



A IMPORTÂNCIA NA ADAPTAÇÃO DO INÓCULO EM SISTEMA DE CODIGESTÃO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE PECUÁRIAS E DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

RESUMO

O tratamento através da DA aplicado em resíduos provenientes das indústrias de sucroalcooleiros e pecuárias em sistemas de co-digestões possui um enorme potencial bionergético, promovendo um ambiente mais favorável para DA, fornecendo mais carga orgânica e consórcio microbiano mais diversos. Este trabalho avaliou a codigestão de vinhaça (VN) e esterco bovino (CM), avaliando um inóculo anaeróbico submetido a sucessivos ensaios de mono e codigestão de potencial bioquímico de metano (BMP). Na fase 1, a quantidade de CM nos ensaios de codigestão variou de 2 a 20%, considerando a vinhaça como substrato principal. Nos reatores de monodigestão, VN ou CM foram adicionados como único substrato. A adaptabilidade do inóculo foi avaliada em um ensaio sequencial de BMP. Ao final da fase 1, o conteúdo de cada reator foi centrifugado e o inóculo foi submetido às mesmas condições da fase anterior, iniciando a fase 2. A maior produção específica de metano (PME) na fase 1 foi de 1327 ± 50 ml NCH₄/gTVS para os reatores 90% VN:10% CM, entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre os ensaios de mono e codigestão (PME de 937 ± 30 a 1136 ± 24 ml NCH₄/gTVS), exceto para o 98% VN:2% CM (420 ± 39 ml NCH₄/gTVS). Entretanto, na fase 2, foi observado um efeito adaptativo. O SMP dos testes 90:10% aumentou para 2100 ± 93 ml NCH₄/gTVS, seguido pelos testes 80:20% e 95:5% (1986 ± 97 ml NCH₄/gTVS e 1885 ± 32 ml NCH₄/gTVS, respectivamente). A monodigestão, no entanto, não resultou em um aumento significativo no SMP. No caso do VIN, nenhuma diferença estatística foi observada entre as fases 1 e 2. Para o CM, um aumento de 24% foi observado. Nos ensaios 98:2%, nenhuma produção de metano foi medida na fase 2. Os resultados indicaram que, em sistemas de codigestão, a adaptação do inóculo parece aumentar a produtividade de metano. Este resultado, no entanto, não foi observado em sistemas de monodigestão.

Palavras-chaves: Biometano; Biomassa; Descabornização; Consórcio; Bioquímico.

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes através da digestão anaeróbia visando a produção de biogás e biometano demonstra ser uma ótima alternativa para a mitigação dos impactos gerados na emissão de gases de efeito estufa, promovendo uma solução mais sustentável, rentável e viabiliza uma descabornização na linha de produção.

Ao analisar os setores sucroalcooleira e pecuária, que possuem resíduos difíceis para serem degradados, a digestão anaeróbia promove um tratamento mais eficiente com grande potencial energético presente nesses resíduos, em específico a vinhaça e o estrume bovino.

A vinhaça é um subproduto gerado na produção de etanol que possui uma característica de resíduo orgânico líquido, com coloração escura e odor forte. Contém um pH predominantemente ácido e com uma alta concentração de nutrientes como cálcio, potássio e

magnésio. Produzida a uma temperatura de aproximadamente 107°C na fase de destilação, atingi volume de 10 a 15 litros a cada 1 litro de etanol produzido. Esse efluente possui uma característica e propriedade específica a partir do tipo de matéria-prima utilizada na produção do etanol. (Calegari, 2017). Com as características únicas presentes na vinhaça, o efluente acaba sendo submetido a diversas formas de tratamentos como a produção de proteínas, rações animais e o uso agrícola como parte de adubação mineral (fertirrigação) (Calegari, 2017). Neste sentido, a prática mais usada atualmente para disposição da vinhaça é a fertirrigação, que vem gerando grandes impactos ambientais ao longo dos anos, principalmente devido ao seu conteúdo orgânico de característica ácida e a presença de sólidos dissolvidos. Infelizmente o uso indiscriminado dessa técnica vem maximizando os efeitos negativos, provocando a salinização do solo, lixiviação de metais e sulfato e contaminação de águas subterrâneas (Fuess et al., 2020).

