



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 1, pp. 99–113
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p99-113>

Aproveitamento de dejetos bovinos para a produção de biogás *Use of bovine waste for the production of biogas*

Francisco João Salvador Belchior Dinis Martins¹, Gabriela Mesquita Bruel², Taís Rosângela Correia Souza³, Marcelo Esposito^{4,*}

¹ Mestrando em Engenharia da Energia Solar, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Portugal

² Engenheira Química, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, RS, Brasil

³ Graduate Student | Civil, Environmental, and Geo-Engineering, University of Minnesota, Twin Cities

⁴ Professor do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Erechim, RS, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: marcelo.esposito@uffs.edu.br

Received: 15 May 2024 | Accepted: 27 May 2024 | Published online: 5 June 2024

Resumo: No presente trabalho, como atividade experimental foi desenvolvido um protótipo de biodigestor do tipo batelada, usando um barril de cerveja descartável, de plástico PET (Polietileno tereftalato). Os dejetos foram coletados na exploração leiteira da Universidade de Évora (UE - Polo da Mitra/Portugal). Como parte da análise foram empregadas duas metodologias para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis bovinos no Brasil. Pela divergência de valores na produção diária percebeu-se uma lacuna científica que poderia ser investigada em termos globais. O título de um novo trabalho poderia ser: modelo para a produção de biogás a partir de dejetos de bovinos leiteiros. A composição do biogás foi analisada por GC (cromatografia gasosa). A desvantagem é que por GC não foram analisadas as quantidades de amônia e gás sulfídrico. Detectou-se uma quantidade de 46%mol de N₂ o que é extremamente alta. O nitrogênio faz parte da estrutura molecular das proteínas e pode variar de acordo com o tipo de ração, pastagem ou silagem adicionada à alimentação do animal. Contudo o aproveitamento dos dejetos animais para a produção de biogás na UE não é suficiente para manter a exploração autossustentável (energia elétrica, aquecimento de água e do ambiente).

Palavras-chave: biogás, biodigestor, dejetos, metano, autossustentável.

Abstract: In the present work, as an experimental activity, a batch-type biodigester prototype was developed, using a disposable beer barrel, made of PET plastic (Polyethylene terephthalate). The waste was collected on the dairy farm at the University of Évora (UE - Polo da Mitra / Portugal). As part of the analysis, two methodologies were used to estimate the potential for biogas and biomethane from cattle herds in Brazil. Due to the divergence of values in daily production, a scientific gap was perceived that could be investigated in global terms. The title of a new work could be: model for the production of biogas from dairy cattle waste. The composition of the biogas was analyzed by GC (gas chromatography). The disadvantage is that the amounts of ammonia and hydrogen sulfide gas were not analyzed using GC. An amount of 46% mol of N₂ was detected, which is extremely high. Nitrogen is part of the molecular structure of proteins and can vary according to the type of feed, pasture or silage added to the animal's diet. However, the use of animal waste to produce biogas at UE is not sufficient to maintain self-sustainable exploration (electricity, water and environmental heating).

Keywords: biogas, biodigester, waste, methane, self-sufficient.

1 Introdução

Com o aumento da demanda energética se faz necessária a produção demais e mais energia para suprir as necessidades humanas. Isso acarreta problemas muito graves para o planeta, visto que para satisfazer esta carência são emitidas para a atmosfera quantidades excessivas de gases de efeito estufa e de dióxido de carbono. Posto isto, é preciso apostar cada vez mais em energias alternativas e mais amigáveis ao meio ambiente (Canal Solar, 2023).

Um exemplo de produção de energia de forma mais ecológica é o biogás que resulta da biodigestão de resíduos orgânicos que inicialmente contaminariam o ambiente e causariam doenças. O biogás pode ter um papel importante na descarbonização, devido à fácil obtenção de produtos para a produção do mesmo, visto que as principais fontes são aterros sanitários, resíduos da agropecuária e do saneamento básico (Folha de São Paulo, 2024).

Diversos países possuem políticas públicas focadas em melhorar e aumentar a produção de energia através do biogás, tendo se verificado entre os anos 2000 e 2020 um aumento de cerca de 18.000 MW na capacidade de geração de energia a nível mundial (Energia e Biogás, n.d.).

O presente trabalho tem como objetivo a produção de biogás a partir de resíduos da agropecuária, mais especificamente dos dejetos de bovinos leiteiros.

Produtores de leite têm procurado desenvolver sistemas para gerar energia limpa e usá-la nas atividades produtivas do campo, diminuindo assim os custos com energia elétrica e a emissão dos gases de efeito estufa. É possível gerar energia e dar um destino mais sustentável aos dejetos ao transformá-los em biogás e em biofertilizante que também pode ser aproveitado em substituição aos adubos, evitando assim a contaminação do solo e da água (EPAGRI, 2021).

1.1 Produção de biogás

Entende-se por biogás uma mistura de gases composta principalmente por metano e dióxido de carbono. Encontram-se ainda em menores proporções, gás sulfídrico e nitrogênio. Esta mistura é obtida através da digestão anaeróbica de compostos orgânicos (Deganutti et al., 2002; EPAGRI, 2021).

