio de processos de gaseificação, reforma a vapor e pirólise, principalmente, utilizando carvão mineral e metano fóssil. Isso se deve ao fato dessas rotas serem muito mais viáveis economicamente em comparação a demais métodos (Luo et al., 2022). Dentre as metodologias renováveis de produção de hidrogênio, destacam-se a eletrólise, a produção termoquímica e a rota biológica (Bhandari e Adhikari, 2024). As rotas por meio biológico, que podem ser divididas principalmente entre *photo-fermentation*, biofotólise, *dark fermentation* e eletrólise biológica, estão ganhando um destaque significativo nos últimos anos (Augusto et al., 2022). Apesar destas possuírem algumas desvantagens, se comparada com as demais rotas mencionadas, em razão de uma produção menor de hidrogênio e de um tempo maior de reação, as rotas biológicas apresentam vantagens por serem ambientalmente mais amigáveis, mais seletivas na

produção de gás e requerem um consumo energético significativamente inferior (Bhatia et al., 2021). Entre as rotas de produção biológicas de hidrogênio, aquela proveniente da *dark fermentation* é a que vem ganhando maior destaque, visto que o seu rendimento é maior e possui um custo operacional menor (Illuminati et al, 2025).

A *dark fermentation* é caracterizada pelo processo em que microrganismos degradam a matéria orgânica complexa em componentes mais simples, liberando hidrogênio e ácidos graxos voláteis. Esse fenômeno ocorre na ausência de oxigênio e independente de luz, o que dá origem ao seu nome. A sua vantagem em relação aos outros métodos, além do já citado rendimento maior, é o fato de não precisar de uma fonte externa de energia e a possibilidade de reutilização dos seus subprodutos em outros processos (Vidal et al, 2025), como o ácido acético, ácido propiônico e o ácido butírico (Dahiya et al, 2023). O processo de digestão anaeróbia ocorre em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo que a produção de hidrogênio ocorre, principalmente na segunda e terceira fase. A última fase é responsável pelo consumo de hidrogênio em detrimento do metano, o que faz necessário inibir a metanogênese (Dzulkarnain et al, 2022). Os substratos utilizados na *dark fermentation* são variados e podem incluir biomassas lignocelulósicas, resíduos de alimentos, águas residuais da indústria de comida e bebida, biomassas de algas, açúcares sintéticos, dentre outros. Em teoria, quaisquer substratos ricos em carboidratos, proteínas e lipídios podem ser usados para a produção de hidrogênio (Albuquerque et al, 2024). Em relação aos tipos de inóculos estudados, estes podem ser provenientes de

culturas puras que incluem os gêneros *Clostridium*, *Enterobacter*, *Thermoanaerobacterium* e *Bacillus*, principalmente. Essas culturas puras podem ser obtidas a partir do isolamento de microrganismos presentes em lodos de estações de tratamento de efluentes, resíduos industriais, esterco bovino e resíduos de laticínios, entre outras fontes. Alternativamente, os consórcios microbianos presentes nesses ambientes podem ser utilizados diretamente, sem a etapa de isolamento das espécies individuais, caracterizando o uso de culturas mistas (Jain et al, 2024).

A partir de toda a problemática apresentada e o crescente número de publicações relacionadas à produção biológica de hidrogênio, faz-se necessário investigar a *dark fermentation* em função da sua evolução ao longo dos anos e como a comunidade científica tem tratado do assunto, montando o estado da arte sucinto, principalmente em razão dos desafios ligados a seleção de substrato e escolha dos microrganismos. Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise bibliométrica preliminar da produção científica relacionada à *dark fermentation*, bem como revisar os principais resultados experimentais reportados na literatura recente, buscando identificar tendências de pesquisa, avanços tecnológicos e desafios para o aumento da produção biológica de hidrogênio.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada uma pesquisa bibliométrica na base de dados Scopus considerando publicações entre os anos de 2021 e 2025 relacionadas à produção biológica de hidrogênio por *dark fermentation*. A busca foi conduzida utilizando o termo "*dark fermentation*" nos campos de título, resumo e palavras-chave, em um filtro nativo da base de dados selecionada.