A capacidade de geração do biogás no tratamento da vinhaça depende do volume final de etanol produzido, podendo alcançar um volume de 185 m³ de biogás a partir da produção de 1 m³ de etanol, onde 60% desse volume de biogás gerado é metano. As características caloríficas do biogás vão depender da concentração do metano e o grau da umidade do gás, sendo adotado em média de 5.500 kcal/m³ quando considerado o biogás seco com 60% de metano (Pompermayer; Júnior, 2000).

Em relação ao estrume bovino segundo (Santos; Nogueira, 2012), a média de produção diária de estrume bovino no Brasil é de 21 kg/animal. Avaliando esses parâmetros o volume de esterco produzido no Brasil pelo gado confinado, em escala anual seria de aproximadamente 40,3 milhões de toneladas. Conforme o censo de confinamento de 2022 (DMS), cerca de 6,95 milhões de animais bovinos foram confinados, essa prática vem aumentando no setor devido aos benefícios no impacto econômico e ambiental de forma positiva. Na produção confinada, os resíduos orgânicos provenientes podem incluir estrume bovino, urina, rumem animal devido ao abate, retalhos de couro, sangue e materiais cárneos, sendo gerado em média de 20 a 50 kg/cabeça abatida (Nunes; Júnior; Guimarães, 2017) e sua caracterização varia conforme a sua origem. Dentro do curral, os dejetos como esterco e urina são denominados como “linha verde” e possui um grande impacto ambiental negativo. A manutenção da limpeza dos currais acaba gerando um alto volume de água poluída, resultando em um grande volume de efluentes a serem tratados (Nunes; Júnior; Guimarães, 2017). Os resíduos proeminentes do abate, como o sangue, recebem o nome de “linha vermelha” e também acabam gerando um enorme impacto ambiental negativo. As duas linhas de resíduo gerado possuem um alto potencial poluidor, podendo impactar águas subterrâneas e superfícies devido a sua alta concentração de matéria orgânica, nutrientes e sua característica de degradações orgânicas como odor ruim e emissões de gases poluidores para atmosférica (Gonçalves, 2010).

A produção de biogás dentro de uma linha de produção pode trazer muitas vantagens, destacando a (i) diminuição no lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera, devido a sua bioeletricidade neutra em carbono, promovendo o desenvolvimento de energia limpa; (ii) a redução nas perdas no sistema de transmissão, devido a concentração das usinas sucroalcooleiras estarem instaladas principalmente na região Centro sul do país, região de maior consumo elétrico nacional; (iii) a eletricidade gerada pode ser escoada diretamente para rede de distribuição; (iv) o uso eficiente dos insumos de origem nacional.

Conforme estudos do Centro Internacional de Energias Renováveis e Biogás (CIBiogás), nos últimos cinco anos a produção de biogás no Brasil mais que duplicou, sendo produzidos 2,88 bilhões de m³/ano para o aproveitamento energético de 2022. Ocorreu um aumento de 110% em relação ao volume produzido no ano de 2018. O número de plantas em operação em território nacional totalizou 885 unidades em 2022, sendo um aumento de 15% com 114 novas plantas comparadas com o ano de 2021. Entretanto esse aumento ainda significa

apenas 26% do potencial de curto prazo de produção de biogás no país, que está estimado em 10,8 bilhões de m³/ano.

O panorama nacional de biogás no ano de 2022 foi de um crescimento forte no estado de Minas Gerais, sendo o estado com mais planta de biogás em operação, 274 unidades. Em seguida vem o estado do Paraná de 198 plantas e Santa Catarina com 82 plantas em operação.

Os estados que obtiveram um crescimento mais expressivo no ano de 2022 em relação ao ano de 2021 foi São Paulo com 21% de aumento nos números de plantas existentes, seguido do estado do Paraná com crescimento de 18% e o estado de Goiás com crescimento de 16%.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A adaptação de inóculo em sistema de mono e codigestão para tratamento de resíduos da pecuária e das indústrias sucroalcooleira com intuito de produzir biogás foi realizado através de experimentos em escala laboratorial, utilizando como substratos de codigestão estrume bovino proveniente de frigorífico localizado no município de Poços de Caldas – MG, junto com a vinhaça coletado em uma usina de cana-de-açúcar na cidade de Iracemápolis – SP. O inóculo utilizado na adaptação do sistema foi coletado em um reator UASB em operação para tratamento de efluentes de abatedouro de aves no município do Tiête – SP.