Estes compostos orgânicos passam por quatro fases até originar o biogás: processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kunz, Steinmetz e Amaral, 2022).

Inicialmente, na hidrólise, os compostos como lipídios, polissacarídeos e proteínas são degradados através da ação de enzimas extracelulares excretadas por bactérias hidrolíticas, dando origem a substâncias orgânicas mais simples, os monômeros. Esta etapa ganha importância quando a matéria orgânica presente é complexa e de difícil degradação, podendo até mesmo ser considerada como uma etapa limitante da velocidade da digestão anaeróbia (Kunz, Steinmetz e Amaral, 2022).

Na etapa seguinte, os monômeros presentes passam pela acidogênese, estágio onde serão usados como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e facultativas, sendo convertidos em ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono. Também na acidogênese, os carboidratos são degradados em piruvato, sendo em seguida, através da ação da *Lactobacillales*, convertidos em ácido lático e por meio das leveduras em etanol. Os aminoácidos presentes são degradados através do *Clostridium Botulinum*, tendo como produtos: acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (Kunz, Steinmetz e Amaral, 2022).

A terceira etapa da digestão anaeróbia é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. As bactérias acetogênicas estabelecem relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), com a concomitante produção de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias homoacetogênicas regem o equilíbrio da direção da reação de consumo de hidrogênio e dióxido de carbono para a produção de acetato.

Em condições estritamente anaeróbias, acontece a metanogênese. Nesta etapa, o carbono contido na biomassa é convertido em dióxido de carbono e metano através da ação das arqueas metanogênicas, ressaltando que todas as reações que ocorrem na metanogênese são exotérmicas.

Por fim, graças à ação das arqueas metanogênicas acetoclásticas, o acetato é convertido em metano e por meio das arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em metano (Kunz, Steinmetz e Amaral, 2022).

1.2 Parâmetros da fermentação

O metabolismo dos microrganismos anaeróbios mesofílicos são dependentes de diversos fatores, com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados (Kunz, Steinmetz e Amaral, 2022).

1.2.1 Pressão parcial do hidrogênio

A pressão parcial do hidrogênio tem um papel fulcral na metanogênese, visto que é necessário atingir o equilíbrio entre a produção e o consumo de hidrogênio, garantindo sempre o desenvolvimento correto dos microrganismos produtores de hidrogênio, bactérias acetogênicas, e das bactérias consumidoras, arqueas metanogênicas hidrogenotróficas. Deste modo, é bastante importante garantir pressões parciais de hidrogênio baixas, de modo que a energia de Gibbs seja negativa e assim ter uma reação espontânea. A pressão parcial de hidrogênio pode sofrer alterações devido às características do substrato (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

1.2.2 Temperatura

A temperatura tem influência na velocidade de crescimento dos microrganismos presentes no reator. Os microrganismos podem ser classificados de acordo com a classificação mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos microrganismos de acordo com a temperatura. Fonte: Kunz, Steinmetz and Amaral (2022).

Tipo	Temperatura ótima (°C)
Termofílicos	60
Mesofílicos	37
Psicofílicos	15

O aumento da temperatura pode ser benéfico para a fermentação, dado que aumenta a solubilidade dos compostos orgânicos. Contudo, este aumento se for excessivo pode comprometer a produção de biogás, uma vez que a temperatura influencia na dissociação da amônia. A amônia livre é tóxica às arqueas metanogênicas, pois se difunde facilmente através da membrana celular dos microrganismos, causando um desequilíbrio iônico e/ou deficiência de potássio (K^+).

Em regiões com grandes amplitudes térmicas, o processo de produção de biogás pode ficar comprometido, uma vez que a temperatura do reator não deve variar bruscamente, mais do que 2° C (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

1.2.3 pH

O pH deve ser devidamente controlado quando possível devido à sensibilidade dos microrganismos presentes na biodigestão. Um dos principais motivos para a alteração do pH no reator é o acúmulo de ácidos voláteis, que conduz a uma diminuição do pH. A diminuição do pH abaixo de 6,6 implica na inibição do crescimento das arqueas metanogênicas, enquanto as bactérias acidogênicas suportam valores de pH até 4,5 (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

Um método para verificar se o reator está dentro da faixa ótima de pH pode ser a utilização da relação alcalinidade intermediária/alcalinidade parcial (AI/AP). A alcalinidade intermediária fornece valores equivalentes a alcalinidade por bicarbonato e a alcalinidade parcial a basicidade vinda dos ácidos voláteis. Na Tabela 2, é possível perceber a relação entre o valor do AI/AP e a característica do reator (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

Tabela 2. Classificação dos microrganismos de acordo com a temperatura. Fonte: Kunz, Steinmetz and Amaral (2022).

Relação AI/AP	Característica do reator	Temperatura ótima (°C)
> 0,4	Reator em sobrecarga	60
0,3 – 0,4	Faixa ótima	37
< 0,3	Reator em subcarga	15

Variações bruscas na relação AI/AP exigem medidas corretivas.

