

PRODUÇÃO DE METANO EM ANSBBR MESOFÍLICO NO TRATAMENTO DE GLICERINA: LIMITE OPERACIONAL

Karina Herreira Deffert ¹; Lia Paula Poloni Batista³; Suzana Maria Ratusznei²; Giovanna Lovato²; Roberta Albanez²

¹ Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

³ Aluna de Doutorado do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *A produção de metano a partir de resíduos agroindustriais representa uma alternativa sustentável para geração de bioenergia e tratamento de efluentes. Esse processo converte resíduos orgânicos em biogás, que pode ser usado para gerar energia. Além de poder causar redução nas emissões de gases de efeito estufa, o processo ajuda a mitigar o impacto ambiental dos resíduos e contribui para a reciclagem de nutrientes, pois o subproduto, o efluente digerido, pode ser usado para irrigação agrícola. Assim, este projeto avalia o uso de um reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais com biomassa imobilizada (AnSBBR), sob condições mesofílicas, para o tratamento de glicerina, um subproduto da indústria de biodiesel. O objetivo foi determinar o limite operacional do reator frente ao aumento da carga orgânica volumétrica, analisando a eficiência e a estabilidade do sistema. A produtividade de biogás e o rendimento de metano foram correlacionados com as condições operacionais. Os resultados podem fornecer subsídios para a ampliação de escala e avaliação econômica, contribuindo para a implementação de biorrefinarias que integrem a produção de energia e a mitigação de impactos ambientais.*

Introdução

A produção anaeróbia de metano a partir de uma grande variedade de resíduos biológicos tem crescido mundialmente devido aos seus benefícios ambientais e econômicos. A ascensão dessa técnica ocorreu, inicialmente, com o tratamento de esgotos, principalmente em países tropicais, isso graças ao clima quente, que favorece a biodegradação. Então, após os anos 80, esse método começou a ser mais aceito e utilizado, virando alvo de diversos trabalhos acadêmicos e pesquisas científicas. Por ser uma tecnologia relativamente nova, existem diversas áreas que devem ser aprofundadas e estudadas para a descoberta de novas teorias que poderão agregar no futuro da engenharia microbiana (De Lemos Chernicharo, 2007).

O biogás pode ser produzido localmente a partir de fontes renováveis, não dependendo de estoques importados de petróleo ou gás natural. Substâncias orgânicas podem ser degradadas por processos anaeróbios, produzindo, por consequência, o biogás, uma mistura composta principalmente por metano e dióxido de carbono (De Lemos Chernicharo, 2007). Além disso, a sua utilização contribui para a redução da poluição por resíduos orgânicos, que são responsáveis pela maior parte da contaminação de corpos hídricos naturais. O metano gerado tem um poder calorífico de 55,6 kJ.g⁻¹, que é 17 % superior à energia contida na gasolina (47,5 kJ.g⁻¹) (Lovato et al., 2016).

A digestão anaeróbia é um tratamento biológico realizado na ausência de oxigênio para estabilizar a matéria orgânica, gerando biogás. Entre as principais vantagens desse processo, destacam-se: o baixo consumo de energia, uma vez que não é necessário introduzir oxigênio no meio, ao contrário dos processos aeróbios; a menor produção de lodo, estimada em menos de 20 % da produção de lodo dos processos aeróbios; e a possibilidade de recuperar e utilizar o metano gerado como combustível (Foresti, 1994).

Com a popularização desse método de tratamento, muitas empresas de pequeno e médio porte estão adquirindo digestores anaeróbios para auxiliar no descarte de seus substratos. Grande parte dessas indústrias mencionadas estão no ramo da agricultura e da pecuária, onde muitos resíduos agrícolas e excrementos de animais são gerados diariamente (De Lemos Chernicharo, 2007).

A glicerina é o principal subproduto da indústria de biodiesel. Para cada 100 kg de biodiesel produzido, aproximadamente 10 kg de glicerina crua são geradas. A glicerina crua originada pela transesterificação catalisada por base homogênea contém cerca de 50-60 % de glicerol, 12-16 % de álcalis (principalmente na forma de sabões e hidróxidos), 15-18 % de ésteres metílicos, 8-12 % de metanol e 2-3 % de água. Além de metanol e sabões, a glicerina crua contém elementos como Ca, Mg, P e S, além de outros componentes (Rivero; Solera; Perez, 2014).

Nos últimos anos, o preço da glicerina tem diminuído significativamente devido ao aumento do consumo de biodiesel e, conseqüentemente, ao incremento da produção de resíduos. A União Europeia estabeleceu que, até 2020, o uso de biodiesel deve atingir 20 % dos combustíveis utilizados. Segundo alguns dados do Energy Institute (2023), os países europeus vêm aumentando a produção de biocombustíveis ao longo dos anos. Em 2021, foram produzidos 302 mil barris de óleo por dia, valor que corresponde a 40 milhões a mais do que se for comparado com os dados de 2015 (Statistical Review of World Energy, 2023). No Brasil, em outubro de 2024, foi sancionada a Lei 14.993 que determina o aumento da porcentagem de biodiesel que deve ser adicionado ao etanol. Até março deste mesmo ano esse índice era de 14 %, porém, com esse novo decreto, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) deve decidir o novo valor, que está previsto para ser de 13 a 25 % (Agência Senado, 2024). Além disso existem planos futuros do governo federal de elevar essa mistura para 27,5 %.

Embora a glicerina pura tenha diversas aplicações nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética, o processo de refino da glicerina crua para atingir alta pureza é dispendioso, principalmente para pequenos e médios produtores de biodiesel. Dentre as alternativas para o aproveitamento da fase de glicerina crua, destaca-se a conversão biológica por digestão anaeróbia para produção de metano. Além de metano, esse processo apresenta vantagens como menores exigências nutricionais, economia de energia e geração de efluente digerido estabilizado, que pode ser utilizado para melhorar a qualidade do solo (Rivero; Solera; Perez, 2014).