A operação do experimento se deu através de frascos de vidro borossilicato de graduação de 250 ml, tampado com rosca e septo de borracha para vedação, desta forma simulando um reator para tratamento desses resíduos através da digestão anaeróbia. Cada reator foi adicionado 125 ml de volume líquido, compostos pela mistura de vinhaça, estrume bovino e inóculo, os outros 125 ml foi destinado como volume de headspace no qual será armazenado o biogás produzido na digestão anaeróbia.

Com intuito de investigar diferentes condições para a codigestões dos resíduos utilizou o método de VDI4630 (Deutscher, 2006), que preconiza a realização de ensaios bioquímicos de metano na proporção de 2:1 em termos de sólidos voláteis totais para o inóculo e substratos. A caracterização em relação do teor de sólidos totais, sólidos totais voláteis e sólidos totais fixos foi realizado conforme o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Apha, 2012). Desta forma foi determinado 2 condições de mono digestão, 4 condições de codigestões variando a proporção entre vinhaça e estrume bovino e 2 controles, resultando em 1 mono digestão de vinhaça e inóculo, 1 mono digestão de estrume bovino com inóculo, 1 codigestão com 98% de vinhaça e 2% de estrume, 1 codigestão com 95% de vinhaça e 5% de estrume bovino, outra com 90% de vinhaça e 10% de estrume bovino e outra com 80% de vinhaça e 20% de estrume, 1 controle foi feito com celulose e inóculo, preenchido com água e por fim 1 controle apenas com inóculo e água. Todas condições foram realizadas em triplicadas, totalizando 24 simulações.

Para a coleta desse biogás produzido utilizou uma seringa de 500 ml e a coleta foi realizado diariamente no início conforme a diminuição do volume de biogás produzido, a coleta foi sendo realizada em dias alternados, até estabilizar a produção de biogás.

O experimento ocorreu em 3 fases, sendo a primeira fase rodada em aproximadamente em 200 dias. Finalizado a 1 fase, ocorreu uma centrifugação nos reatores com velocidade de 3500 RPM por 20 minutos, separando a parte líquida da parte mais sólida que era composto por inóculo. A parte líquida foi descartada e em seguida foi adicionado a mesma quantidade de vinhaça e estrume bovino, mantendo o volume sólido restante dentro dos reatores.

Mantendo a operação em mesmas condições na 2º fase, os reatores produziram biogás aproximadamente por 140 dias consecutivos, ao finalizar foi realizado novamente centrifugação e mesmo procedimento de montagem que na fase anterior. Por fim a 3º fase operou por apenas 75 dias e finalizando a produção do experimento.

Os volumes de biomassa de inóculos no início da fase 2 variou entre 2 a 40 ml, no início da fase 3 variou entre 10 a 40 ml, mas de modo geral analisando as mesmas condições a biomassa de inóculo teve seu volume diminuído da fase 2 para fase 3.

Como condições de controle das operações, foi controlado a temperatura em aproximadamente 30°C, pH na faixa entre 6 e 8, e realizou análises de sólidos voláteis, DQO, alcalinidade em todos fim e início das fases.

O gás coletado foi submetido a análise cromatográfica gasosa, determinando o percentual médio de metano presente em cada simulação realizada, desta forma foi possível determinar o biogás produzido, a produção específica de metano e o percentual máximo de metano presente no biogás nas fases 1,2 e 3.

Todos reatores foram operados por aproximadamente 415 dias, ou seja, 1 ano e 3 meses aproximadamente. Na época de frio, os reatores ficaram alojado em uma estufa a 35 °C, isso ocorreu no final de operação da fase 1 e em toda operação da fase 2 e 3. Antes dessa mudança, os reatores ficaram alojados em uma câmara de grande porte com a temperatura variando entre 25 a 30°C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização dos substratos vinhaça e estrume bovino, assim como o inóculo se deu por meio da análise de sólidos totais, voláteis e fixos, realizada previamente aos ensaios de potencial bioquímico de metano (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização dos substratos em relação a fração de sólidos

Amostra	Sólidos totais (g/l)	Sólidos totais voláteis (g/l)	Sólidos totais fixos (g/l)	Sólidos voláteis / Sólidos totais (%)
Vinhaça	40,9±0,7	27,6±0,6	13,3±1,3	67,6
Estrume	16,1±1,1	13,9±1,0	3,3±0,1	79,0
Inóculo	13,4±3,3	10,1±3,0	3,2±0,3	76,0

Fonte: Produção do próprio autor.