Foram delimitados apenas os trabalhos que traziam os termos explícitos de *dark fermentation* por meio dos filtros avançados, a fim de evitar a contagem de trabalhos que foquem a produção de hidrogênio por outras rotas diferentes da avaliada neste trabalho.

A análise bibliométrica preliminar foi realizada avaliando-se a evolução do número de publicações, a participação dos principais países e a contribuição brasileira para o tema. Posteriormente, os artigos foram classificados de acordo com o tipo de substrato utilizado e tipo de inóculo empregado.

Para a análise dos resultados experimentais, foram selecionados artigos revisados por pares que apresentassem pelo menos uma citação na base de dados desde o ano de 2021 até início de 2026. A partir desses estudos foram compiladas informações referentes aos substratos utilizados, microrganismos empregados e rendimentos de produção de hidrogênio reportados pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise preliminar bibliométrica

Dark Fermentation:

A partir da base de dados Scopus, notou-se um crescente interesse nas pesquisas em *dark fermentation* em todo o mundo. Os estudos aumentaram de 159 publicações em 2021 para 234 publicações em 2025 (Figura 1), com o maior pico sendo em 2024, com 238 publicações, o que representa um aumento aproximado de 47%. A Figura 2 apresenta as publicações sobre *dark fermentation* por país. Os países que lideram o número de trabalhos durante o período estipulado são a China (177 publicações), a Índia (171 publicações) e a Espanha (84 publicações). A liderança da China e da Índia pode estar associada aos elevados investimentos em tecnologias sustentáveis, bem como à grande disponibilidade de resíduos orgânicos provenientes de atividades agrícolas, industriais e urbanas. O Brasil ocupa a sétima (7ª) posição, com 61 publicações, liderando a América Latina no assunto. O aumento do número de publicações indica um crescente interesse da comunidade científica na produção biológica de hidrogênio por *dark fermentation*.

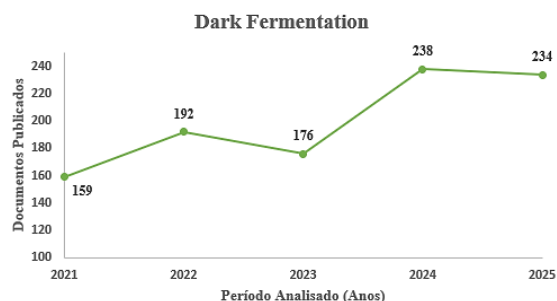


Figura 1. Número de publicações, por ano, no período entre 2021 a 2025.

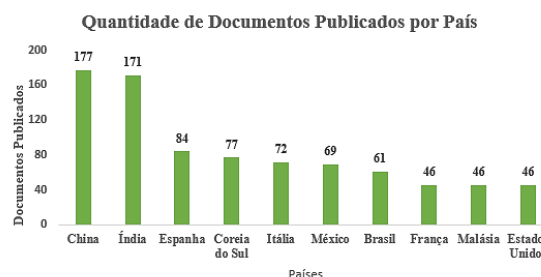


Figura 2. Número de publicações de *dark fermentation* por país.

Tipos de Substratos:

A respeito dos substratos pesquisados neste período, os resíduos alimentares são os mais utilizados, com

cerca de 165 trabalhos, com um aumento de 26 trabalhos publicados para 44 em 2025, sendo este o ano com maior número de publicações, demonstrados na Figura 3. Dentre estes, os quatro países que mais lideram as pesquisas são a Espanha, com 24 publicações, a China com 23 publicações, a Índia, com 22 publicações e a Itália com 16 publicações, como demonstrado na Figura 4. O Brasil possui um número de pesquisas bem mais modesto, com cerca de 3 trabalhos publicados, ocupando a 21ª posição. Já, com relação aos resíduos lignocelulósicos, existem 48 trabalhos publicados, aumentando de 7 trabalhos em 2021 para 16 em 2025. A Índia, China e Turquia lideram o número de publicações, com cerca de 13, 7 e 5 publicações, respectivamente. O Brasil ocupa o quarto lugar (4º) com 4 publicações. Esse resultado pode ser visto na Figura 5.