Uma alternativa para o tratamento desses resíduos é o reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais com biomassa imobilizada (AnSBBR), que representa uma opção tecnológica para operação descontínua, em contraposição ao modelo contínuo comumente utilizado. Um ciclo típico de operação desse reator em modo batelada e batelada alimentada consiste em quatro etapas: (i) alimentação, que pode ter tempo de enchimento variável, definindo a estratégia de alimentação como batelada e/ou batelada alimentada; (ii) tratamento propriamente dito, no qual os constituintes do efluente são biotransformados pelos microrganismos; (iii) sedimentação, que ocorre quando a biomassa está em forma granular (ASBR); e (iv) descarte, com a remoção do líquido tratado e clarificado. Quando a biomassa está imobilizada em um suporte inerte (AnSBBR), a etapa de sedimentação não é necessária (Albanez et al., 2016). Esse tipo de reator oferece uma estrutura mais flexível em relação à estratégia de alimentação e concentração do afluente, sendo uma opção viável para produtores de resíduos agroindustriais de pequeno e médio porte. Ademais, o processo de produção de biodiesel é realizado em bateladas, o que torna desejável o tratamento de seu resíduo pelo mesmo modo operacional.

O grupo de pesquisa em tratamento biológico de águas residuárias do Instituto Mauá de Tecnologia (EEM/IMT) investiga reatores anaeróbios operados em bateladas sequenciais (AnSBBR) desde 1998. Seus projetos têm foco na otimização do biorreator convencional e no desenvolvimento de novas configurações, visando viabilizar a aplicação do sistema em escala plena. Entre os aspectos estudados, destacam-se: tipo de mistura, que pode ser por agitação mecânica (De Novaes et al., 2010; Lullio et al., 2014; Silva et al., 2013) ou por recirculação da fase líquida (Lovato et al., 2015; Sousa et al., 2019); estratégia de alimentação (De Novaes et al., 2010; Lovato et al., 2019; Rodrigues et al., 2011); relação entre concentração afluente e tempo de ciclo (Lovato et al., 2019; Lullio et al., 2014; Sousa et al., 2019); carga orgânica (Albanez et al., 2016; Almeida et al., 2017; Lullio et al., 2014; Sousa et al., 2019; Volpini et al., 2018); e temperatura (Albuquerque; Ratusznei; Rodrigues, 2019; Almeida et al., 2017; Sousa et al., 2019).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a aplicação de um reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais com biomassa imobilizada e agitação mecânica (AnSBBR), em

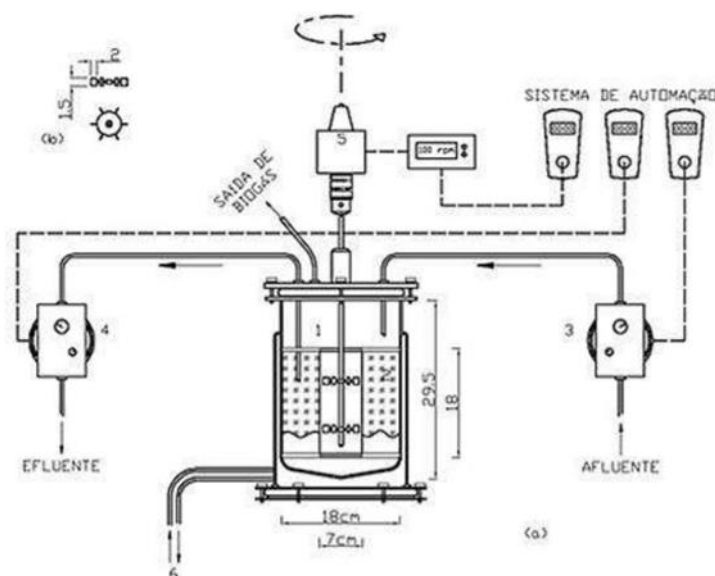
condições mesofílicas, para o tratamento de glicerina com foco na produção de metano. A pesquisa buscou analisar o limite operacional do reator em relação ao aumento da carga orgânica volumétrica aplicada.

Material e Métodos

Biorreator *AnSBBR*

A Figura 1 apresenta o esquema do sistema utilizado para a produção mesofílica de metano a partir do tratamento de glicerina. O biorreator com agitação mecânica (modelo Bioflo III[®], fabricado pela New Brunswick Scientific Co.) é formado por um frasco de vidro de 20 cm de diâmetro e altura, com capacidade total de 6,0 L e útil de 5,6 L. O material suporte para imobilização da biomassa foi confinado em cesto de aço Inox-316 perfurado de 18,0 cm de altura, 7,0 cm de diâmetro interno e 17,5 cm de diâmetro externo. A parte inferior do cilindro interno foi coberta por uma tela de aço Inox de malha fina (1 mm) de modo a reter o meio de suporte imobilizado. A agitação foi fixada em 100 rpm e implementada por motor acoplado aos 2 impelidores tipo turbina de 6,0 cm de diâmetro constituído por seis lâminas planas (padrão Rushton) e instalados a 8,0 e 16,0 cm do fundo do tanque (Michelan et al., 2009).

Figura 1 – Esquema do AnSBBR



[Notação: 1 – Reator modelo com volume total de 6 L; 2 – Cesto inox de retenção e material suporte da biomassa; 3 – Bomba de alimentação; 4 – Bomba de descarga; 5 – Sistema de agitação; 6 – Sistema de controle de temperatura (banho termostático)].

