

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS BOVINOS E SUÍNOS COM BAGAÇO DE MALTE

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.XV-002>

Ariani Cani (*), Kauê Daris Tripoli, Carolina Santos Gonçalves Gerber Soares, Jeane de Almeida do Rosário, Juliana Ferreira Soares

* Universidade do Estado de Santa Catarina, arianicani1@gmail.com.

RESUMO

As mudanças climáticas e o aumento da demanda energética estão sobrecarregando o sistema elétrico brasileiro, o que traz a necessidade de intensificar a busca e a utilização de fontes renováveis de energia. O biogás proveniente da digestão anaeróbia (DA) tem sido considerado promissor para enriquecer a matriz energética. No entanto, a eficiência do processo depende de alguns fatores que não podem ser ignorados, como a temperatura e agitação. Além disso, outro ponto que deve ser investigado é a co-digestão de diferentes substratos para potencializar a produção de biogás. Neste sentido, o objetivo do estudo foi avaliar a produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia do bagaço de malte com dejetos bovinos (BM+DB) e com dejetos suínos (BM+DS). A produção de biogás a partir da co-digestão do BM+DS e BM+DB foi avaliada sob diferentes condições de temperatura e agitação, conforme o planejamento experimental fatorial. Os ensaios foram conduzidos em batelada utilizando biorreatores de 500 mL. O volume acumulado de biogás foi de 11,4-117,5 mL nos ensaios com BM+DB e de 18,0-1012,0 mL nos ensaios com BM+DS. Os inóculos utilizados apresentaram comportamentos diferentes sob as condições operacionais estudadas, além de resultar em produções de biogás consideravelmente distintas. Enquanto o meio de digestão com DB teve melhor desempenho a 35 °C com agitação, resultando em 117,5 mL de biogás, o meio com DS foi melhor a 45 °C sem agitação, chegando a 1012,0 mL, valor este 8,6 vezes maior do que o obtido com DB. Com relação a análise estatística, verificou-se que apenas a agitação teve influência significativa de forma positiva na produção de biogás a partir do BM+DB. Por outro lado, a produção de biogás a partir do BM+DS foi influenciada estatisticamente de forma negativa pela agitação e positiva pela temperatura. Comparando os dois tipos de inóculos estudados, foi possível constatar que o DS apresentou desempenho superior, resultando em um volume de biogás quase nove vezes maior que o DB.

PALAVRAS-CHAVE: Co-digestão anaeróbia, biogás, bagaço de malte, dejetos bovinos, dejetos suínos.

ABSTRACT

Climate change and the increase in energy demand are overloading the Brazilian electrical system, which brings the need to intensify the search for and use of renewable energy sources. Biogas from anaerobic digestion (AD) has been considered promising to enrich the energy matrix. However, the efficiency of the process depends on some factors that cannot be ignored, such as temperature and agitation. Furthermore, another point that should be investigated is the co-digestion of different substrates to enhance the production of biogas. In this sense, the objective of the study was to evaluate the production of biogas from the anaerobic co-digestion of brewer's spent grain with bovine manure (BSG+BM) and with pig manure (BSG+PM). The production of biogas from the co-digestion of BSG+BM and BSG+PM was evaluated under different conditions of temperature and agitation, according to the factorial experimental design. The tests were conducted in batch using 500 mL bioreactors. The accumulated volume of biogas was 11.4-117.5 mL in the BSG+BM assays and 18.0-1012.0 mL in the BSG+PM assays. The inoculums used showed different behavior under the operational conditions studied, in addition to resulting in considerably different biogas productions. While the digestion medium with BM performed better at 35 °C with agitation, resulting in 117.5 mL of biogas, the medium with PM performed better at 45 °C without agitation, reaching 1012.0 mL, a value of 8.6 times greater than that obtained with BM. Regarding the statistical analysis, it was verified that only agitation had a significant positive influence on the production of biogas from BSG+BM. On the other hand, biogas production from BSG+PM was statistically negatively influenced by agitation and positively by temperature. Comparing the two types of inoculum studied, it was possible to verify that the PM presented a superior performance, resulting in a volume of biogas almost nine times greater than that of the BM.

KEY WORDS: Anaerobic co-digestion, biogas, brewer's spent grain, bovine manure, swine manure.