Por fim, as publicações com o uso da glicose possuem um número expressivo de publicações, totalizando 138 trabalhos. Diferente dos demais substratos mencionados, a variação dos trabalhos que utilizam glicose é bastante significativa, sendo o maior pico no ano de 2024, com cerca de 32 trabalhos. Os países que lideram são a China e Índia, com cerca de 38 e 15 trabalhos, respectivamente. A França e o México também merecem destaque, visto que ambos possuem 10 publicações. O Brasil ocupa a sexta posição (6ª), com 8 publicações. Esse resultado se encontra na Figura 6.

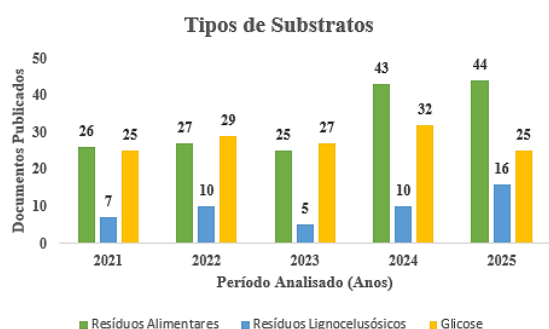


Figura 3. Número de publicações separadas por tipo de substrato.

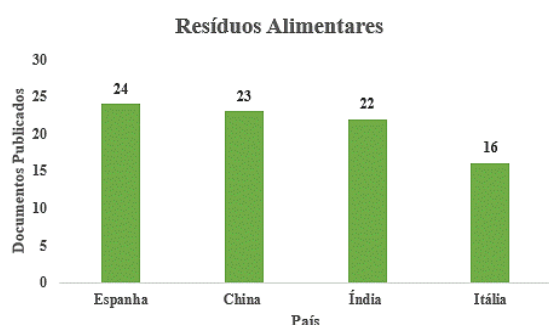


Figura 4. Número de publicações a respeito do uso de resíduos alimentares por país.

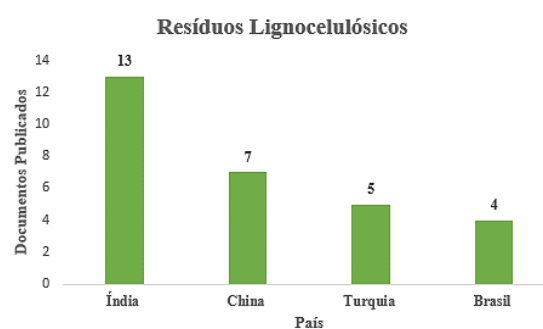


Figura 5. Número de publicações a respeito do uso de resíduos lignocelulósicos por país.

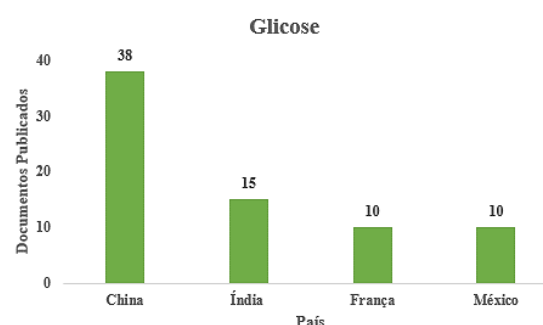


Figura 6. Número de publicações a respeito do uso de glicose por país.

O fato dos resíduos alimentares superarem o número de trabalhos em relação a glicose, demonstra que os experimentos baseados em resíduos vêm ganhando maior destaque, sugerindo um crescente interesse na valorização de resíduos orgânicos como matéria-prima para a produção de hidrogênio. Já, o uso de glicose sintética mantém um número relativamente constante em função de sua alta reprodutividade, o que permite analisar parâmetros, inibidores e afins. Por fim, os resíduos lignocelulósicos, embora menos estudados, se comparados aos demais, muito devido a sua dificuldade de trabalho, também tem demonstrado tendência de crescimento. Apesar do menor número de estudos, os resíduos lignocelulósicos apresentam elevado potencial devido à sua abundância e baixo custo, especialmente em países com forte atividade agrícola. Entretanto, a necessidade de pré-tratamentos para aumentar a disponibilidade dos açúcares fermentescíveis ainda representa um desafio tecnológico importante.