Uma unidade de controle foi utilizada para automatizar as operações de carga, descarga e agitação. A alimentação e descarga foram realizadas por bombas tipo diafragma marca Prominent[®], modelos Beta/4 (para batelada alimentada com capacidade máxima de 2,1 L.h⁻¹), Beta/5 (para batelada com capacidade máxima de 32 L.h⁻¹) e Concept (para descarga com capacidade de até 23 L.h⁻¹). Um sistema de automação composto por temporizadores da marca Logica[®] e modelo Grasslin foi o responsável pelo acionamento e desligamento das bombas e do agitador, com objetivo de programar as etapas da operação em batelada sequencial: alimentação, reação e descarga. A temperatura de 30 °C foi controlada pela circulação de água na dupla parede externa do reator e regulada por um banho ultratermostatizado.

A água residuária a ser alimentada ao AnSBBR para produção de metano foi formulada a base de glicerina PA, nas quais aproximadamente 1000 mg.L⁻¹ de glicerina correspondem a 1100 mg DQO.L⁻¹. A suplementação de alcalinidade pela adição de bicarbonato de sódio (NaHCO₃) foi necessária em função das características da água residuária (Lovato et al., 2016). O valor inicial foi de uma razão 0,7:1 (NaHCO₃.DQO⁻¹) com posterior modificação para uma razão de 1:1

($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{DQO}^{-1}$), de acordo com a faixa ideal de operação (pH 7,0 – 7,5) para reatores metanogênicos (Van Haandel; Lettinga, 1994).

Análises Físico-Químicas

O monitoramento do reator foi efetuado medindo-se, em amostras do afluente e do efluente, a matéria orgânica nas formas não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}) como demanda química de oxigênio (DQO) e de glicerina totais (Bondioli; Della Bella, 2005), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), alcalinidade à bicarbonato (AB) (Ripley; Boyle; Converse, 1986), ácidos voláteis totais (AVT), sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV), além da medida do pH e do volume de meio alimentado/d Descarregado. Tais análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AWWA, 2017). Esses parâmetros foram monitorados com uma frequência de duas a cinco vezes por semana.

Os compostos intermediários do metabolismo anaeróbico (etanol, ácidos acético, propiônico, butírico e valérico) foram analisados por cromatografia em fase gasosa, pelo método “*head-space*”, utilizando um cromatógrafo Agilent Technologies® modelo 7890 GC System, equipado com detector de ionização de chama. A composição do biogás formado pelo metabolismo anaeróbico foi analisada por cromatografia em fase gasosa utilizando-se um cromatógrafo Agilent Technologies® modelo 7890 GC System equipado com detector de condutividade térmica. O volume produzido foi aferido por meio de medidor de gás Ritter modelo MilligasCounter. Ao final de cada condição operacional foram retiradas do reator amostras de biomassa para caracterização microbiológica.

Procedimento Experimental

O reator foi preparado colocando-se em seu interior a biomassa imobilizada em suporte inerte. No ciclo de partida foi alimentado 3,0 L de meio e a agitação em 100 rpm foi iniciada. Esse processo se repetiu em todos os inícios de condição, sendo em todos os ciclos o volume de 1,0 L descarregado em 10 minutos e o volume de 1,0 L alimentado no tempo que correspondia à metade do ciclo completo, que foi variando dependendo da condição. Com isso o volume residual se manteve sempre próximo de 2,0 L.

Uma vez atingida a estabilidade nas condições experimentais, ou seja, as variáveis monitoradas apresentarem valores aproximadamente constantes, foram obtidos os perfis ao longo do ciclo de operação de algumas das variáveis monitoradas. As amostras retiradas para obtenção dos perfis foram colhidas em intervalos de tempo, ao longo do ciclo, de 30 a 60 min. Essas variáveis de interesse foram: concentrações de matéria orgânica na forma filtrada, de ácidos voláteis totais e alcalinidade à bicarbonato, de metabólitos intermediários (etanol e ácidos voláteis), de biogás (composição e produção), além do pH.

Os resultados experimentais obtidos no monitoramento do sistema e nos perfis ao longo de um ciclo, em cada condição operacional, foram analisados considerando-se a influência das variáveis estudadas sobre a estabilidade e o desempenho do processo.

O AnSBBR foi operado conforme as condições apresentadas na Tabela 1, sendo a água residuária formulada a base de glicerina. Nas Etapas de Adaptação (Condições A₁ e A₂) foram realizados os aumentos graduais da concentração de afluente (1, 2, 3, 4 e 5 gDQO.L⁻¹), sendo esta responsável pela variação da carga orgânica volumétrica aplicada (COVA). O tempo de ciclo foi sendo alterado ao longo das condições, sendo especificado na coluna dessa mesma tabela. A temperatura em todas as condições foi mantida em 30°C.

Tabela 1 – Condições experimentais que foram impostas ao AnSBBR

| Etapa | Condições | C_{SAFL} (gDQO.L ⁻¹) | Tempo de Ciclo (h) | COVA (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹) |
|----------------|----------------|------------------------------------|--------------------|---|
| Adaptação | A ₁ | 1,00 – 4,00 | 6,0 | 5,39 |
| Carga Orgânica | 1 | 5,00 | 6,0 | 8,93 |
| | 2 | 6,00 | 8,0 | 8,47 |
| Adaptação | A ₂ | 1,50 – 4,50 | 6,0 | 5,45 |
| Carga Orgânica | 3 | 6,00 | 6,0 | 10,44 |
| | 4 | 5,00 | 8,0 | 6,40 |

Legenda: C_{SAFL} = Concentração afluente; COVA = Carga orgânica volumétrica aplicada

Resultados e Discussão

Os principais resultados dos ensaios são apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 e na Tabela 2, em que C_{SA} é a concentração de matéria orgânica no afluente em termos de DQO, C_{SF} é a concentração de matéria orgânica no efluente filtrado em termos de DQO, C_{SNF} é a concentração de matéria orgânica no efluente não filtrado em termos de DQO, COVA é a carga orgânica volumétrica aplicada em termos de DQO, COVR é a carga orgânica volumétrica removida em termos de DQO, V_a é o volume alimentado/descarregado por ciclo, AVT é a concentração de ácidos voláteis totais, ε_{SF} é a eficiência de remoção de matéria orgânica em termos de DQO para amostras filtradas, ε_{ST} é a eficiência de remoção de matéria orgânica em termos de DQO para amostras não-filtradas, ε_{GF} é a eficiência de remoção de glicerina para amostras filtradas, PrM é a produtividade molar, V_G é o volume de biogás produzido por ciclo e V_{CH_4} é o volume de hidrogênio produzido por ciclo.