1.2.4 Nutrientes

Para o processo anaeróbio são necessárias relações de 700:5:1 de demanda biológica de oxigênio, N e P. Íons enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato são necessários para o bom funcionamento da digestão anaeróbia. Elementos (traços) como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio são importantes para o crescimento celular.

Em contraste, compostos de enxofre podem apresentar desafios para o processo anaeróbico, uma vez que provocam a precipitação de nutrientes essenciais em quantidades mínimas, tais como ferro, níquel e cobre, os quais se tornam insolúveis em baixos potenciais redox (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

1.2.5 Tempo de retenção hidráulica (TRH)

O tempo de retenção hidráulica é o tempo a matéria orgânica deve permanecer dentro do biodigestor para que o processo de degradação da matéria ocorra e a produção de biogás atinja seu ápice (Ferreira, 2020).

1.3 Biodigestores

Os biodigestores são caracterizados pelo regime de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou laminar), concentração de sólidos no reator (digestão sólida >20%, semissólida 10 a 15% e úmida <10%) e sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura).

O foco do presente trabalho são os tipos batelada e lagoa coberta.

1.3.1 Biodigestor em batelada

Este tipo de biodigestor apresenta uma pequena exigência operacional, visto que opera em sistema descontínuo. Isto é, quando carregado, mantém-se a fermentação por um período conveniente, sendo descarregado após a produção de biogás, limpo e carregado para um novo ciclo (EMBRAPA, 2023). É possível deixar pequenas quantidades de matéria no reator, de modo que o novo substrato seja misturado com o substrato já fermentado fortalecendo os microrganismos (Eckert et al., 2015).

1.3.2 Biodigestor de lagoa coberta (BLC)

O modelo de BLC é caracterizado por ser um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com um material de baixa permeabilidade a fluidos e gases e suficientemente flexível para acumular gás. A sua geometria é de base retangular de seção trapezoidal com inclinação de talude variável de acordo com as características do solo. Devido as suas particularidades, é considerado de baixo nível tecnológico, apresentado fácil construção e operação (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

2 Metodologia

2.1 Dimensionamento de BLC

Dado que a quantidade de resíduos produzidos difere dependendo da exploração, é necessário dimensionar de forma correta do biodigestor, de modo que seja possível otimizar a produção de biogás. A quantidade de resíduos produzidos diariamente, Q , rege-se pela Eq. (1).

$$Q = PDM * NM * F_a \quad (1)$$

sendo Q os dejetos produzidos diariamente ($m^3.dia^{-1}$), PDM a produção de dejetos por ($m^3.matriz^{-1}.dia^{-1}$) matriz, NM o número de matrizes (matrizes) e F_a a fração de confinamento diária (entre 0 e 1) (adimensional)

O volume do biodigestor, V , é calculado através da Eq. (2).

$$V = \frac{Q * S_o}{COV} \quad (2)$$

sendo V o volume do biodigestor (m^3), Q a vazão de substrato ($m^3.dia^{-1}$), S_o a concentração de sólidos voláteis no substrato ($kg_{sv}.m^{-3}$) e COV a carga orgânica volumétrica ($kg_{sv}.m^{-3}.dia^{-1}$).

O tempo de retenção hidráulica, TRH , é obtido através da Eq (3).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

sendo o TRH o tempo de retenção hidráulico (dia), V o volume do biodigestor (m^3) e Q a vazão de substrato ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

2.2 Sistemas de aquecimento e agitação

Com o objetivo de aumentar a produção de biogás, é possível acoplar sistemas que potencializam a fermentação.

2.2.1 Sistemas de agitação

A importância da agitação na produção de biogás deve-se ao aumento da distribuição de substratos, nutrientes, enzimas e microrganismos no biodigestor. A agitação também colabora para a diminuição de crostas e otimiza a liberação do biogás presente no lodo. A utilização de sistema de agitação implica em um ganho de 15 a 30% na produtividade de biogás. A tecnologia de agitação pode ser dividida em mecânica, hidráulica ou pneumática (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

2.2.2 Sistemas de aquecimento

Nem todos os tipos de biodigestores e cenários de produção de biogás, exigem um sistema de aquecimento. A necessidade de calor está diretamente relacionada à vazão de substrato, à capacidade calorífica específica dos materiais envolvidos, à diferença de temperatura entre o substrato e a temperatura de operação do biodigestor, bem como às perdas de calor do sistema (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

No caso específico de biodigestores tipo BLC, a falta de um sistema de aquecimento conduz a variações de temperatura da biomassa em função da temperatura ambiente, ou seja, tem implicações diretas na capacidade de geração de biogás, que será bastante afetada em regiões com inverno rigoroso (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

2.3 Aplicação experimental

2.3.1 Materiais

No projeto e construção do biodigestor foram utilizados os seguintes materiais:

- Barril de cerveja de 20L (estrutura do biodigestor - barril descartável de plástico PET);
- Saco de plástico 50L (para a construção da proteção térmica com esferovite);
- Caixa de esferovite/isopor (proteção térmica);
- Saco Tedlar (análise cromatográfica);
- Abraçadeira de plástico 2,5x100 mm (coleta de amostra para a análise cromatográfica);
- Saco de plástico (coleta de amostra para a análise cromatográfica);
- Palhinha/canudinho (coleta de amostra para a análise cromatográfica).