A vinhaça foi o substrato que apresentou o maior conteúdo de sólidos, tendo o teor de sólidos totais voláteis perante a fração de sólidos totais com estimativa de 67%. No caso do estrume bovino, apesar do menor conteúdo de sólidos voláteis totais, a relação entre sólidos voláteis perante ao sólidos totais foi estimado em 79%, indicando que no caso do estrume bovino existe maior disponibilidade de matéria orgânica disponível para a conversão em biogás. O inóculo apresentou o menor conteúdo de sólidos totais e voláteis comparando aos substratos analisados e sua relação de sólidos foi estimada em 76%.

O volume de biogás na fase 1 não obteve diferenças significativas nos monos e codigestões, tendo como maiores volumes de mono digestão de estrume bovino de 1275±26 ml e o volume da codigestão vinhaça 90% e estrume bovino 10% com 1223±43 ml. Na fase 2 já foi possível observar uma grande diferença entre os sistemas de mono e codigestão, sendo o volume produzido de 2486±121 na codigestão vinhaça 80% e estrume bovino 20% e no mono digestão novamente o estrume bovino com volume de 1745±97 ml. Pode observar que de modo geral a fase 2 apesar de operar em menos dias conseguiu obter volumes maiores que na fase 1, onde o experimento ocorreu em mais dias. Já na fase 3, foi observado um decaimento considerável no volume de biogás de todas amostras, mantendo a codigestão 80%:20% com

maior volume de biogás produzido, 1268±151 ml, seguido do mono estrume bovino, com 1192±84 ml, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Volume total acumulado de biogás e pH inicial e final de cada fase experimental

Condição Experimental	Fase I			Fase II			Fase III		
	Volume Acumula do Biogás (ml)	pH _i	pH _f	Volume Acumula do Biogás (ml)	pH _i	pH _f	Volume Acumula do Biogás (ml)	pH _i	pH _f
Controle negativo	201±30	-	-	-	-	-	-	-	n.d.
Controle positivo	1125±112	7,9	7,9	1528±246	7,6	7,8	307±206	7,3	6,2
Vinhaça	1099±216	7,6	7,6	1555±97	7,4	7,8	580±309	7,8	7,6
Estrume	1275±26	7,9	7,6	1745±178	7,7	7,7	1192±94	7,4	7,6
Vinhaça+Estrume (98:2%)	473±44	8,3	7,4	-	-	-	-	-	-
Vinhaça+Estrume (95:5%)	879±29	7,6	7,6	1695±28	7,3	7,8	998±120	7,5	7,4
Vinhaça+Estrume(90:10%)	1223±43	7,3	7,7	1978±88	7,3	7,7	493±205	7,5	7,5
Vinhaça+Estrume(80:20%)	1043±47	7,2	7,7	2486±121	7,5	7,6	1268±151	7,7	7,6

Fonte: Produção do próprio autor.

Em relação a produção específica de metano na fase 1, a codigestão de vinhaça 90% e estrume bovino 10% demonstrou o maior volume de 1327±50 ml NCH₄/ gSTV, o restante das misturas não obtiveram grandes diferenças na produção, exceto a mistura 98% vinhaça e 2% estrume bovino.

Na fase 2 manteve o mesmo padrão, sendo a vinhaça 90% e estrume bovino 10% com a maior produção de metano específico com 2100±93 ml NCH₄/ gSTV. Na fase 3 a produção caiu consideravelmente em todos reatores, sendo a codigestão 80% vinhaça e 20% estrume bovino a maior produção com 973±86 ml NCH₄/ gSTV conforme a tabela 3 a seguir.