Analisando as Figuras 2 e 3 é possível notar que a remoção de matéria orgânica no reator, com glicerina como único substrato, não ultrapassou 60% (57 – 27%). Essa remoção é muito mais baixa que a obtida por Viana et al., 2012, cujo a remoção foi de 90%. No presente trabalho, os valores de remoção tiveram uma queda contínua a cada condição iniciada, mesmo com a diminuição da carga orgânica presente no afluente. Como é possível notar pelas Figuras 4 e 5 muitos ácidos foram produzidos pelo reator e a alcalinidade não foi gerada. Isso pode ser explicado pelo glicerol ser uma molécula de álcool muito simples, não podendo fornecer cadeias orgânicas suficientes para sustentar a atividade microbiana (Quispe et al., 2013; Yang et al., 2015). Com isso, esses ácidos produzidos pelas bactérias acidogênicas são consumidos pelas bactérias metanogênicas em uma taxa muito menor, fazendo com que ocorra esse acúmulo (Viana et al., 2012).

Diante desse comportamento observado nas etapas iniciais do projeto, optou-se por aumentar o tempo de ciclo, com o objetivo de permitir que os microrganismos tivessem tempo suficiente para consumir os ácidos acumulados, promovendo maior produtividade e incremento na alcalinidade (Viana et al., 2012). Assim, como visto na Tabela 1, a segunda condição foi realizada com oito horas de tempo de ciclo, duas horas a mais comparado a condição anterior, e concentração afluente de 6000 mgDQO.L⁻¹. No entanto, o consumo da carga orgânica reduziu-se ainda mais, os valores de ácidos voláteis totais (AVT) no efluente aumentaram, e não houve geração de alcalinidade (Figuras 4 e 5). Esses resultados indicam que o aumento do tempo de ciclo não contribuiu para melhorar a remoção de matéria orgânica nem o consumo dos ácidos voláteis totais.

Alguns prováveis motivos para esse comportamento observado são o desequilíbrio metabólico e escassez de nutrientes promovidos pelo uso da glicerina como substrato. O glicerol tende a estimular a acidogênese e diminuir a metanogênese, pois é uma molécula altamente redutora (Quispe et al., 2013; Yang et al., 2015). O aumento no tempo de ciclo pode também ter agravado ainda mais o decaimento da conversão e do rendimento, isso porque pode ter ocorrido um crescimento na concentração de metabólitos intermediários, como ácidos graxos voláteis e álcoois, que prejudica o processo da digestão anaeróbica. Esse acúmulo, porém, não foi identificado pelas análises de pH no efluente, que se mantiveram praticamente constante durante todo projeto, como pode ser visto na Tabela 2. O sistema entrou em um processo de acidificação crescente, motivo pelo qual o prolongamento ciclo apenas contribuiu para o acúmulo deles no biorreator. Esse ambiente criado desfavoreceu a conversão metanogênica e prejudicou a comunidade microbiana.

Para confirmar se esse comportamento foi causado pelo aumento da concentração de DQO ou pela influência do tempo de ciclo foi realizada uma terceira condição mantendo a concentração e voltando para seis horas de tempo de ciclo. Na condição 3 a remoção da matéria orgânica diminuiu ainda mais, o que mostra que, provavelmente, o tempo de ciclo não está influenciando nas operações e o reator esteja perto do seu limite operacional. Com isso para Condição 4 foi feita uma diminuição da concentração de DQO para a mesma da primeira condição, 5000 mgDQO.L⁻¹, e um aumento no tempo de ciclo para oito horas. O objetivo dessa operação foi analisar como a melhor condição até o momento (Condição 1) se adequaria para um tempo de ciclo maior.

Observa-se que a remoção na condição 4 continuou baixa (27 ± 7) como na condição 3, como visto na Figura 3, mas sendo menor do que a encontrada na primeira condição. Foi observado uma diminuição da concentração dos ácidos no efluente (Figura 4), porém essa melhora não foi impactou positivamente a remoção de matéria orgânica ou a produção de biogás.

A produtividade molar de metano obtida na condição 1 foi a maior dentre as condições estudadas. Os microrganismos selecionados na etapa de adaptação mostraram que foi possível remover a glicerina, mas não foram eficazes no consumo dos metabólitos intermediários, pois a maior remoção de matéria orgânica na forma de DQO obtida foi de 57% na primeira condição. Nota-se que os microrganismos, com o tempo de operação, foram ficando cada vez com mais dificuldades de consumir esses metabólitos e com isso eles foram se acumulando e dificultando cada vez mais a produção de metano, objetivo do estudo.