INTRODUÇÃO

No Brasil, grande parte da matriz energética é baseada em fontes renováveis (48,8%) (EPE, 2021). No entanto, o aumento da demanda energética está sobrecarregando o sistema elétrico (IEA, 2021). Além disso, a tendência da demanda energética é de crescimento ao longo dos próximos anos, pois está totalmente entrelaçada com a industrialização e o crescimento populacional. Portanto, a utilização de energia renovável é necessária para enriquecer a matriz energética e reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEEs) (CAPA et al., 2020).

Uma das possíveis formas de produção de energia limpa a partir da biomassa é a partir da digestão anaeróbia (DA). Essa tecnologia oferece diversos benefícios energéticos, ambientais e socioeconômicos, pois permite a produção de energia renovável, contribui para a melhoria da qualidade do ar (redução das emissões de GEEs), do solo (produção de composto orgânico), além de diminuir a dependência de combustíveis fósseis (SABER et al., 2021) e aproveitar resíduos que muitas vezes são subutilizados ou dispostos inadequadamente.

O processo de DA envolve a conversão de materiais orgânicos, na ausência de oxigênio, em biogás e digestato (biofertilizante). O biogás é composto, principalmente, por metano (40-75%) e dióxido de carbono (25-60%), além de compostos traços dependendo do substrato utilizado (RYCKEBOSCH et al., 2011). A DA é um processo metabólico realizado pela associação de diferentes grupos de microrganismos em sintrofia. O processo é dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (KUNZ et al., 2019). Cada etapa envolve diversos fatores que podem influenciar na produção e na composição do biogás gerado.

Dentre as variáveis que influenciam a DA, destaca-se a agitação e a temperatura. A agitação auxilia na transferência de calor, aumento na distribuição substrato, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor, além de colaborar para diminuição de crostas, otimizando a liberação do biogás. No entanto, a agitação acrescenta um custo de implantação e manutenção, além de que, se muito intensa, pode ocasionar problemas como a formação de espuma (KUNZ et al., 2019).

A temperatura influencia diretamente no equilíbrio termodinâmico das reações bioquímicas da DA e controla as atividades, taxa de crescimento e diversidade dos microrganismos (LIN et al., 2016). As bactérias que atuam no processo digestivo se caracterizam de acordo com a temperatura do sistema, sendo denominadas bactérias criófilas, as que atuam na faixa de 10 a 20 °C, mesófilas, as que atuam na faixa de 30 a 40 °C, e termófilas, as que atuam entre 45 e 60 °C. Manter temperaturas mais altas em escala real acarreta custos adicionais, sendo necessário uma avaliação da produtividade para determinar o investimento (KHAN, 2016; SOUZA, et al., 2005).

Um dos sub-produtos industriais que podem ser utilizados como substrato na DA é o bagaço de malte (BM), principal resíduo sólido gerado na indústria cervejeira. A utilização desse resíduo na DA pode trazer, no entanto, algumas dificuldades devido a sua estrutura complexa, composta por lignina, celulose e hemicelulose. Desta forma, sua monodigestão (digestão anaeróbia de apenas um tipo de resíduo orgânico) apresenta baixa biodegradabilidade e longos tempos de retenção (PANJIČKO et al., 2017). Uma solução para superar esses problemas é co-digerir resíduos lignocelulósicos com compostos ricos em nitrogênio, como lodo de tratamento de resíduos e esterco animal. Isso tende a melhorar a velocidade e o desempenho da DA, equilibrando a relação C/N e aumentando a população microbiana (ELSAYED et al., 2016).

OBJETIVO

O objetivo do estudo foi avaliar a produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia do bagaço de malte (BM) com dejetos bovinos (DB) e com dejetos suínos (DS), sob diferentes condições de temperatura e agitação.



METODOLOGIA

O bagaço de malte utilizado nos experimentos de produção de biogás foi doado por uma cervejaria de pequeno porte da cidade de Lages, SC, Brasil. Os dejetos suíno e bovino, que também atuaram como inóculo, foram obtidos frescos, em pequenas propriedades locais. Para evitar interferências no processo e nos resultados, os substratos foram coletados, fracionados e armazenados à -4 °C até o momento de uso. O bagaço de malte e os dejetos foram caracterizados quanto ao teor de umidade, sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV) e cinzas de acordo com o manual APHA (2012) e conduzidos em triplicata.

