

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E METANO A PARTIR DE SUBPRODUTOS DA BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO O ESTERCO BOVINO COMO INÓCULO

**Palavras-Chave: CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA, BIOHIDROGÊNIO, METANO, ESTERCO BOVINO,
PRÉ-TRATAMENTO, BIOGÁS**

Autor:

Gabriel Eizo Tome - FEAGRI - UNICAMP

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Mockaits - FEAGRI - UNICAMP

Coorientador(a): Prof.^a Dr.^a Maria Paula Cardeal Volpi - ESALQ - USP

Dr. Oscar Fernando Herrera Adarme - FEAGRI - UNICAMP

MSc. Paula Fontoura Procópio - FEAGRI - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A transição global para fontes de energia renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à valorização de resíduos agroindustriais. No Brasil, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar se destaca como uma das principais rotas para a geração de bioenergia, sendo responsável pela produção de etanol de primeira geração (1G) e gerando grandes volumes de subprodutos como a vinhaça e a torta de filtro. Tradicionalmente utilizado na fertirrigação, esses resíduos vêm sendo investigados como substratos alternativos para a produção de biogás, especialmente metano. No entanto, o potencial para geração de hidrogênio, uma fonte energética mais limpa e de maior poder calorífico, ainda é pouco explorado.

Sistemas de digestão anaeróbia em dois estágios permitem a separação das fases acidogênica e metanogênica, viabilizando a produção sequencial de hidrogênio e metano. Neste contexto, a escolha e o pré-tratamento do inóculo são fatores importantes, especialmente para inibir a atividade de arqueias metanogênicas na etapa acidogênica. O esterco bovino, por ser uma fonte rica de microrganismos anaeróbios e amplamente disponível, desponta como um inóculo promissor, embora sua eficiência dependa da aplicação de pré-tratamentos adequados. Sendo assim, este estudo tem como objetivo avaliar o uso de esterco bovino como inóculo para a produção de hidrogênio e metano via co-digestão de vinhaça e torta de filtro.

METODOLOGIA:

Foram utilizados como substratos a vinhaça e a torta de filtro provenientes da produção de etanol de primeira geração, coletadas em uma usina localizada na cidade de Cosmópolis (SP). O inóculo foi o esterco bovino fresco, obtido em uma fazenda leiteira em Itatiba (SP), diluído até alcançar a concentração de 30g/L de sólidos totais.

Dois pré-tratamentos foram aplicados no inóculo:

- Térmico, com aquecimento a 100 °C por 1 hora.
- Ácido, com acidificação até o pH 3 por 24 horas com o ácido HCL, seguido de neutralização até o pH 5.

Antes dos experimentos, o esterco foi aclimatado gradualmente até as temperaturas específicas dos testes: 55 °C para os ensaios de hidrogênio (BHP) e 35 °C para os de metano (BMP). A Atividade Hidrogenogênica Específica (AHE) foi avaliada com glicose como substratos (50g/L), em frascos de 275 mL incubados a 55 °C, com agitação contínua a 150 rpm.

Para os ensaios de Potencial Bioquímico de Hidrogênio (BHP), utilizou-se a co-digestão anaeróbia de vinhaça e torta de filtro na proporção de 94:6 em termos de sólidos totais. O volume útil dos frascos foi de 275 mL, com 125 mL destinados ao headspace. A proporção inóculo/substrato foi de 2:1 com base em sólidos voláteis (SV), e o pH inicial ajustado para 5. Ao término do BHP, o digestato foi centrifugado e utilizado como substrato nos ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP), simulando a operação de um sistema em dois estágios. Adicionalmente, foi realizada a digestão direta da mistura vinhaça+torta de filtro, com pH inicial ajustado para 7. Os testes de BMP foram conduzidos nas mesmas condições de volume e agitação, mas com a temperatura ajustada para 35°C.