Tipos de inóculos:

Foram encontrados cerca de 40 trabalhos no período estudado, com o maior pico entre 2023 e 2024 com 10 publicações em cada ano, apresentados na Figura 7. A China, a Índia, México e Coreia do Sul lideram o número de publicações, com 11, 5, 5 e 4 publicações, respectivamente. O Brasil aparece com apenas uma

publicação. Já, os trabalhos que utilizam consórcio microbiano possuem um número bem mais expressivo de publicações, com cerca de 522 trabalhos. No período de 2021 a 2025, o número de trabalhos aumentou de 84 trabalhos para 117, sendo o maior pico foi em 2024, com 128 trabalhos publicados. Os países que lideram o uso desse tipo de inóculo são a China (104 trabalhos publicados), a Espanha (58 trabalhos publicados) o Brasil (49 publicações) e o México (49 publicações).

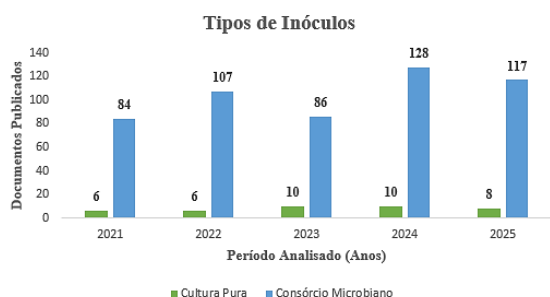


Figura 7. Número de publicações separadas por tipo de inóculo.

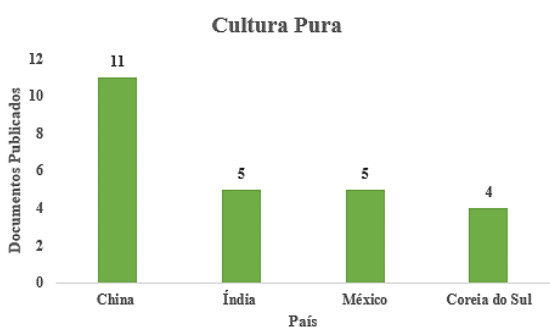


Figura 8. Número de publicações a respeito do uso de cultura pura por país.

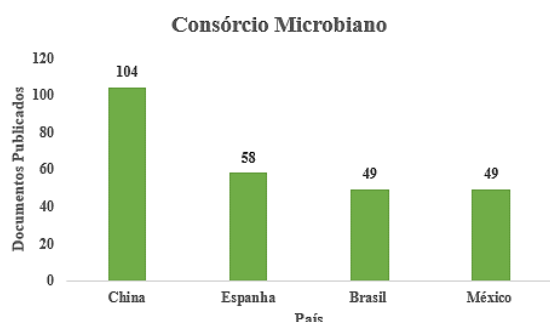


Figura 9. Número de publicações a respeito do uso de consórcio microbiano por país.

Os trabalhos publicados referentes às culturas puras mantiveram uma constante ao longo do período estudado. O uso de microrganismos selecionados permite um controle maior sobre o processo, principalmente para evitar bactérias consumidoras de hidrogênio e redutoras de sulfato, por exemplo. Entretanto, isso torna a fermentação escura muito mais sensível a contaminações, o que acarreta em mais cuidados, como a esterilização. Já, os trabalhos com a cultura mista estão em números bem mais significativos. O predomínio dos trabalhos utilizando culturas mistas sugere uma preferência crescente por sistemas microbianos mais robustos e economicamente viáveis, uma vez que dispensam etapas rigorosas de esterilização e apresentam maior capacidade de adaptação a substratos complexos.

Rendimentos Médios

A Tabela 1 mostra a relação de trabalhos em relação ao tipo de substrato e inóculo utilizados e os rendimentos médios obtidos pelos autores.

Tabela 1. Parâmetros básicos de *dark fermentation* obtidos durante 2021 a 2025.

