

Produção de biogás a partir de bagaço de cana-de-açúcar e frações pré-tratadas

Rafael Moreira Marques¹, Felipe Orcelli Wojcieckowski², Gabriel de Szechy Vigna³, Dasciana Rodrigues⁴, Jhenifer Bastos⁵, Rossano Gambetta⁶

Resumo

O ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), ou *Biochemical Methane Potential* (BMP), é um método usado para avaliar a quantidade de metano que pode ser produzido a partir da decomposição anaeróbica de diferentes matérias orgânicas. A finalidade do estudo foi analisar o potencial de geração de biogás e biometano a partir do bagaço de cana-de-açúcar e de produtos provenientes da auto-hidrólise, sendo eles o sólido pré-tratado, o hidrolisado e a combinação dos dois. Além disso, houve o objetivo de observar se existe algum tipo de inibição, por meio da relação inóculo e substrato (RIS). A auto-hidrólise foi realizada a uma temperatura de 180 °C, durante 40 minutos e com uma proporção de 10 gramas de água para cada grama de bagaço de cana seco. Os quatro substratos foram capazes de gerar biogás. No entanto, na RIS 1:1, tanto o hidrolisado quanto o sólido pré-tratado mais o hidrolisado não apresentaram geração de gás metano.

Termos para indexação: PBM, bagaço de cana-de-açúcar, auto-hidrólise, RIS.

Introdução

Os resíduos lignocelulósicos são compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Estão presentes em materiais vegetais, como madeira, palha, bagaço de cana-de-açúcar e outros subprodutos da indústria agrícola, são altamente biodegradáveis por causa da presença de enzimas específicas em microrganismos, como bactérias e fungos, que são capazes de quebrar os componentes da lignocelulose em açúcares simples. Esses açúcares podem então ser convertidos em produtos úteis, como bioetanol, biogás ou outros produtos químicos. Apesar das vantagens potenciais, o processamento dos resíduos lignocelulósicos exhibe desafios significativos. A lignocelulose é altamente resistente à degradação e requer pré-tratamento adequado para quebrar as ligações químicas e facilitar a liberação dos açúcares. Os principais tipos de pré-tratamento são os físicos, químicos, térmicos e bioquímicos, mas também podem ter combinações entre eles. A auto-hidrólise é um processo hidrotérmico que utiliza água como agente para quebrar as ligações químicas da lignocelulose. Ela oferece a vantagem de evitar o uso de agentes químicos adicionais, mas requer controle preciso de temperatura e tempo de reação para maximizar a eficiência da quebra da lignocelulose (Baêta, 2016). O ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) é um método utilizado em laboratório para avaliar a quantidade de metano que pode ser produzido a partir da decomposição anaeróbica de diferentes matérias orgânicas. Ele é comumente usado para avaliar a capacidade de produção de biogás de materiais biodegradáveis (Holliger et al., 2016).

No ensaio de PBM, o substrato orgânico é colocado em um reator fechado chamado biodigestor, juntamente com um inóculo contendo microrganismos anaeróbios, como bactérias metanogênicas,

¹ Químico Tecnológico, Universidade de Brasília, rafael.marques@colaborador.embrapa.br

² Químico Tecnológico, Universidade de Brasília, felipe.orcelli@colaborador.embrapa.br

³ Graduando em Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, gabriel.vigna@colaborador.embrapa.br

⁴ Química industrial, doutora em Ciência em Engenharia Química, Embrapa Agroenergia, dasciana.rodrigues@embrapa.br

⁵ Engenheira ambiental, doutoranda em Sustentabilidade Ambiental Urbana, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, jhenifer.bastos@colaborador.embrapa.br

⁶ Engenheiro químico, doutor em Ciência em Engenharia Química, Embrapa Agroenergia, rossano.gambetta@embrapa.br

responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e produção de metano. O reator é mantido em condições anaeróbias, sem oxigênio, com temperatura e pH adequados para crescimento e atividade desses microrganismos. Ao longo do tempo, a produção de metano é monitorada por meio de medidas regulares do volume acumulado de gás metano gerado. A quantidade de metano produzida no ensaio de PBM é um indicativo do potencial de geração de biogás e pode ser usada para estimar a eficiência da degradação da matéria orgânica, bem como comparar diferentes substratos em termos de sua capacidade de produção de metano (Holliger et al., 2016; Verein Deutscher Ingenieure, 2006).