No estudo de Lovato et al. (2016), foi avaliada a produção de metano a partir da digestão anaeróbia de glicerina pura e da sua codigestão com soro. Na condição V, em que o reator operou exclusivamente com glicerina, os autores obtiveram uma produtividade molar de metano de 78,7 molCH₄·m⁻³·d⁻¹, rendimento de 10,0 molCH₄·kgDQO⁻¹, eficiência de remoção de matéria orgânica próxima de 87% e concentração de ácidos voláteis totais de apenas 142 mgHAc·L⁻¹. No presente trabalho, na condição 1 (melhor condição estudada), observou-se produtividade molar semelhante (88,7 molCH₄·m⁻³·d⁻¹), porém associada a uma remoção de DQO significativamente menor (57%) e a uma acentuada tendência à acidificação, com 2212 mgHAc·L⁻¹ no efluente. Essa discrepância pode ser atribuída ao histórico operacional distinto entre os dois sistemas. No estudo de Lovato et al. (2016), o reator permaneceu aproximadamente 80 dias em codigestão com soro antes de operar apenas com glicerina, o que pode ter favorecido o estabelecimento de um consórcio microbiano mais diversificado e adaptado. No entanto, neste trabalho, o sistema foi iniciado e mantido exclusivamente com glicerina como substrato, condição que restringe a diversidade microbiana, limita o fornecimento de nutrientes essenciais e compromete a estabilidade metanogênica.

Cabe ainda questionar se a condição V de Lovato et al. (2016) manteria os mesmos resultados caso o reator tivesse sido operado por um período mais longo do que os 20 dias relatados. Essa reflexão reforça a hipótese de que a etapa prévia de codigestão com soro pode ser uma estratégia promissora para adaptação microbiana e mitigação dos problemas observados neste estudo. No entanto, essa hipótese requer validação por meio de investigações adicionais em trabalhos futuros.

Analisando as condições estudadas é possível observar a baixa remoção de matéria orgânica na forma de DQO (máximo 57%) e, com exceção da Condição 1, a produtividade molar teve valor menor que o esperado (máxima produtividade obtida entre as condições 2 e 4 foi de 29,2 molCH₄·m⁻³·dia⁻¹, 37% da produtividade molar obtida por Lovato et al. 2016). Para explicar esse comportamento pode-se dizer que o reator deve estar perto do seu limite operacional, ou seja, a sua carga orgânica volumétrica aplicada (COVA) está no limite de operação, sendo ela provavelmente próxima de 10,53 gDQO.L⁻¹·d⁻¹. Outra hipótese relevante é a perda gradual da atividade da biomassa ao longo do processo, sem capacidade de recuperação. Tal fato pode estar associado às características da glicerina, substrato principal do estudo, que consiste em uma molécula simples e altamente redutora, com poucas cadeias orgânicas, dificultando a completa biodegradação pelos microrganismos (Ikram et al., 2025). Essa característica do glicerol também limita a diversidade que os microrganismos podem realizar essa fermentação, diminuindo muito mais a reatividade (Quispe et al., 2013; Yang et al., 2015).

Com a escassez de carboidratos disponíveis como fonte de carbono, pode ser que tenha ocorrido autólise celular, levando à redução da biomassa ativa e à predominância de microrganismos mais resistentes. Essa hipótese é corroborada pelo aumento progressivo dos sólidos totais (ST) no efluente, conforme apresentado na Tabela 2, sugerindo a liberação de células mortas no meio. Outro indício visual foi o branqueamento dos suportes da biomassa, sinal típico da ausência de microrganismos, que normalmente conferem coloração escura ao material.

A fim de comparar os resultados obtidos no projeto com a literatura é possível notar que pesquisadores que realizaram trabalhos com a digestão anaeróbica do glicerol em sua maioria relatam resultados similares. O estudo realizado por Ikram et al., (2025) verificou diferentes concentrações de glicerol, variando de 0,2 a 15% v/v. Nele foi possível notar que com o aumento da concentração da glicerina mais instável o reator ficava e o rendimento cai consideravelmente. Com isso o autor conseguiu concluir que a alta concentração de glicerol prejudica as comunidades microbianas pois ocasionam em um acúmulo de ácidos graxos voláteis e álcoois que inibem essa metanogênese.

Resultados similares ocorreram no trabalho realizado por Vikromvarasiri et al., 2023, quando ele testou duplicar a carga de glicerina de 2,5 para 5,0 gCOD.L⁻¹.d⁻¹. Com esse aumento ocorreu novamente uma diminuição do pH, ou seja, o acúmulo desses ácidos no birreator, sendo os mais notórios nessa pesquisa os ácidos propiônico e acético, chegando a valores de, respectivamente, 1614 e 1027 mg.L⁻¹.

Figura 2 – Eficiência de remoção de matéria orgânica (DQO) no efluente filtrado e não-filtrado e de glicerina do efluente filtrado