Tabela 8 - Produção específica de metano nas fases 1,2 e 3

Condição Experimental	Fase I	Fase II	Fase III
	Produção específica (ml NCH ₄ / gSTV)		
Controle positivo	858±85	977±157	88±9
Vinhaça	1034±204	1193±74	199±4
Estrume	1136±24	1413±142	679±77
Vinhaça + estrume (98:2%)	420±39	-	-
Vinhaça + estrume (95:5%)	937±30	1885±32	811±86
Vinhaça + estrume (90:10%)	1327±50	2100±93	70±8
Vinhaça + estrume (80:20%)	968±44	1986±97	973±86

Fonte: Produção do próprio autor.

O percentual máximo de metano no biogás foi maior na fase 1 e decaindo na fase 2 e fase 3. Na fase 1 o percentual foi de 65% de metano, na fase 2 o percentual variou entre 45 a 55% e na fase 3 a variação foi de 20 a 45%. Tabela 9.

4 CONCLUSÃO

Com a caracterização dos substratos e o inoculo fica evidenciado que os três elementos presentes na montagem do reator possuem um potencial de degradação, em especial o estrume bovino que oferece mais matéria orgânica ao sistema de digestão anaeróbia, consequentemente favorecendo o consorcio microbiano presente na biomassa inoculada.

Em relação a produção de biogás, a fase I conseguiu manter um nível de produção em mais tempo, entretanto, não ficou evidenciado uma diferença notória entre as mono- digestões com as co-digestões, porém vale ressaltar que nessa primeira fase os reatores que operaram com fração maiores de estrume na co-digestão conseguiram ter um desempenho equiparável os monos digestões de vinhaça e estrume bovino. Com a realização da centrifugação para montagem da fase II, a adaptação e enriquecimento da biomassa foi bem positiva, visto que todos reatores operaram com menos tempo e foram capazes de produzir praticamente o dobro de volume do biogás, com exceção a mistura 98:2%, que desde a primeira fase obteve dificuldades para a produção de biogás. Mas ao realizar o mesmo procedimento para fase III, observou um grande distúrbio no processo metabólico do sistema, visto que todas misturas demoraram muito mais para começar a produzir biogás, e na grande maioria apontou um esgotamento das atividades das arqueias metanogênicas, exceto a mistura 80:20%, que ainda conseguiu manter um padrão de produção próximo a fase I.

Pensando em relação a produção de metano, a fase I já demonstrou diferenças em relação a produção de biogás, visto que a co-digestão 90:10% conseguiu produzir mais metanos que todas as outras co-digestões e mono-digestões. A fase II e a fase III já seguiram os padrões de produção de biogás, entretanto, houve uma diminuição no percentual de metano produzido em relação a fase I, II e a III, saindo da faixa dos 65% na fase I para 20% a 45% na fase III. Por fim, ao analisarmos as vantagens e desvantagens da co-digestões em relação as mono-digestões, apesar da fase I e fase III não demonstrar grandes diferenças, pode concluir que ao longo do experimentos as co-digestões com maior volume de estrume bovino conseguiram ter bons desempenhos, podendo contribuir em muito nos problemas enfrentados nesses setores para produção de biogás e metano de forma constante ao longo do ano, principalmente ao avaliar a questões de entressafrá existente no setor sucroalcooleira. E a utilização de biomassa proveniente de lodo resultante no tratamento de efluentes na indústria aviária, demonstrou boa resposta ao utilizar a mono- e co-digestões.

REFERÊNCIAS

CalegariI, R. P. Produção de biogás a partir de vinhaça concentrada. p. 81, 2017.

DMS, 2022. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/boi/335455-censo-de-confinamento-dsm-registra-6-95-milhoes-de-bois-confinados-em-2022.html>. Acesso em 20 de janeiro de 2023.

Fuess, L. T. et al. Biochemical butyrate production via dark fermentation as an energetically efficient alternative management approach for vinasse in sugarcane biorefineries. *Renewable Energy*, v. 158, p. 3–12, 2020.

Gonçalves, C. S. Avaliação do Potencial de Geração de Biogás a partir de Resíduos de Boviniculturas na Área Metropolitana do Porto. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, p. 135, 2010.

R de Souza Pompermayer, DR de Paula Júnior. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: Encontro De Energia No Meio Rural, 3., 2000, Campinas

Santos, I. A.; Nogueira L.A.H. Estudo energético do esterco bovino: Seu valor de substituição e impacto da digestão anaeróbia. Revista Agroambiental-Abril/2012. Disponível em: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v4n12012373>. Acesso em 5 de maio de 2023.