Nos testes de PBM, a quantidade de inóculo e substrato utilizada é baseada na relação inóculo/substrato (RIS). Esse parâmetro é crucial para o experimento, pois por meio dele é possível avaliar o potencial de produção do biogás ou a inibição de determinadas matérias orgânicas. Essa relação é calculada por meio dos sólidos voláteis, uma vez que essa medida indica a quantidade de resíduo orgânico. Na avaliação de produção do biogás, recomenda-se que a parte de sólidos voláteis do inóculo seja no mínimo o dobro do substrato. Já na verificação da inibição são necessárias frações iguais ou menores do inóculo (Holliger et al., 2016; Verein Deutscher Ingenieure, 2006). O objetivo do trabalho foi verificar o potencial de geração de biogás e biometano com o bagaço de cana-de-açúcar e com os produtos provenientes da auto-hidrólise, sendo eles o sólido pré-tratado, o hidrolisado e a combinação dos dois. Além disso, buscou-se observar se existe algum tipo de inibição por meio da variação de inóculo/substrato.

Materiais e métodos (T1)

Características do inóculo e substrato (T2)

O inóculo é originário do reator anaeróbio situado na área de plano piloto (APP) da Embrapa Agroenergia e contém 80% de digestato de biodigestor utilizado no tratamento de resíduos da suinocultura e 20% de resíduos brutos de bovinos. O reator está em funcionamento há 6 meses e recebe uma carga de alimentação de 0,5 g SV/L três vezes por semana. A alimentação é composta por uma mistura de farinha de milho, proteína de soja, óleo vegetal e água, mantendo o teor de sólidos totais abaixo de 10%. O substrato utilizado foi o bagaço de cana-de-açúcar, proveniente de uma usina de produção de etanol e açúcar localizada em Goiás, chamada Jalles Machado.

Aplicação do pré-tratamento por auto-hidrólise (T2)

O pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar foi processado em um reator de aço inoxidável com capacidade interna de 5 galões e controle de pressão e temperatura (marca Parr, modelo 4555). O reator foi alimentado com 0,8 Kg de bagaço de cana-de-açúcar e misturado com 8 L de água da torneira até que todo o material estivesse completamente absorvido e uniformemente misturado. A mistura foi levada para o reator e, sob agitação, foi aquecida até atingir a temperatura de 180 °C, mantida por 40 minutos nessa temperatura. Após essa etapa, o reator foi resfriado utilizando a recirculação de água fria na camisa, e o conteúdo foi coletado para a separação da fração líquida (hidrolisado) e da fração sólida (sólido pré-tratado). O conteúdo líquido totalizou cerca de 8 L, enquanto a parte sólida correspondeu a aproximadamente 0,7 Kg. Ambas as frações foram armazenadas em recipientes de vidro e mantidas a uma temperatura de -20 °C para evitar a degradação.

Ensaio de potencial bioquímico de biogás e metano (T2)

Os ensaios de potencial de produção de biogás (PBB) e metano (PBM) foram realizados seguindo uma metodologia descrita por Holliger et al. (2016), e os critérios foram mantidos na norma VDI 4630 (2005). Essa abordagem envolveu a realização de testes em batelada utilizando frascos de penicilina de 100 mL, empregados em temperatura mesofílica (37 °C). O volume de inóculo e substratos adicionados aos frascos foi calculado com base no balanço de massa, considerando o teor

de sólidos voláteis em base úmida. A relação inóculo/substrato (RIS) utilizada foi de 1:1, 3:1 e 5:1 (m/m). Um total de 42 frascos foi utilizado para incubar o inóculo, celulose microcristalina (padrão), bagaço de cana-de-açúcar in natura, receita sólida, receita líquida (hidrolisado) e mistura da receita sólida e líquida na proporção de 10:90 (m/m). Para avaliar a qualidade do inóculo em relação ao potencial de produção de biogás e metano, foram incubadas três garrafas contendo celulose microcristalina como amostra padrão, utilizando a relação inóculo/substrato de 3:1, conforme recomendado por Holliger et al. (2016). Para medir o volume de biogás produzido diariamente, utilizou-se uma seringa de vidro acoplada a um manômetro digital portátil, que foi conectado aos frascos de penicilina. O volume de biogás foi determinado pela movimentação do êmbolo da seringa, juntamente com a equalização da pressão interna com a pressão ambiente. O volume de gás medido na seringa de vidro foi verificado com base na temperatura e na pressão ambiente, levando em conta as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