O volume de biogás foi determinado aferindo a pressão com um manômetro e a composição do gás (CH₄, H₂, CO₂, e H₂S) foi analisada por cromatografia gasosa. Amostras dos inóculo in natura e pré-tratado foram submetidas a extração de DNA, e o sequenciamento do gene 16S foi realizado para caracterização da comunidade microbiana presente antes e após os testes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os ensaios de Atividade Hidrogenogênica Específica (AHE) demonstraram diferenças significativas entre os pré-tratamentos do inóculo (Gráfico 1). O pré-tratamento térmico resultou em maior produção acumulada de hidrogênio em comparação ao ácido, indicando uma maior eficiência na inativação das arqueias metanogênicas e possível seleção de bactérias hidrogenogênicas termofílicas.

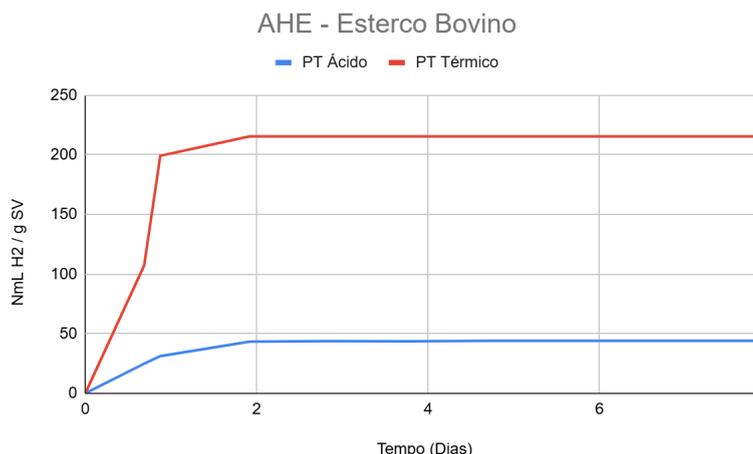


Gráfico 1 - Produção acumulada de H₂ no teste AHE.

Nos ensaio de Potencial Bioquímico de Hidrogênio (BHP) com vinhaça e torta de filtro como co-substratos, observou-se a mesma tendência (Gráfico 2): o pré-tratamento térmico apresentou rendimento superior ao ácido, ainda que os volumes totais de H₂ tenham sido inferiores aos obtidos com glicose. Isso sugere que o esterco apresenta limitações na degradação de substratos mais complexos, como os resíduos da biorrefinaria.



Gráfico 2 - Produção acumulada de H₂ no teste de BHP

Por outro lado, nos ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) com o digestato do BHP, o comportamento se inverteu parcialmente (Gráfico 3). Embora os rendimentos acumulados de metano tenham sido semelhantes entre os pré-tratamentos, o digestato oriundo do pré-tratamento ácido apresentou menor fase lag e maior estabilidade, possivelmente devido à composição mais simples dos ácidos graxos voláteis gerados na fase acidogênica.

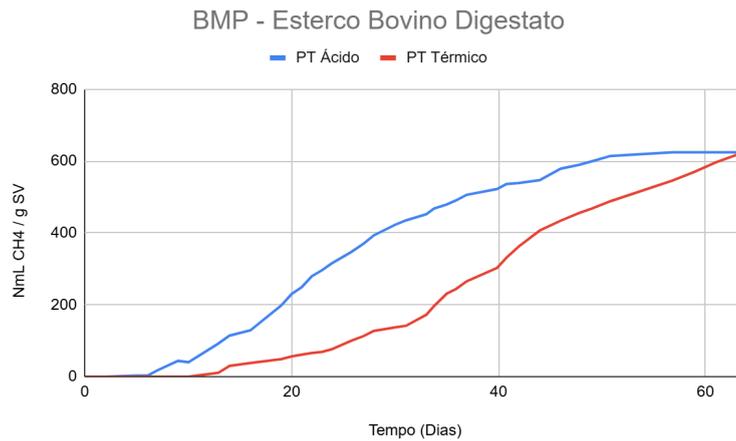


Gráfico 3 - Produção acumulada de CH₄ no teste de BMP

A análise metataxonômica (Figura 1) revelou presença significativa do gênero *Romboutsia* em todas as condições, consistentes com sua origem presente no intestino de ruminantes. No inóculo termicamente tratado, foi detectada predominância de *Thermoanaerobacterium*, bactéria termofílica associada a altos rendimentos de produção de hidrogênio. A literatura aponta que membros da ordem *Thermoanaerobacterales*, como *Thermoanaerobacterium*, *Clostridium* e *Thermotoga*, são favorecidos em sistemas termofílicos e apresentam rotas metabólicas que priorizam a formação de acetato, favorecendo a produção de H₂ (Braga Nan et al., 2020; O-Thong et al., 2008; Dzulkarnain et al., 2022).