Os ensaios de produção de biogás foram realizados em escala laboratorial. Os ensaios foram conduzidos em batelada utilizando reatores com capacidade de 500 ml, vedados, contendo um termômetro fixo para controle da temperatura e uma saída para o biogás. O volume de biogás produzido foi determinado a cada 3 horas a partir de um sistema de descolamento de coluna d'água, composto por uma proveta graduada invertida, imersa em um reservatório preenchido com água. Os ensaios com agitação foram realizados em um agitador magnético com aquecimento, mantendo a agitação em 40 rpm, e os ensaios sem agitação em um banho maria para evitar a estratificação de temperatura no interior da mistura.

A produção de biogás a partir da co-digestão do bagaço de malte com dejetos suíno (BM+DS) e com dejetos bovinos (BM+DB) foi avaliada sob diferentes condições de temperatura e agitação, conforme o planejamento experimental fatorial apresentado na Tabela 1. A razão dos substratos em co-digestão foi de 1:1. O reator foi preenchido com 50 g de cada substrato (BM+DB ou BM+DS) e 300 g de água, totalizando um meio de digestão de 400 g. Em todos os ensaios o pH inicial do meio foi ajustado em 7,0 ± 0,1.

Tabela 1: Planejamento experimental fatorial para produção de biogás. Fonte: Autores, 2022.

Ensaio	BM+DB		BM+DS	
	T (°C)	Agitação (%)	T (°C)	Agitação (%)
1	35 (-1)	Com agitação (+1)	35 (-1)	Com agitação (+1)
2	35 (-1)	Sem agitação (-1)	35 (-1)	Sem agitação (-1)
3	45 (+1)	Sem agitação (-1)	55 (+1)	Sem agitação (-1)
4	45 (+1)	Com agitação (+1)	55 (+1)	Com agitação (+1)
5	40 (0)	Agitação intermitente (0)	45 (0)	Agitação intermitente (0)

O processamento dos dados e a elaboração das curvas cinéticas foram realizadas pelo *software* Microsoft Excel. A avaliação do planejamento experimental fatorial foi feita pelo *software* Statistica e expressa pelo gráfico de Pareto.

RESULTADOS

A determinação do teor de umidade, ST, SV, SF e cinzas do BM, DB e DS foi realizada em triplicata, obtendo-se a média e o desvio padrão que estão apresentados na tabela 2. O bagaço de malte apresentou maior proporção de ST, tendo assim, maior proporção de SV também, indicando a presença de boa quantidade de matéria orgânica e maior potencial de produção de biogás.

Tabela 2: Caracterização física dos substratos utilizados para produção de biogás. Fonte: Autores, 2022.

Composição (%)	Bagaço de Malte	Dejeto Bovino	Dejeto Suíno
Umidade	67,69 ± 2,25	88,29 ± 0,09	79,49 ± 0,41
Sólidos totais	32,31 ± 2,25	11,70 ± 0,09	20,51 ± 0,41
Sólidos fixos	1,21 ± 0,44	1,67 ± 0,02	4,73 ± 0,04
Sólidos voláteis	31,10 ± 1,90	10,03 ± 0,08	15,77 ± 0,37
Cinzas	0,72 ± 0,14	1,61 ± 0,01	4,64 ± 0,15

A tabela 3 apresenta os resultados de volume acumulado de biogás em cada ensaio. Nota-se que o maior volume acumulado de biogás produzido se deu no ensaio 1 para BM+DB e no ensaio 3 para o BM+DS, enquanto o menor ocorreu no ensaio 2 para BM+DB e no ensaio 1 para BM+DS. Desta forma, fica evidenciado que os inóculos utilizados apresentaram comportamentos diferentes sob as condições operacionais estudadas, além de resultar em produções de biogás consideravelmente distintas. Enquanto o meio de digestão com DB teve melhor desempenho a 35 °C com agitação, resultando em 117,5 mL de biogás, o meio com DS foi melhor a 45 °C sem agitação, chegando a 1012,0 mL, valor este quase nove vezes maior do que o obtido com DB.



Tabela 3: Volume acumulado de biogás produzido a partir da co-digestão anaeróbia do bagaço de malte com dejetos bovino e com dejetos suíno. Fonte: Autores, 2022.

Ensaio	BM+DB	BM+DS
	Volume Acumulado (ml)	Volume Acumulado (ml)
1	117,5	18,0
2	11,4	397,0
3	16,3	1012,0
4	66,3	150,0
5	100,0	610,0

Os ensaios de maior e menor produção de biogás com DB foram realizados sob temperatura mesofílica de 35 °C, porém, com e sem de agitação, respectivamente. Isso significa que a agitação influenciou no processo de biodegradação da matéria orgânica, uma vez que promove o aumento na distribuição de substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no interior do reator, mantém a temperatura uniforme em todo o meio, além de evitar a formação de crosta que impede a liberação do biogás do meio (KUNZ et al., 2019).