2.3.2 Métodos

A atividade experimental durou 2 meses e 11 dias, iniciando em 27 de outubro de 2023, quando o dejetos foi coletado.

Com a colaboração do Professor Dr. Augusto António Vieira Peixe se teve acesso a leiteria localizada no Polo da Mitra da Universidade de Évora que fica situado em Valverde, na freguesia de Nossa Senhora da Tourega, a cerca de 12 km da cidade de Évora.

A exploração leiteira do Polo da Mitra ocorre com a realização de 2 ordenhas ao dia de 22 bovinos da raça holandesa, pesando em média 700 kg cada um.

Estes animais estão em regime de semiconfinamento. Ficam cerca de 6 horas por dia confinados, alimentando-se de silagem de milho, palha e ração. É neste intervalo de tempo que ocorrem as ordenhas. A sala de ordenha tem 4 postos, onde cada animal permanece por aproximadamente 5 minutos por ordenha.

Terminada a ordenha, com o auxílio de um sistema de água aquecida é efetuada a limpeza da sala por um período de aproximadamente 15 minutos.

Depois de cada período de confinamento, é realizada a limpeza dos estábulos com um jato de água. Deste modo os dejetos são encaminhados para uma lagoa. Obedecidos aos critérios de cura da biomassa, ela é aplicada nos campos para servir de biofertilizante.

A Figura 1 mostra o local onde o esterco foi recolhido após a ordenha realizada na manhã do dia 27/10/2023. O barril foi previamente lavado, somente com água pura, sem a válvula de controle que originalmente era utilizada para a dosagem de saída da cerveja. Como a válvula foi reutilizada, foi necessário tomar cuidado especial para não danificar o sistema de fixação da mesma ao barril.

No momento da coleta, foi observada a existência de palhas no esterco e se o mesmo estava fresco, recém expelido pelos animais. O barril teve 40% do seu volume interno carregado com desejo e em seguida foi esmagado para a retirada de oxigênio deixando assim espaço para a expansão causada pela biodigestão.

A Figura 1 mostra o barril usado como biodigestor neste experimento.



Figura 1. Barril usado como biodigestor em 27/10/2023.

Com o barril espalmado, para retirar ao máximo o ar do seu interior, foi possível verificar que o mesmo inflou durante a fermentação da biomassa. A parede de cor âmbar do barril permitiu visualizar a superfície identificando-se a formação de bolhas de gás durante a reação bioquímica.

Visto que a amplitude térmica em Évora oscila bastante entre a noite e o dia o biodigestor foi colocado dentro de uma caixa de esferovite reaproveitada, de modo que fosse possível proteger o mesmo de variações térmicas (Universidade de Évora, n.d.). A caixa de esferovite foi uma tentativa de tornar o reator do tipo batelada adiabático, sem trocas de calor com o meio ao seu redor. Para a proteção mecânica contra a chuva foram utilizados sacos plásticos.

Com certa periodicidade, a integridade do barril foi verificada e o registro fotográfico foi realizado. Existe uma grande diversidade de perigos relacionados a digestor anaeróbio ou planta de biogás e/ou biometano. Estes perigos estão relacionados tanto aos riscos ocupacionais, ambientais e quanto à efetividade do processo de produção de biogás. A mistura gasosa que compõe o biogás apresenta propriedades asfixiantes (sufocamento). Outros aspectos como corrosividade e toxicidade do sulfeto de hidrogênio (H_2S), toxicidade da amônia (NH_3), além da inflamabilidade do metano (CH_4) e hidrogênio (H_2) também devem ser considerados (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

No dia 10 de janeiro de 2024, identificaram-se evidências de que a produção de biogás tinha cessado, como por exemplo, a decantação que deixou o dejetos praticamente sólido no fundo do biodigestor. Não foi realizado um planejamento experimental baseado na cinética da reação, somente a visualização das mudanças no estado físico do material no interior do biodigestor.

Para a análise do gás após a digestão foram pesquisadas diversas técnicas como o uso de um kit para análise de biogás (marca ALFAKIT), um analisador portátil de gases (CLEAN ENVIRONMENT BRASIL - BIOGAS 5000) e a contratação de uma empresa especializada na análise de gases (AWITE).

O objetivo era analisar de forma simples e rápida a composição dos gases do biogás. Análise de amônia, gás sulfídrico, metano e dióxido de carbono, determinando, assim, a eficiência do biodigestor quanto à produção de gás metano (calor, energia e créditos de carbono), de gás sulfídrico (responsável pela corrosão dos equipamentos) e de amônia (poluição do ar).

A composição do biogás foi analisada por GC (Cromatografia gasosa) porque esta foi a maneira mais confiável e barata encontrada para a análise na região de Évora. A desvantagem é que por GC não foram analisadas as quantidades de amônia e gás sulfídrico. A amostra foi levada para a Universidade Nova de

Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Química, Laboratório Associado para a Química Verde (LAQV REQUIMTE, *Network of Chemistry and Technology*).