Resultados e discussão (T1)

Na decomposição anaeróbia, as bactérias metanogênicas degradam a matéria orgânica e produzem biogás (gás metano e carbônico principalmente). A análise que mostra a quantidade dessa matéria presente na biomassa são os sólidos voláteis (Operação..., 2021). Neste trabalho, foi feita essa análise no inóculo e nos substratos. A Tabela 1 mostra os valores de sólidos totais (ST%) e sólidos voláteis em base úmida (SV%bu). A partir dos resultados, percebe-se que o bagaço de cana possui os maiores valores, seguidos do sólido pré-tratado, da mistura do sólido com o hidrolisado e por último somente o hidrolisado. Na Tabela 2, verifica-se que todas as relações inóculo/substrato (RIS) produziram biogás, sendo que todos os substratos produziram mais na RIS 5:1, em que que a proporção de sólidos voláteis de inóculo é cinco vezes maior que a de substrato. Percebe-se também que aumentou a produção de biogás com o crescimento da RIS. Referente ao gás metano, observa-se que houve inibição na produção tanto no hidrolisado quanto no hidrolisado mais sólido na relação 1:1, porém, nas outras RIS, esses dois substratos geraram mais gás metano que os outros.

Tabela 1. Teor de sólidos totais (ST%) e voláteis em base úmida (SV %bu).

Amostra	ST (%)	SV (%bu)
Bagaço de cana	92,7	89,9
Sólido pré-tratado	16,8	14,9
Hidrolisado	1,1	0,9
Sólido + hidrolisado	1,2	1,1

Nota-se também que a composição de metano no biogás foi maior na RIS 5:1 em todos os substratos. Comparando-os, identifica-se que o teor de metano ficou maior com o bagaço e o sólido pré-tratado na relação 1:1 e 3:1. No hidrolisado e na mistura, a produção de metano é praticamente zero na RIS 1:1, porém esses substratos produziram biogás. Desse modo, esse gás deve ser composto predominantemente por dióxido de carbono. Na Tabela 3, foram calculadas as quantidades de biogás e biometano em litros normalizados por quilograma de substrato seco (LN/Kg Sub) por meio dos valores de sólidos voláteis em base úmida e dos sólidos totais. Considerando-se como exemplo o bagaço de cana (RIS 5:1), que detém 89,9% de SV bu e 92,7% de ST, multiplicando-se o volume de biogás 601 ± 12 LN/Kg SV pelos SV bu e dividindo pelos ST, obtém-se o volume de biogás por quilograma de bagaço seco 583 ± 11 LN/Kg Substrato seco.

Segundo a Tabela 3, verifica-se que o hidrolisado e a mistura produziram mais biogás e biometano por quilograma, uma vez que nesses substratos há substâncias mais simples quimicamente e solúveis em meio aquoso e, portanto, mais fáceis de serem degradadas pelos microrganismos, pois passaram por um processo de auto-hidrólise (Baêta, 2016). Entretanto na relação 1:1,

em que a quantidade de hidrolisado e da mistura é maior que as outras relações, não houve produção de metano. Uma das razões podem ser altas concentrações de determinados compostos que inibem a atividade das metanogênicas (Operação..., 2021), por exemplo, ácidos orgânicos, compostos fenólicos e furanos, sendo que essas substâncias são geradas em auto-hidrólise de bagaço de cana (Baêta, 2016).

Tabela 2. Produção acumulada de biogás e biometano por Kg de SV e composição de metano seco nos diferentes substratos e RIS.

Substrato	Bagaço de cana	Sólido pré-tratado	Hidrolisado	Mistura (sólido+líquido)
RIS	Produção acumulada de biogás (LN/Kg SV)			
1:1	439 ± 11	270 ± 1	47 ± 5	67 ± 9
3:1	523 ± 10	360 ± 7	1100 ± 28	1050 ± 22
5:1	601 ± 12	474 ± 6	1296 ± 25	1181 ± 18
RIS	Composição de metano seco (%)			
1:1	57,20	55,80	0,00	0,00
3:1	52,20	55,40	26,30	28,80
5:1	61,10	64,70	48,30	63,00
RIS	Produção acumulada de metano (LN/Kg SV)			
1:1	251 ± 6	151 ± 0,3	0 ± 0	0 ± 0
3:1	273 ± 5	200 ± 4	289 ± 7	303 ± 7
5:1	367 ± 7	306 ± 4	626 ± 12	745 ± 11

Tabela 3. Produção acumulada de biogás e biometano por Kg de substrato seco nas diferentes RIS.