O ensaio 5 do BM+DB, realizado em temperatura de 40 °C, foi o segundo maior volume produzido dentre os ensaios realizados. Isso se deve a junção de uma temperatura ligeiramente mais alta, com a agitação intermitente. O efeito causado no reator é o de mistura do meio e liberação de biogás aos poucos, o que favorece o contato dos microrganismos com os nutrientes de maneira gradual. É importante salientar que as bactérias presentes nos reatores são provenientes dos dejetos bovinos, e que no rúmen de um bovino a temperatura é de cerca de 39°C (KARLSSON et al., 2014). Assim, os organismos reagiram melhor a temperatura mais próxima da qual é adequada para a sua sobrevivência, proporcionando maior produção de biogás.

A Figura 1 apresenta as curvas cinéticas da produção de biogás para os ensaios com BM+DB. Nota-se que nas primeiras 12 horas de retenção os ensaios 1 e 5 apresentaram maior produção de biogás. A agitação e a temperatura influenciam na velocidade de degradação da matéria orgânica, uma vez que facilitam a quebra das moléculas. O aumento da produção de biogás nas primeiras horas pode ser atribuído à decomposição de substâncias altamente degradáveis, como a matéria orgânica do DB. Após as 18 primeiras horas, ocorre o declínio na produção de biogás, promovido pela lenta degradação do bagaço de malte, devido à presença de compostos como celulose, hemicelulose e lignina, e pelo acúmulo de ácidos da etapa de acidogênese (RANJBAR; KARRABI; SHAHNAVAZ, 2022).

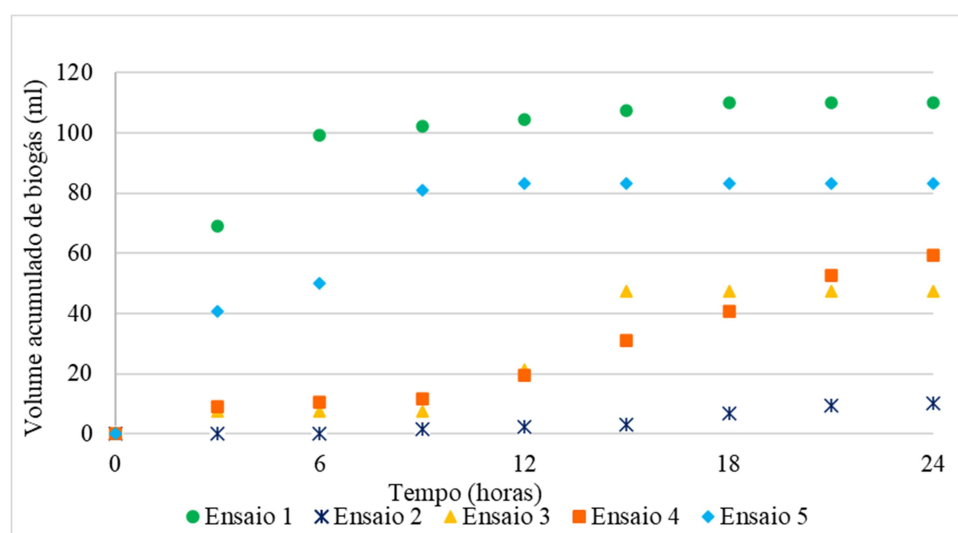


Figura 1: Curvas cinéticas da produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia do bagaço de malte com dejetos bovino. Fonte: Autores, 2022.



O efeito da agitação na produção de biogás a partir do BM+DB foi confirmado pela análise estatística do Gráfico de Pareto, apresentado na figura 2. Considerando 95% de confiança, o gráfico indica que a agitação possui correlação positiva com a produção de biogás, isto é, quanto maior o tempo de agitação do meio, maior a produção de biogás. Em contrapartida, a temperatura não demonstrou efeito significativo na produção de biogás.