Para a coleta da amostra foram utilizados:

- Um saco de plástico recortado (ao pressionar o dispositivo vermelho da válvula do barril onde ocorre a liberação do biogás e com o saco plástico o gás é direcionado para a palhinha);
- Abraçadeiras;
- Uma palhinha, para canalizar a saída do gás para o saco de Tedlar;
- Saco Tedlar para a amostragem de gás;

A Figura 2 mostra detalhes do procedimento realizado durante a transferência do biogás para o coletor de amostra fornecido pelo laboratório (saco de Tedlar).



Figura 2. Recolha do biogás para um saco de Tedlar em 10/01/2024.

2.4 Potencial de produção de biogás

A Rede BiogásFert, com o objetivo de mitigar os efeitos ambientais das produções de suínos e bovinos, definiu e apresentou uma série de métodos para estimar o potencial de produção de biogás a partir do aproveitamento de dejetos (Mito et al., 2018).

No presente trabalho serão apresentadas as “metodologias de cálculo para a estimativa do potencial de biogás” propostas pelo Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás-ER (2009) e por Kunz (2006).

A Eq. (4) e a Eq. (5) apresentam o cálculo da estimativa da produção diária de metano conforme Kunz:

$$PrM = B_0 * SV * Q \quad (4)$$

$$Q = N^o * PD \quad (5)$$

sendo, PrM a produção diária de metano ($m^3_{CH_4} \text{ dia}^{-1}$), B_0 a capacidade máxima teórica de produção de metano pelo dejetos ($m^3_{CH_4} \text{ kg}_{SV}^{-1}$), SV a concentração de sólidos voláteis ($g_{SV} \text{ L}^{-1}$), Q o volume total de dejetos produzidos ao dia ($m^3 \text{ dia}^{-1}$), N^o o número de animais e PD o volume de dejetos produzidos por animal e categoria ao dia ($m^3 \text{ dia}^{-1}$).

Infelizmente, essa metodologia apresenta valores tabelados apenas para os parâmetros qualitativos para uma granja de terminação de suínos.

A Eq. (6) apresenta o cálculo da produção diária de biogás utilizando a metodologia do Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás-ER:

$$PDB = N^o \frac{\left(\frac{PM}{PP}\right) * FDC * SV * FCM * B_0 * f_b}{CH_4} \quad (6)$$

sendo, PDB a produção diária de biogás ($m^3 \text{ dia}^{-1}$), N^o o número absoluto / número de animais (matrizes), PM o peso médio (kg), PP o peso padrão (kg), FDC a fração diária de confinamento (entre 0 e 1) (adimensional), SV a concentração de sólidos voláteis ($kg_{SV} \text{ cab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), FCM o fator de conversão de metano para a linha de base do sistema (lagoa aberta) (%), B_0 a capacidade máxima teórica de produção de

metano pelo dejetos ($m^3CH_4 \text{ kgSV}^{-1}$), f_b o fator de correção de incertezas (adimensional) e CH_4 a porcentagem de metano no biogás (%).

2.5 Cálculo de produção de biogás

Para o uso da metodologia de Kunz, no presente trabalho, foram utilizados os valores médios disponibilizados por Mito et al. (2018), resultantes de uma extensa pesquisa bibliográfica. Parâmetros qualitativos, concentração de sólidos voláteis, intervalo de valores delimitados pela análise para sólidos voláteis para bovino de leite. Capacidade de produção de metano pelo dejetos, intervalo de valores delimitados pela análise para capacidade de produção de metano máxima para bovino de leite. Produção de efluentes, intervalo de valores delimitados pela análise para produção de efluentes por bovinos de leite em sistemas de produção confinados.

Na Tabela 3 estão os parâmetros médios para bovino de leite utilizados nos cálculos da Eq. (1) e Eq. (4).

Tabela 3. Tabela de parâmetros médios para o método de Kunz. Fonte: Mito et al. (2018).

	B_0 ($m^3_{CH_4} \text{ kgSV}^{-1}$)	SV ($gSVL^{-1}$)	PDM ($Ldia^{-1}animal^{-1}$)
Bovino de leite	0,15	50,54	57,68

De acordo com a Eq. (1) e com a Eq. (4), respectivamente, tem-se:

$$Q = \frac{57,68}{1000} * 22 * 0,25 = 0,31724 m^3 animal^{-1} dia^{-1} \quad (Q = \text{dejetos produzidos diariamente Eq (1)})$$

$$PrM = 0,15 * 50,54 * 0,31724 = 2,40 m^3_{CH_4} * dia^{-1} \quad (PrM = \text{produção diária de metano Eq (4)})$$

Na Tabela 4 estão os valores da metodologia do CIBiogás-ER utilizados no cálculo da Eq. (6).

Tabela 4. Valores tabelados da metodologia do CIBiogás-ER para os parâmetros qualitativos. Fonte: Mito et al. (2018).