Substrato	Bagaço de cana	Sólido pré-tratado	Hidrolisado	Mistura (sólido + líquido)
RIS	Produção acumulada de biogás (LN/Kg Substrato)			
1:1	436 ± 11	239 ± 1	40 ± 4	58 ± 8
3:1	507 ± 9	319 ± 6	952 ± 24	916 ± 20
5:1	583 ± 11	419 ± 5	1121 ± 22	1030 ± 15
RIS	Produção acumulada de metano (LN/Kg Substrato)			
1:1	249 ± 6	133 ± 0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3:1	265 ± 5	176 ± 4	250 ± 6	264 ± 6
5:1	367 ± 7	306 ± 4	626 ± 12	745 ± 11

Conclusão

A partir dos resultados experimentais, compreende-se que os quatro substratos podem ser utilizados na produção de biogás e biometano. Entretanto, depende da quantidade de sólidos voláteis do inóculo e do substrato, uma vez que não foi apresentada geração de gás metano na RIS 1:1, tanto do hidrolisado quanto do sólido pré-tratado mais o hidrolisado. Um dos motivos pode ser a presença de substâncias tóxicas em maiores quantidades, como compostos fenólicos e furanos, além de altas concentrações de ácidos orgânicos. Nas relações 5:1 e 3:1, em que a fração dos

substratos são menores em relação ao inóculo, houve uma grande produção de biogás e biometano para o hidrolisado e a mistura, logo os microrganismos não são significativamente afetados com essas substâncias inibidoras em menores quantidades. A melhor condição de todos os substratos foi na relação 5:1, ou seja, foi nessa RIS que houve a maior produção de biogás e biometano. De modo que o bagaço gerou 583 ± 11 LN biogás/Kg e 367 ± 7 LN biometano/Kg; o sólido pré-tratado produziu 419 ± 5 LN biogás/Kg e 306 ± 4 LN biometano/Kg; o hidrolisado gerou 1121 ± 22 LN biogás/Kg e 626 ± 12 LN biometano/Kg; e a mistura produziu 1030 ± 15 LN biogás/Kg e 745 ± 11 LN biometano/Kg.

Referências bibliográficas

BAÊTA, B. E. L. **Aproveitamento energético a partir da digestão anaeróbia de hidrolisado hemicelulósico gerado pelo pré-tratamento por auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar considerando o contexto da biorrefinaria**. 2016. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7124>. Acesso em: 19 set. 2023.

HOLLIGER, C.; ALVES, M.; ANDRADE, D.; ANGELIDAKI, I.; ASTALS, S.; BAIER, U.; BOUGRIER, C.; BUFFIÈRE, P.; CARBALLA, M.; WILDE, V.; EBERTSEDER, F.; FERNÁNDEZ, B.; FICARA, E.; FOTIDIS, I.; FRIGON, J.; LACLOS, H. F.; GHASIMI, D. S. M.; HACK, G.; HARTEL, M.; HEERENKLAGE, J.; HORVATH, I. S.; JENICEK, P.; KOCH, K.; KRAUTWALD, J.; LIZASOAIN, J.; LIU, J.; MOSBERGER, L.; NISTOR, M.; OECHSNER, H.; OLIVEIRA, J. V.; PATERSON, M.; PAUSS, A.; POMMIER, S.; PORQUEDDU, I.; RAPOSO, F.; RIBEIRO, T.; PFUND, F. R.; STRÖMBERG, S.; TORRIJOS, M.; EEKERT, M.; LIER, J.; WEDWITSCHKA, H.; E WIERINCK, I. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, v. 74, n. 11 p. 2515–2522, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>

OPERAÇÃO e monitoramento de reatores anaeróbios: guia de boas práticas. Brasília, DF: MCTI, 2021. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil). Disponível em: <https://datasebrae.com.br/wp-content/uploads/2021/11/212D-Guia-opera%C3%A7%C3%A3o-e-monitoramento-de-biodigestores.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4630**: Fermentation of organic materials Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf, 2006.