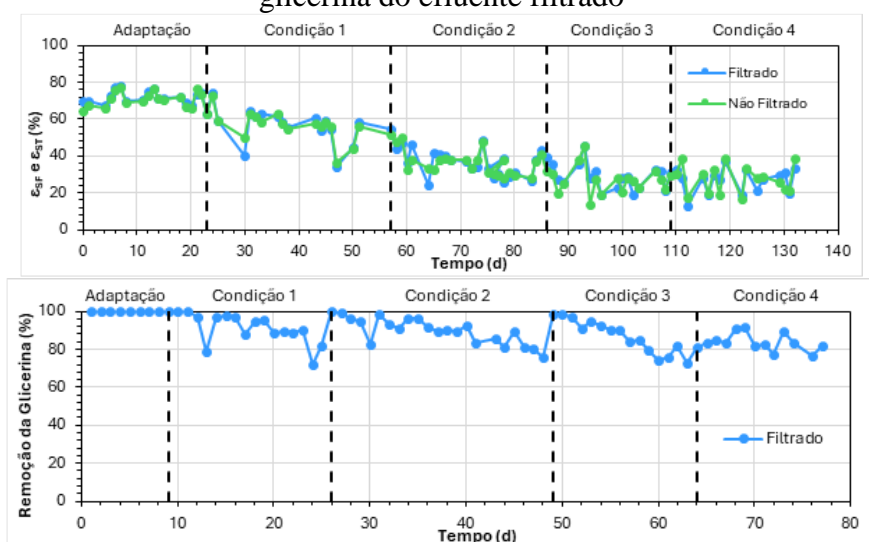


Figura 3 – Concentração de ácidos voláteis totais no afluente e efluente

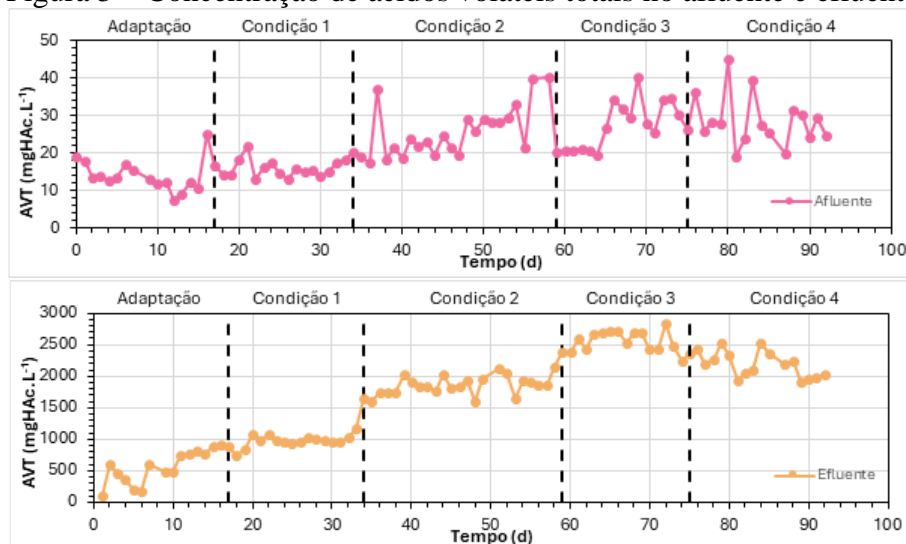


Figura 4 – Concentração de alcalinidade à bicarbonato no afluente e efluente

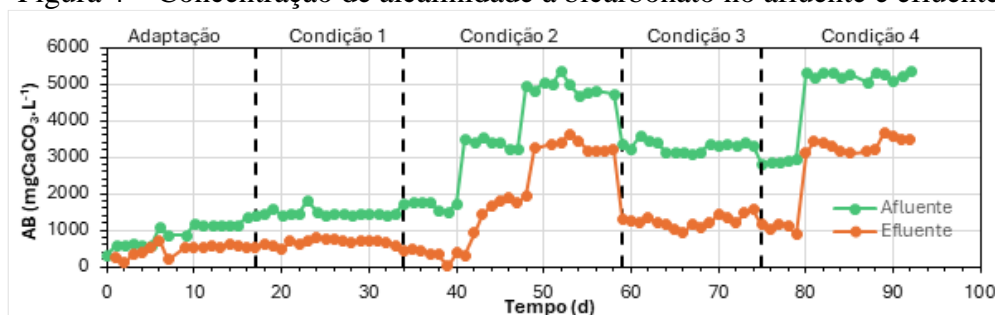


Tabela 2 – Parâmetros monitorados e indicadores de desempenho das condições operacionais realizadas até o momento