	B_0 ($m^3_{CH_4} \text{ kgSV}^{-1}$)	SV ($kgSV \text{ cab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	FCM (%)	Peso Padrão (Kg)	f_b (%)	% CH_4
Bovino de leite	0,18	4,00	0,78	640	0,94	60

Segundo a Eq. (6):

$$PDB = \frac{22 * (\frac{700}{640}) * 6}{24} * \frac{4,00 * 0,78 * 0,18 * 0,94}{60} = 0,052 m^3 ano^{-1} \quad (\text{Produção diária de biogás})$$

Do primeiro modelo (Kunz) adaptado para bovino leiteiro, a produção diária de **METANO** foi de $2,4 m^3_{CH_4} dia^{-1}$. Do segundo modelo (CIBiogás-ER) a produção diária de **BIOGÁS** foi de $0,052 m^3 ano^{-1}$.

Trata-se de uma referência atual (2018) e muito bem contextualizada, dada a grande quantidade de referências bibliográficas citadas.

Ao entrar em contato com um dos autores foi recebida a informação de que a metodologia da CIBiogás-ER necessita de validação experimental ampla e abrangente. A metodologia de Kunz foi validada, porém para exploração de terminação de suínos. Percebeu-se um vazio a ser investigado em termos globais. O título do trabalho poderia ser: "modelo para a produção de biogás a partir de dejetos de bovinos leiteiros". Em contato com a EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), que tem experiência prática sobre o assunto, se obteve a seguinte resposta: "*estamos elaborando um boletim técnico que é pra sair esse ano (2024). Temos apenas dados das unidades e estamos aguardando o capítulo da Embrapa que é parceira no projeto*".

3 Resultados e discussões

Para proporcionar uma visão mais detalhada do desenvolvimento da produção de biogás, foi efetuado um registro fotográfico ao longo dos 2 meses e 11 dias de atividade experimental.

As Figuras 3 a 6 ilustram as alterações visíveis no biodigestor, desde a recolha inicial da biomassa (27/10/2023) até a recolha do biogás, a 10 de janeiro de 2024.



Figura 3. Imagem do biodigestor relativa ao dia 27/10/2023



Figura 4. Imagem do biodigestor aproximadamente 30 dias após o início do experimento.



Figura 5. Imagem do biodigestor relativo ao dia 10/01/2024



Figura 6. Imagem do dejetos/biodigestor após a coleta no dia 10/01/2024

Resultado qualitativo da composição da amostra (27/01/2024) entregue por comparação com uma mistura padrão: CO_2 , H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 (Figuras 07 a 09). Antes da injeção dos padrões atuais para confirmação dos respectivos tempos de retenção.

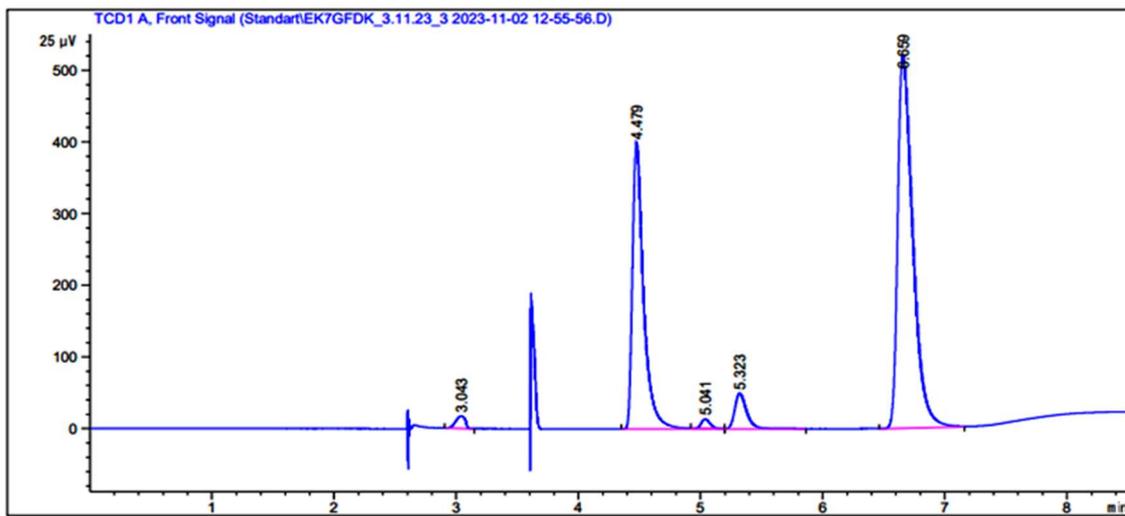


Figura 7. Padrão - mistura CO_2 , H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 . Análise qualitativa.