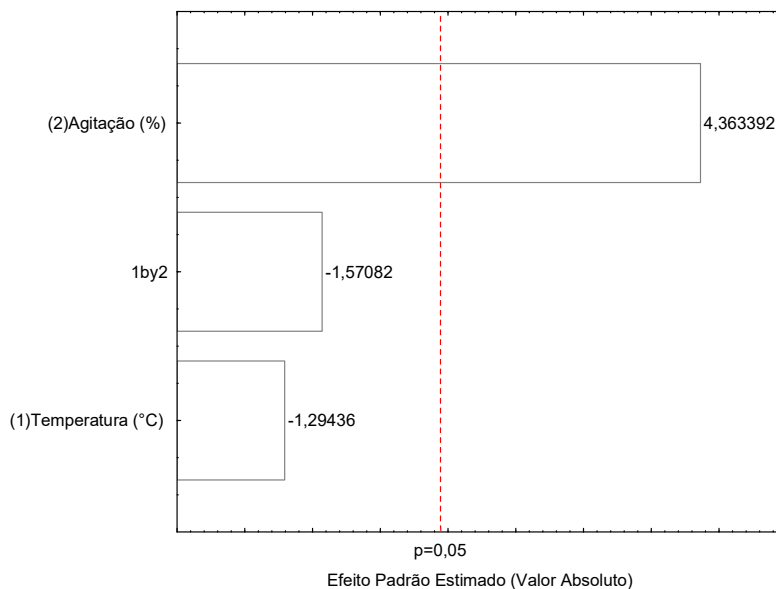


Figura 2: Efeito das variáveis temperatura e agitação na produção de biogás a partir co-digestão anaeróbia do bagaço de malte com dejetos bovinos. Fonte: Autores, 2022.

No caso do BM+DS, o ensaio 1 resultou na maior produção de biogás (1012 mL), o qual foi conduzido a 55 °C sem agitação. Por outro lado, o ensaio 5, que foi realizado a 45 °C e com agitação intermitente (a cada 3h), obteve uma produção de 610 mL, sendo a segunda maior produção. Portanto, as condições termofílicas promoveram maiores rendimentos, tanto no meio sem agitação quanto com agitação intermitente. A condição termofílica geralmente apresenta os melhores resultados de produção inicial, pois tem melhor desempenho na etapa da hidrólise (GE, et al. 2016), além disso, as bactérias termofílicas têm maior resistência ao acúmulo da amônia (GALLERT et al., 1998).

A figura 3 apresenta as curvas cinéticas de produção de biogás para os ensaios com BM+DS, as quais demonstraram diferentes comportamentos. O primeiro foi a produção acelerada dos ensaios 2 e 5. Por outro lado, o ensaio 3, que apresentou a melhor eficiência, evidenciou uma produção mais tardia, iniciando após 8 horas.

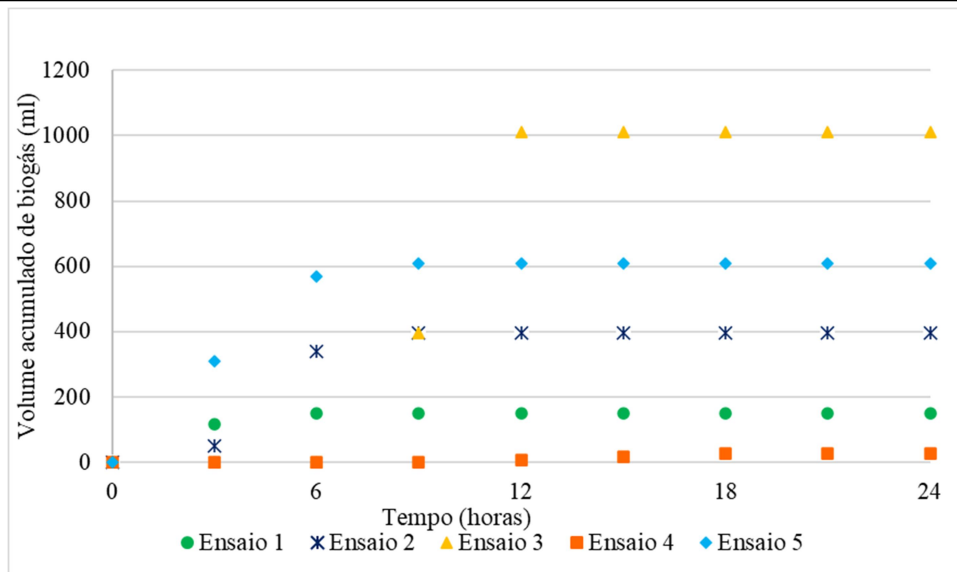


Figura 3: Curvas cinéticas da produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia do bagaço de malte com dejetos suíno. Fonte: Autores, 2022.