| Parâmetros | | Adaptação | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| COVA | gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹ | 5,39 | 8,93 | 8,47 | 10,53 | 6,40 |
| COVR | gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹ | 3,90 | 5,20 | 3,18 | 3,19 | 1,73 |
| C _{SAFL} | mg.L ⁻¹ | 3101 ± 1031 ⁽¹⁸⁾ | 5102 ± 547 ⁽¹⁷⁾ | 6250 ± 294 ⁽¹⁸⁾ | 5989 ± 408 ⁽¹⁸⁾ | 5239 ± 309 ⁽¹⁸⁾ |
| ε _{SF} | % | 71 ± 4 ⁽¹⁴⁾ | 57 ± 11 ⁽¹⁵⁾ | 39 ± 8 ⁽¹³⁾ | 30 ± 8 ⁽¹⁷⁾ | 27 ± 7 ⁽¹⁷⁾ |
| C _{GAFL} | mg.L ⁻¹ | 2295 ± 642 ⁽¹⁸⁾ | 3967 ± 428 ⁽¹⁷⁾ | 5078 ± 553 ⁽¹⁸⁾ | 5237 ± 551 ⁽¹⁸⁾ | 4558 ± 585 ⁽¹⁸⁾ |
| ε _{GF} | % | 100 ± 0 ⁽¹⁴⁾ | 92 ± 8 ⁽¹⁵⁾ | 89 ± 7 ⁽¹³⁾ | 87 ± 9 ⁽¹⁷⁾ | 84 ± 5 ⁽¹⁷⁾ |
| pH _{AFL} | - | 8,49 ± 0,14 ⁽¹⁸⁾ | 8,53 ± 0,08 ⁽¹⁷⁾ | 8,66 ± 0,14 ⁽¹⁸⁾ | 8,66 ± 0,14 ⁽¹⁸⁾ | 8,71 ± 0,11 ⁽¹⁸⁾ |
| pH _{EFL} | - | 7,41 ± 0,23 ⁽¹⁴⁾ | 7,45 ± 0,28 ⁽¹⁵⁾ | 7,55 ± 0,47 ⁽¹²⁾ | 7,51 ± 1,16 ⁽¹⁵⁾ | 7,95 ± 0,33 ⁽¹⁵⁾ |
| AVT _{AFL} | mgHAc.L ⁻¹ | 14 ± 4 ⁽¹⁸⁾ | 16 ± 2 ⁽¹⁷⁾ | 25 ± 7 ⁽¹⁸⁾ | 27 ± 6 ⁽¹⁸⁾ | 28 ± 7 ⁽¹⁸⁾ |
| AVT _{EFL} | mgHAc.L ⁻¹ | 562 ± 263 ⁽¹⁴⁾ | 977 ± 93 ⁽¹⁵⁾ | 1781 ± 426 ⁽¹²⁾ | 2538 ± 182 ⁽¹⁵⁾ | 2212 ± 193 ⁽¹⁵⁾ |
| AB _{AFL} | mgCaCO ₃ .L ⁻¹ | 907 ± 308 ⁽¹⁸⁾ | 1475 ± 96 ⁽¹⁷⁾ | 3130 ± 1398 ⁽¹⁸⁾ | 3295 ± 200 ⁽¹⁸⁾ | 3938 ± 1214 ⁽¹⁸⁾ |
| AB _{EFL} | mgCaCO ₃ .L ⁻¹ | 457 ± 178 ⁽¹⁴⁾ | 659 ± 87 ⁽¹⁵⁾ | 1758 ± 1391 ⁽¹²⁾ | 1260 ± 168 ⁽¹⁵⁾ | 2138 ± 1069 ⁽¹⁵⁾ |
| ST _{AFL} | mg.L ⁻¹ | - | 2944 ± 684 ⁽⁴⁾ | 4905 ± 1634 ⁽⁵⁾ | 5385 ± 978 ⁽⁶⁾ | 3844 ± 522 ⁽⁶⁾ |
| ST _{EFL} | mg.L ⁻¹ | - | 2853 ± 553 ⁽⁴⁾ | 5614 ± 1842 ⁽⁵⁾ | 6529 ± 341 ⁽⁶⁾ | 5426 ± 94 ⁽⁶⁾ |
| SVT _{AFL} | mg.L ⁻¹ | - | 1408 ± 703 ⁽⁴⁾ | 1199 ± 840 ⁽⁵⁾ | 1427 ± 965 ⁽⁶⁾ | 668 ± 548 ⁽⁶⁾ |
| SVT _{EFL} | mg.L ⁻¹ | - | 1434 ± 429 ⁽⁴⁾ | 2122 ± 297 ⁽⁵⁾ | 2629 ± 342 ⁽⁶⁾ | 2294 ± 149 ⁽⁶⁾ |
| SST _{AFL} | mg.L ⁻¹ | - | 39 ± 16 ⁽⁴⁾ | 87 ± 36 ⁽⁵⁾ | 110 ± 49 ⁽⁶⁾ | 33 ± 27 ⁽⁶⁾ |
| SST _{EFL} | mg.L ⁻¹ | - | 64 ± 33 ⁽⁴⁾ | 113 ± 43 ⁽⁵⁾ | 148 ± 54 ⁽⁶⁾ | 75 ± 47 ⁽⁶⁾ |
| SSV _{AFL} | mg.L ⁻¹ | - | 25 ± 18 ⁽⁴⁾ | 20 ± 19 ⁽⁵⁾ | 12 ± 7 ⁽³⁾ | 12 ± 25 ⁽³⁾ |
| SSV _{EFL} | mg.L ⁻¹ | - | 52 ± 35 ⁽⁴⁾ | 56 ± 34 ⁽⁵⁾ | 51 ± 18 ⁽⁶⁾ | 45 ± 32 ⁽⁶⁾ |
| MSVT | g | - | 36,8 | 42,2 | 57,8 | 55,8 |
| V _A | L | 1,08 | 1,09 | 1,04 | 1,05 | 1,10 |
| V _G | mL.ciclo ⁻¹ | 1399 ± 505 ⁽¹⁵⁾ | 2184 ± 500 ⁽⁸⁾ | 1147 ± 220 ⁽¹³⁾ | 1053 ± 172 ⁽⁶⁾ | 813 ± 218 ⁽⁶⁾ |
| V _{CH4} | mL.ciclo ⁻¹ | 7,61 ± 2,77 ⁽¹⁵⁾ | 1238 ± 138 ⁽⁸⁾ | 473 ± 113 ⁽¹³⁾ | 391 ± 67 ⁽⁶⁾ | 296 ± 123 ⁽⁶⁾ |
| PrM | molCH ₄ .m ⁻³ .d ⁻¹ | 0,55 | 88,7 | 27,6 | 29,2 | 14,7 |
| RMCR _{S,M} | molCH ₄ .kgDQO ⁻¹ | - | 17,0 | 8,7 | 9,2 | 8,5 |

Notação: COVA = Carga orgânica volumétrica aplicada; COVR = Carga orgânica volumétrica removida; C_{SAFL} = Concentração de substrato no afluente; ε_{SF} = Eficiência de remoção de substrato para amostras filtradas; C_{GAFL} = Concentração de glicerina no afluente; ε_{GF} = Eficiência de remoção de glicerina para amostras filtradas; pH = Potencial hidrogeniônico; AVT = Ácidos voláteis totais; AB = Alcalinidade à bicarbonato; ST = Sólidos totais; SVT = Sólidos voláteis totais; SST = Sólidos suspensos totais; SSV = Sólidos suspensos voláteis; MSVT = Massa de sólidos voláteis totais no interior do reator; V_A = Volume alimentados; V_G = Volume de biogás produzido; V_{CH4} = Volume de metano produzido; PrM = Produtividade molar de metano; RMCR_{S,M} = Rendimento carga orgânica em relação à produção de metano.

Conclusões

O estudo demonstrou que a digestão anaeróbia utilizando glicerina como único substrato em reator AnSBBR apresenta baixa eficiência na remoção de matéria orgânica e tendência à acidificação, mesmo com ajustes operacionais. Esses resultados indicam limitações importantes para a estabilidade do processo e para a produção de metano, reforçando que a glicerina pura pode não ser adequada como substrato único. Estratégias como a codigestão com resíduos ricos em nutrientes ou suplementação alcalina devem ser consideradas em pesquisas futuras para melhorar a adaptação microbiana e a viabilidade do sistema.