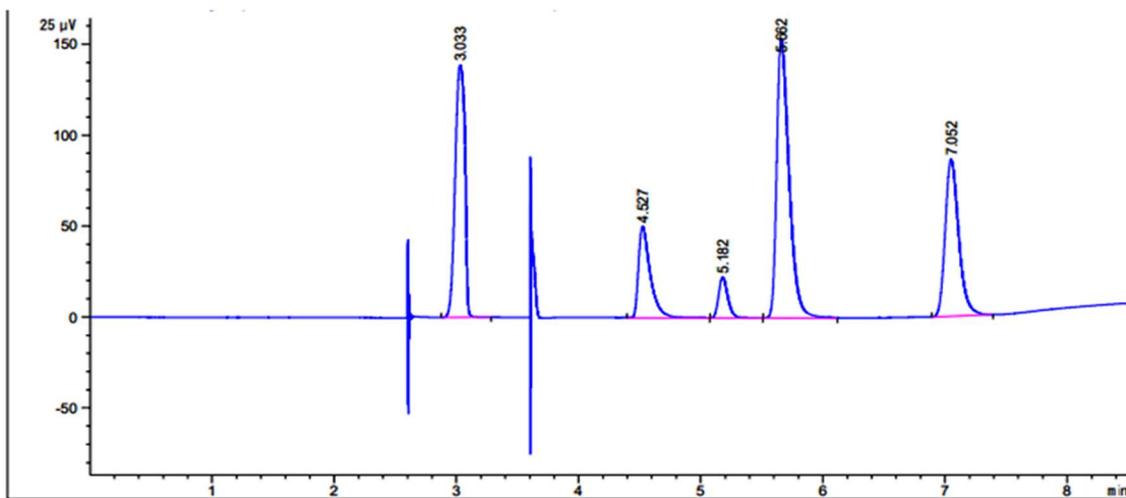


Figura 8. Amostra – injeção 1 em duplicado. Análise qualitativa.

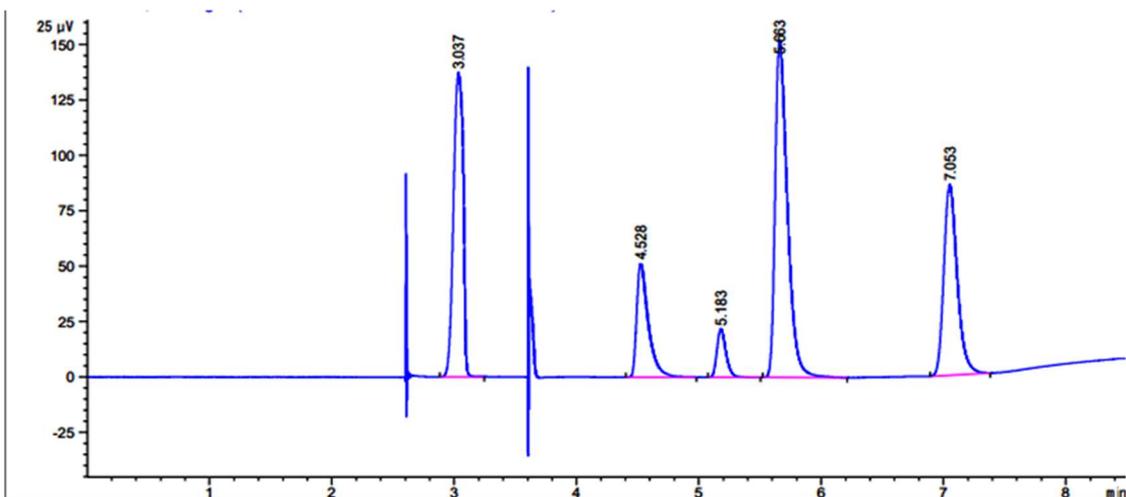


Figura 9. Amostra – injeção 2 em duplicata. Análise qualitativa

A análise qualitativa é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Análise qualitativa do biogás utilizando cromatografia gasosa.

Ordem de eluição dos componentes da mistura padrão de gases:	
Tempo de retenção (minutos)	Analito
3,06	CO ₂
4,53	H ₂
5,18	O ₂
5,67	N ₂
7,01	CH ₄

- CO₂ em 3,03 e 3,04 - Neste caso parece que a amostra realmente contém CO₂, já que os valores estão próximos ao padrão de 3,06 e pela área abaixo da curva, a quantidade é considerável.

- H₂ em 4,53 e 4,53 – A quantidade de H₂ é pequena, pela área abaixo da curva. Os tempos de retenção idênticos confirmam a existência de H₂.

- O₂ em 5,18 e 5,18 – Dado a proximidade dos tempos de retenção, é possível verificar a presença de uma pequena quantidade de O₂.

- N₂ em 5,66 e 5,66 – Pelos tempos de retenção, é possível averiguar uma quantidade bastante elevada de N₂.

- CH₄ em 7,05 e 7,05 – É possível conferir uma pequena diferença entre os tempos de retenção da amostra padrão e do biogás. Contudo, sendo uma diferença bastante pequena, é possível afirmar a existência de algum CH₄ no biogás.

A partir desses resultados preliminares foi solicitado ao laboratório o envio de um relatório completo explicando a metodologia, equipamentos, padrões, tipo de coluna, software utilizado, deslocamentos que foram necessários, etc.