Para os ensaios com DS, aqueles expostos a agitação constante apresentaram uma produção e rendimento inferiores aos que não foram expostos a agitação. Isto representa um efeito negativo da agitação sob a produção do biogás para estas combinações. Para estes experimentos, os ensaios sob agitação constante apresentaram formação de espuma, que inviabilizou a continuidade do processo, o que pode ser resultante da agitação muito intensa. Neste sentido, não utilizar agitação no meio de digestão resulta em menor investimento e manutenção, sendo benefício financeiro para o processo.

Deste modo, fica evidenciada a influência positiva da ausência de agitação, combinada a aplicação de temperatura termofílica nos ensaios com DS. Isso porque a mistura contínua e vigorosa perturba a estrutura dos grupos microbianos, que, por sua vez, perturba as relações sintróficas entre os organismos, afetando adversamente o desempenho do processo (STROOT et al., 2001). Esta análise corrobora com o resultado da análise estatística representada pelo gráfico de Pareto na figura 4. Considerando 95% de confiança, observa-se que a produção biogás foi influenciada estatisticamente de forma negativa pela agitação e positiva pela temperatura.

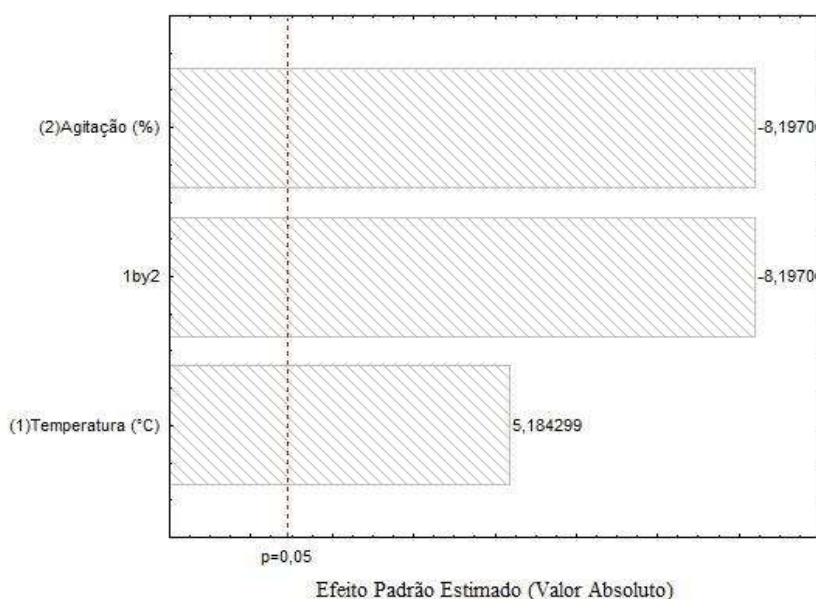


Figura 4: Efeito das variáveis temperatura e agitação na produção de biogás a partir da co-digestão do bagaço de malte com dejetos suíno. Fonte: Autores, 2022.



Quanto ao pH final, nos ensaios com BM+DB todos os valores ficaram abaixo de 4,0, enquanto nos ensaios com BM+DS o mais alto foi de 5,41 no ensaio 3. O pH é um dos principais fatores que afetam o processo de digestão. Os ácidos orgânicos produzidos durante a DA tendem a reduzir o pH, inibindo a atividade dos microrganismos metanogênicos, os quais preferem a faixa de pH entre 6,5 e 7,2 (APPEL et al., 2008). A queda de pH também pode ocorrer devido a presença de compostos lignocelulósicos e pela decomposição da matéria orgânica na fase de acidogênese, que favorecem a produção de ácidos graxos voláteis como o fórmico, butírico, valérico e propiônico (RANJBAR; KARRABI; SHAHNAVAZ, 2022). Desta forma, o pH ácido no final do processo indicou a inibição do processo de DA.