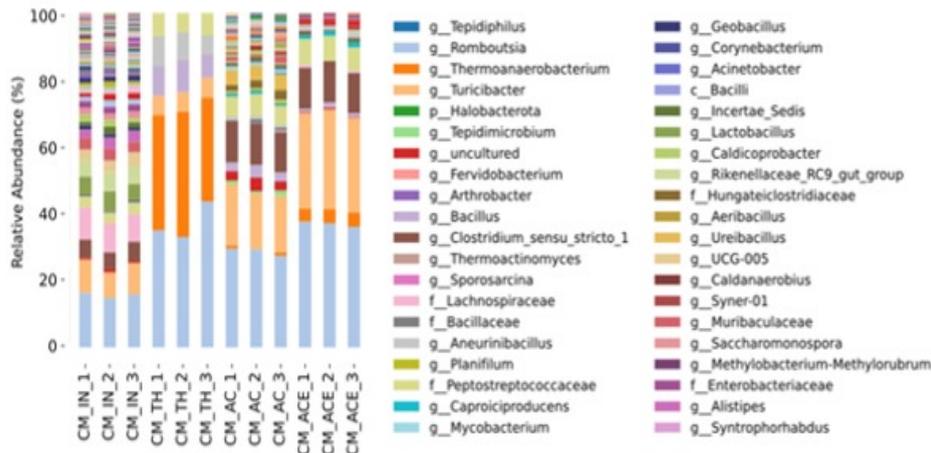


Figura 1 - Perfil taxonômico da comunidade microbiana identificada por sequenciamento 16S do inóculo in natura e pré-tratado.

Esses resultados apontam que o pré-tratamento térmico é mais eficaz para a etapa acidogênica, enquanto o ácido pode favorecer maior estabilidade na etapa metanogênica. A estratégia de dois estágios mostra-se promissora para valorizar resíduos da cadeia sucroenergética e diversificar os vetores energéticos gerados.

CONCLUSÕES:

Os resultados até o momento indicam que o uso do esterco bovino como inóculo para a co-digestão de vinhaça e torta de filtro apresenta potencial promissor para a produção de hidrogênio e biometano. O pré-tratamento térmico demonstrou maior eficiência na etapa acidogênica, favorecendo a produção de hidrogênio, possivelmente devido à seleção de bactérias termofílicas como *Thermoanaerobacterium*. Já o pré-tratamento ácido apresentou melhor desempenho na etapa metanogênica, com menor fase lag e maior estabilidade.

Esses achados reforçam a viabilidade técnica da aplicação de sistema de digestão anaeróbica em dois estágios utilizando resíduos da cadeia sucroenergético e inóculo de fácil obtenção. Os experimentos seguem em andamento com a continuidade dos ensaios de BMP e a finalização das análises metataxonômicas, com o objetivo de consolidar os dados e avaliar o potencial energético total da integração entre as rotas de produção de hidrogênio e biometano na biorrefinaria de cana-de-açúcar.

BIBLIOGRAFIA

BRAGA NAN, L. C. et al. Biohydrogen production from lignocellulosic biomass: technology and sustainability. *BioEnergy Research*, v. 13, p. 389–401, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10033-1>.

DZULKARNAIN, A. A. et al. Enhanced biohydrogen production using pretreated palm oil mill effluent: microbial community and metabolic pathway analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 5, p. 3260–3271, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.150>.

O-THONG, S. et al. Effect of temperature and initial pH on hydrogen production from palm oil mill effluent: thermophilic anaerobic technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 5, p. 1221–1231, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.008>.