Substrato	Tipo de inóculo	Rendimento de Hidrogênio	Referência
Glicose	Cultura pura	1,73 mol H ₂ /mol substrato	(Vauthier et al, 2026)
	Cultura pura	1,63 mol H ₂ /mol hexose	(Litti et al, 2022)
Resíduos alimentares	Cultura mista	135,2 ml H ₂ /g SV	(Jariyaboon et al, 2023)
Resíduos alimentares	Cultura pura	265 ml H ₂ /g matéria prima	(Beschkov et al, 2023)
Resíduos agrícolas	Cultura pura	1,29 mol H ₂ /mol hexose	(Kim et al, 2024)
Resíduos agrícolas	Cultura mista	133,6 mL/g TS	(Zhu et al, 2023)

A heterogeneidade das unidades utilizadas para reportar o rendimento de hidrogênio, apresentadas na Tabela 1, dificulta a comparação direta entre os estudos, constituindo um dos desafios observados na literatura recente. Essa falta de padronização limita análises quantitativas mais abrangentes e evidência a necessidade de critérios mais uniformes para a apresentação dos resultados experimentais. Isso se deve, principalmente, à complexidade dos substratos utilizados. Embora os rendimentos teóricos possam atingir até 4 mol H₂/mol glicose na rota acetogênica, os valores experimentais observados permanecem significativamente inferiores devido à formação de metabólitos concorrentes e às limitações biológicas do



processo. Isso evidencia que ainda há um grande espaço para a evolução nas pesquisas para a otimização dessa rota.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os dados bibliométricos preliminares e rendimentos médios de produção de hidrogênio encontrados na literatura nos últimos 5 anos. Os resultados obtidos indicam a pesquisa usando a *dark fermentation* tem aumentado, demonstrando potencial para integrar estratégias de produção sustentável de energia (H₂). A diversidade de substratos e inóculos observada evidencia o dinamismo da área, mas também revela desafios relacionados à comparação dos rendimentos obtidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Fortalecimento e Redução de Assimetria da Pós-Graduação da UFSM.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. M.; SARTOR, G. D. B.; MARTINEZ-BURGOS, W. J.; SCAPINI, T.; EDWIGES, T.; SOCCOL, C. R.; MEDEIROS, A. B. P. Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review. *Methane*, v. 3, n. 3, p. 500-532, 2024. DOI: 10.3390/methane3030029.

AUGUSTO, I. M. G.; LAZARO, C. Z.; ALBANEZ, R.; RATUSZNEI, S. M.; LOVATO, G.; RODRIGUES, J. A. D. Optimizing thermophilic dark fermentation of soybean molasses: The critical role of temperature in maximizing biohydrogen production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 13, n. 5, p. 117804, 2025. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117804.

BHANDARI, R.; ADHIKARI, N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 82, p. 923-951, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.004.

BHATIA, S. K.; JAGTAP, S. S.; BEDEKAR, A. A.; BHATIA, R. K.; RAJENDRAN, K.; PUGAZHENDHI, A.; RAO, C. V.; ATABANI, A. E.; KUMAR, G.; YANG, Y. H. Renewable biohydrogen production from lignocellulosic biomass using fermentation and integration of systems with other energy generation technologies. *Science of The Total Environment*, v. 765, p. 144429, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144429.

BESCHKOV, V.; PARVANOV-MANCHEVA, T.; VASILEVA, E. Experimental Study of Bio-Hydrogen Production by *Clostridium beijerinckii* from Different

Substrates. *Energies*, v. 16, n. 6, p. 2747, 2023. DOI: 10.3390/en16062747.

DAHIYA, S.; LINGAM, Y.; MOHAN, S. V. Understanding acidogenesis towards green hydrogen and volatile fatty acid production – Critical analysis and circular economy perspective. *Chemical Engineering Journal*, v. 464, p. 141550, 2023. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141550.

DZULKARNAIN, E. L. N.; AUDU, J. O.; WAN DAGANG, W. R. Z.; ABDUL-WAHAB, M. F. Microbiomes of biohydrogen production from dark fermentation of industrial wastes: current trends, advanced tools and future outlook. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 9, p. 16, 2022. DOI: 10.1186/s40643-022-00504-8.