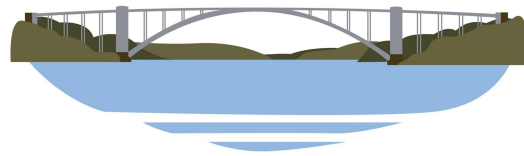
CONCLUSÕES

Os ensaios com BM+DB apresentaram melhores resultados quando aplicada a temperatura mesofílica, representando um ponto econômico importante, uma vez que a temperatura de operação mesofílica requer menor gasto de energia em comparação às temperaturas mais altas. Já os ensaios com BM+DS realizados em condições de temperatura termofílica apresentaram melhor desempenho quando comparado aos ensaios que ficaram sob condições mesofílicas, o que demonstra que a condição termofílica tem uma maior eficiência para esta combinação.

Para os ensaios com BM+DB, os resultados demonstram que a agitação foi o fator relevante para produção de biogás. Os ensaios com agitação produziram maiores volumes acumulados de biogás. Por outro lado, os ensaios com BM+DS sem agitação apresentaram a melhor eficiência na produção do biogás. Comparando os dois tipos de inóculos estudados, foi possível constatar que o DS apresentou desempenho superior, resultando em um volume de biogás quase nove vezes maior que o DB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22^o ed. Washington (USA), 2012.
2. APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. **Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge**. Progress In Energy and Combustion Science, v. 34, n. 6, p. 755-781, dez. 2008.
3. CAPA, A.; GARCÍA, R.; CHEN, D.; RUBIERA, F.; PEVIDA, C.; GIL, M.V. **On the effect of biogas composition on the H₂ production by sorption enhanced steam reforming (SESR)**. Renewable Energy, v. 160, 2020, p. 575-583.
4. ELSAYED, M.; ANDRES, Y.; BLEL, W.; GAD, A.; AHMED, A. **Effect of VS organic loads and buckwheat husk on methane production by anaerobic co-digestion of primary sludge and wheat straw**. Energy Conversion and Management, v. 117, p. 538-547, jun. 2016.
5. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>.
6. GALLERT, C; BAUER, S; WINTER, J. **Effect of ammonia on the anaerobic degradation of by a mesophilic and thermophilic biowaste population**. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 50, 1998, p. 495-501.
7. GE, X.; XU, F.; LI, Y. **Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives**. Bioresource Technology, v. 205, 2016, p. 239-249.
8. IEA. International Energy Agency. **E4 Country Profile: Energy Efficiency in Brazil. 2021**. IEA, Paris.
9. KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual Básico de Biogás**. 1 ed. Lajeado: Ed. Univates, 2014. 69 p.
10. KHAN, M.A.; NGO, H.H.; GUO, W.S.; LIU, Y.; NGHIEM, L.D.; HAI, F.I.; DENG, L.J.; WANG, J.; WU, Y. **Optimization of process parameters for production of volatile fatty acid**. Biohydrogen and Methane from Anaerobic Digestion, v. 21, 2016, p. 738 – 748.
11. KUNZ, A.; STEINMETZ, R.L.R.; AMARAL, A.C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves. 1^a ed., 2019. 209 p.
12. LIN, Q.; VRIEZE, J. D.; HE, G.; LI, X.; LI, J. **Temperature regulates methane productin through the function centralization of microbial community in anaerobic digestion**. Bioresource Technology, v. 216, 2016, p. 150-158.
13. PANJIËKO, M.; ZUPANËIË, G.D.; FANEDL, L.; LOGAR, R.M.; TIËMA, M.; ZELIĆ, B. **Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors**. Journal Of Cleaner Production, v. 166, p. 519-529, 2017.
14. RANJBAR, F.M.; KARRABI, M.; SHAHNAVAZ, B. **Bioconversion of wheat straw to energy via anaerobic co-digestion with cattle manure in batch-mode bioreactors (Experimental investigation and kinetic modeling)**. Fuel, v. 320, p. 123946, 2022.



15. RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane.** Biomass And Bioenergy, v. 35, n. 5, p. 1633-1645, 2011.
16. SABER, M.; KHITOUS, M.; KADIR, L.; ABADA, S.; TIRICHINE, N.; MOUSSI, K.; SAIDI, A.; AKBI, A.; AZIZA, M. **Enhancement of organic household waste anaerobic digestion performances in a thermophilic pilot digester.** Biomass And Bioenergy, v. 144, p. 105933, 2021.
17. SOUZA, C.F. **Biodigestão anaeróbica de dejetos suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato – considerações sobre a partida.** Engenharia Agrícola, v. 25, n. 2, p. 530-539, 2005.
18. STROOT, P. **Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions— I. digester performance.** Water Research, v. 35, n. 7, p. 1804-1816, 2001.