Referências Bibliográficas

- Agência Senado. (n.d.). Lei que incentiva “combustíveis do futuro” é sancionada com vetos.
- Albanez, R., et al. (2016). Anaerobic biological treatment of vinasse for environmental compliance and methane production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(1), 21–43.
- Albuquerque, J. N., Ratusznei, S. M., & Rodrigues, J. A. D. (2019). Biomethane production by thermophilic co-digestion of sugarcane vinasse and whey in an AnSBBR: Effects of composition, organic load, feed strategy and temperature. *Journal of Environmental Management*, 251, 109606.
- Almeida, P. de S., et al. (2023). Integrated production of hydrogen and methane in a dairy biorefinery using anaerobic digestion: Scale-up, economic and risk analyses. *Journal of Environmental Management*, 348, 119215.
- Almeida, W. A., et al. (2017). AnSBBR applied to biomethane production for vinasse treatment: Effects of organic loading, feed strategy and temperature. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(3), 759–773.
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.).
- Baba, Y., et al. (2013). Anaerobic digestion of crude glycerol from biodiesel manufacturing using a large-scale pilot plant: Methane production and application of digested sludge as fertilizer. *Bioresource Technology*, 140, 342–348.
- Bondoli, P., & Della Bella, L. (2005). An alternative spectrophotometric method for the determination of free glycerol in biodiesel. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 107(3), 153–157.
- de Lemos Chernicharo, C. A. (2007). *Anaerobic reactors* (Vol. 4). IWA Publishing.
- de Novaes, L. F., et al. (2010). Effect of fill time on the performance of pilot-scale ASBR and AnSBBR applied to sanitary wastewater treatment. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162(3), 885–899.
- Energy Institute. (2023). *Statistical review of world energy* (72nd ed.).
- Foresti, E. (1994). Fundamentos do processo de digestão anaeróbia. In *Seminário Latino Americano* [Conference paper].
- Ikram, M. M., Carpenter, J., & Saharan, V. K. (2025). Process intensification of anaerobic digestion for biohydrogen and methane production from crude glycerol and dairy wastewater using cavitation techniques. *RSC Advances*, 15(35), 28464–28480. <https://doi.org/10.1039/D5RA04093K>
- Lovato, G., et al. (2015). The effect of organic load and feed strategy on biohydrogen production in an AnSBBR treating glycerin-based wastewater. *Journal of Environmental Management*, 154, 128–137.
- Lovato, G., et al. (2016). Co-digestion of whey with glycerin in an AnSBBR for biomethane production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(1), 126–143.
- Lovato, G., et al. (2017). Biohydrogen production by co-digesting whey and glycerin in an AnSBBR: Performance optimization, metabolic pathway kinetic modeling and phylogenetic characterization. *Biochemical Engineering Journal*, 128, 93–105.
- Lovato, G., et al. (2019). Viability of using glycerin as a co-substrate in anaerobic digestion of sugarcane stillage (vinasse): Effect of diversified operational strategies. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 188(3), 720–740.
- Lullio, T. G., et al. (2014). Biomethane production in an AnSBBR treating wastewater from biohydrogen process. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174(5), 1873–1896.
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Michelan, R., et al. (2009). Effect of impeller type and mechanical agitation on the mass transfer and power consumption aspects of ASBR operation treating synthetic wastewater. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1357–1364.
- Quispe, C. A. G., Coronado, C. J. R., & Carvalho Jr., J. A. (2013). Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.017>
- Ripley, L. E., Boyle, W. C., & Converse, J. C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 58(5), 406–411.
- Rivero, M., Solera, R., & Perez, M. (2014). Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge with glycerol: Enhanced biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(6), 2481–2488.

- Rodrigues, J. A. D., et al. (2011). AnSBBR applied to a personal care industry wastewater treatment: Effects of fill time, volume treated per cycle, and organic load. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 163(1), 127–142.
- Sampaio de Mello, B., et al. (2024). Anaerobic digestion of crude glycerol from biodiesel production for biogas generation: Process optimization and pilot scale operation. *Environmental Research*, 244, 117938.
- Silva, R. C., et al. (2013). Anaerobic treatment of industrial biodiesel wastewater by an ASBR for methane production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 170(1), 105–118.
- Sousa, S. P., et al. (2019). Improvement of sugarcane stillage (vinasse) anaerobic digestion with cheese whey as its co-substrate: Achieving high methane productivity and yield. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 189(3), 987–1006.
- Van Haande, A. C., & Lettinga, G. (1994). *Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regiões de clima quente* (Vol. 240). Epgraf.
- Viana, M. B., Freitas, A. V., Leitão, R. C., Pinto, G. A. S., & Santaella, S. T. (2012). Anaerobic digestion of crude glycerol: a review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 81–92.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2012.692723>
- Vikromvarasiri, N., Koyama, M., Kurniawan, W., Pisutpaisal, N., & Nakasaki, K. (2023). Enhancing methane recovery by intermittent substrate feeding and microbial community response in anaerobic digestion of glycerol. *Renewable Energy*, 204, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.002>
- Volpini, V., et al. (2018). Biomethane generation in an AnSBBR treating effluent from the biohydrogen production from vinasse: Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimation. *Renewable Energy*, 116, 288–298.
- Yang, G., Zhang, P., Zhang, G., Wang, Y., & Yang, A. (2015). Degradation properties of protein and carbohydrate during sludge anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 192, 126–130.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.076>
- Zaiat, M., Cabral, A. K. A., & Foresti, E. (1994). Horizontal-flow anaerobic immobilized sludge reactor for wastewater treatment: Conception and performance evaluation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 11, 33–42.