ILLUMINATI, F.; SAVIO, R.; PEZZUOLO, A.; FERRARI, G.; MARINELLO, F.; GUIDOLIN, M.; LAVAGNOLO, M. C. Biohydrogen Production from Agricultural and Livestock By-Products by Dark Fermentation: A Data Mining Approach. *Agriculture*, v. 15, n. 22, p. 2323, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15222323.

JAIN, R.; PANWAR, N. L.; JAIN, S. K.; GUPTA, T.; AGARWAL, C.; MEENA, S. S. Bio-hydrogen production through dark fermentation: an overview. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 14, p. 12699-12724, 2024. DOI:10.1007/s13399-022-03282-7.

JARIYABOON, R.; HAYEYUNU, S.; USMANBAHA, N.; ISMAIL, S. B.; O-THONG, S.; MAMIMIN, C.; KONGJAN, P. Thermophilic Dark Fermentation for Simultaneous Mixed Volatile Fatty Acids and Biohydrogen Production from Food Waste. *Fermentation*, v. 9, n. 7, p. 636, 2023. DOI: 10.3390/fermentation9070636.

KIM, S. M.; SIM, Y. B.; YANG, J.; KO, J.; KIM, D. H.; KIM, S. H. High-rate continuous biohydrogen (Bio-H₂) production from rice straw hydrolysate using a dynamic membrane bioreactor (DMBR). *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 71, p. 465-472, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.197.

LITTI, Y. V.; POTEKHINA, M. A.; ZHURAVLEVA, E. A.; VISHNYAKOVA, A. V.; GRUZDEV, D. S.; KOVALEV, A. A.; KOVALEV, D. A.; KATRAEVA, I. V.; PARSHINA, S. N. Dark fermentative hydrogen production from simple sugars and various wastewaters by a newly isolated *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* SP-H₂. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 58, p. 24310-24327, 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.235.

LUO, L.; SRIRAM, S.; JOHNRAVINDAR, D.; MARTIN, T. L. P.; WONG, J. W. C.; PRADHAN, N. Effect of inoculum pretreatment on the microbial and metabolic dynamics of food waste dark fermentation.



Bioresource Technology, v. 358, p. 127404, 2022.
DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127404.

NAMDARIMONFARED, M.; ZILOUEI, H.;
TONDRO, H. Biological hydrogen production from
paper mill effluent via dark fermentation in a packed
bed biofilm reactor. Fuel, v. 338, p. 127231, 2023.
DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127231.

TRIPATHY, D. B.; PRADHAN, S.; AGARWAL, P.
Current trends of biohydrogen production, storage and
applications. International Journal of Hydrogen
Energy, v. 196, p. 152530, 2025. DOI:
10.1016/j.ijhydene.2025.152530.

VAUTHIER, L.; RONDAGS, E.; LOUBIÈRE, C.;
PEN, N.; FRAMBOISIER, X.; GUEDON, E.;
DELAUNAY, S. Rational comparison of biohydrogen
production using Clostridium species through dark
fermentation during anaerobic batch processes.
Journal of Biotechnology, v. 409, p. 85-95, 2026.
DOI: 10.1016/j.jbiotec.2025.10.009.

VIDAL, A.; MOHIUDDIN, O.; CHANCE, E.;
SERRANO-BLANCO, S.; HOWARD, T. P.;
MUÑOZ-MUÑOZ, J.; VELASQUEZ-ORTA, S.;
RIOS-SOLIS, L. Biohydrogen production through
dark fermentation of agricultural waste: Novel strain
and feedstock characterisation. Bioresource
Technology, v. 434, p. 132839, 2025. DOI:
10.1016/j.biortech.2025.132839.

ZHU, J.; SONG, W.; CHEN, X.; SUN, S. Integrated
process to produce biohydrogen from wheat straw by
enzymatic saccharification and dark fermentation.
International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 30,
p. 11153-11161, 2023. DOI:
10.1016/j.ijhydene.2022.05.056.