De imediato o corpo técnico do laboratório respondeu solicitando que se aguardasse pela nova calibração para a confirmação dos tempos de retenção. Quanto às áreas/intensidade, estas dependem da resposta do detetor em função do analito, pelo que há analitos com melhor resposta que podem não estar em maior quantidade. Em função dos padrões de calibração, se poderá ter uma estimativa quantitativa.

Em um segundo momento foi recebido do laboratório o resultado da injeção das amostras entregue em saco (15/02/2024), juntamente com as condições de análise e estimativa. A amostra foi reinjetada sequencialmente com os padrões. Não foram observadas perdas significativas de volume do saco de amostra durante o tempo de espera para análise.

Da análise quantitativa mostrada nas Figuras 10 a 14 pode-se concluir que apenas 10%mol do biogás produzido é metano. A presença de oxigênio ainda que em pequena quantidade (4%mol) pode ter interferido no processo de biodigestão anaeróbia.

A composição do biogás pode variar muito e depende do dejetto utilizado (o substrato) e do processo anaeróbio empregado. O biogás com presença de metano abaixo de 40% é considerado pobre em metano. Portanto o biogás produzido com a metodologia apresentada neste trabalho não tem valor comercial, o que inviabiliza as etapas de limpeza e a purificação do biogás. Nestas etapas é efetuada a remoção do dióxido de carbono (CO₂), do vapor de água (H₂O), do sulfeto de hidrogênio (H₂S) e da amônia (NH₃), dando origem ao biometano.

Método:

Cromatógrafo: Agilent Technologies, modelo 7890B
 Colunas: Porabond Q+ Molsieve 5Å (Agilent J&W GC Columns)
 Gás: Argon
 Temperatura de injeção: 150 °C
 Temperatura do forno: 70 °C
 Deteção: TCD 200 °C
 Volume de injeção: 100 microL com seringa *gas-tight* - Amostragem a partir de saco.
 Tempo de análise: 8.5 minutos.

Padrões: Air Liquide
 1 - 30.03 % H2 | 69.97 % N2;
 2 - 15.00 % CO2 | 19.90 % H2 | 1.01 % O2 | 39.02 % N2 | 25.07 % CH4

Data:

Jan/Fev 2024

Figura 10. Método utilizado para a cromatografia.

Tempo de retenção (minutos)	Analito
3,06	CO2
4,53	H2
5,18	O2
5,67	N2
7,01	CH4

A 2,6 e 3,6 são efeitos das válvulas do GC.

Amostra: 1ª injeção			
	TR (min)	Área	%mol
CO2	3,041	713,7264	38
H2	4,53	275,2384	1
O2	5,185	131,41	4
N2	5,665	1126,738	46
CH4	7,056	690,3149	10
	Soma		99

Amostra 2ª injeção			
	TR (min)	Área	%mol
CO2	3,039	699,1646	37
H2	4,53	276,5255	1
O2	5,185	128,0474	4
N2	5,666	1113,59	45
CH4	7,057	686,5695	10
	Soma		97

Figura 11. Ordem de eluição dos componentes da mistura padrão de gases e estimativa da composição (%mol). Análise quantitativa.

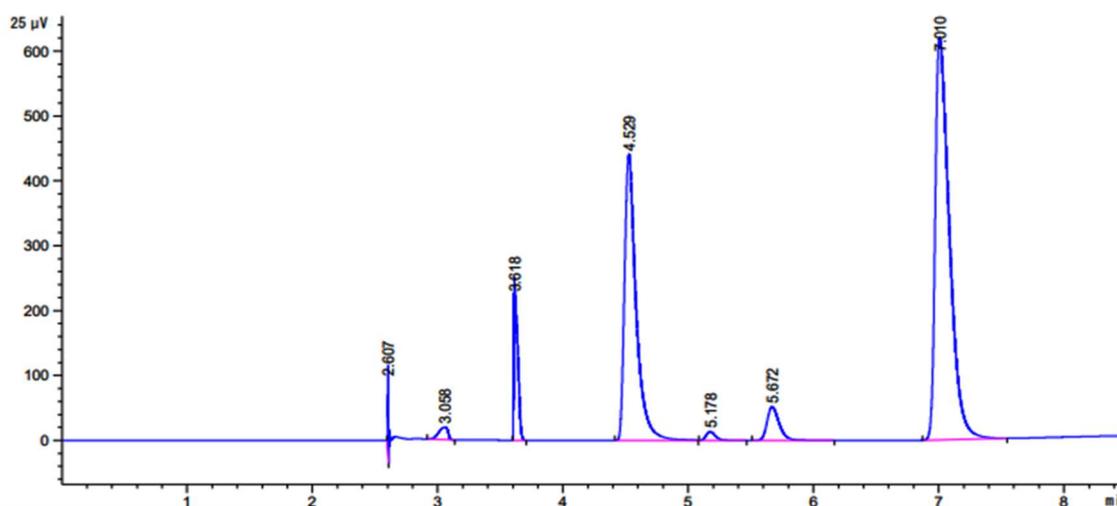


Figura 12. Padrão - mistura CO₂, H₂, O₂, N₂, CH₄. Análise quantitativa.

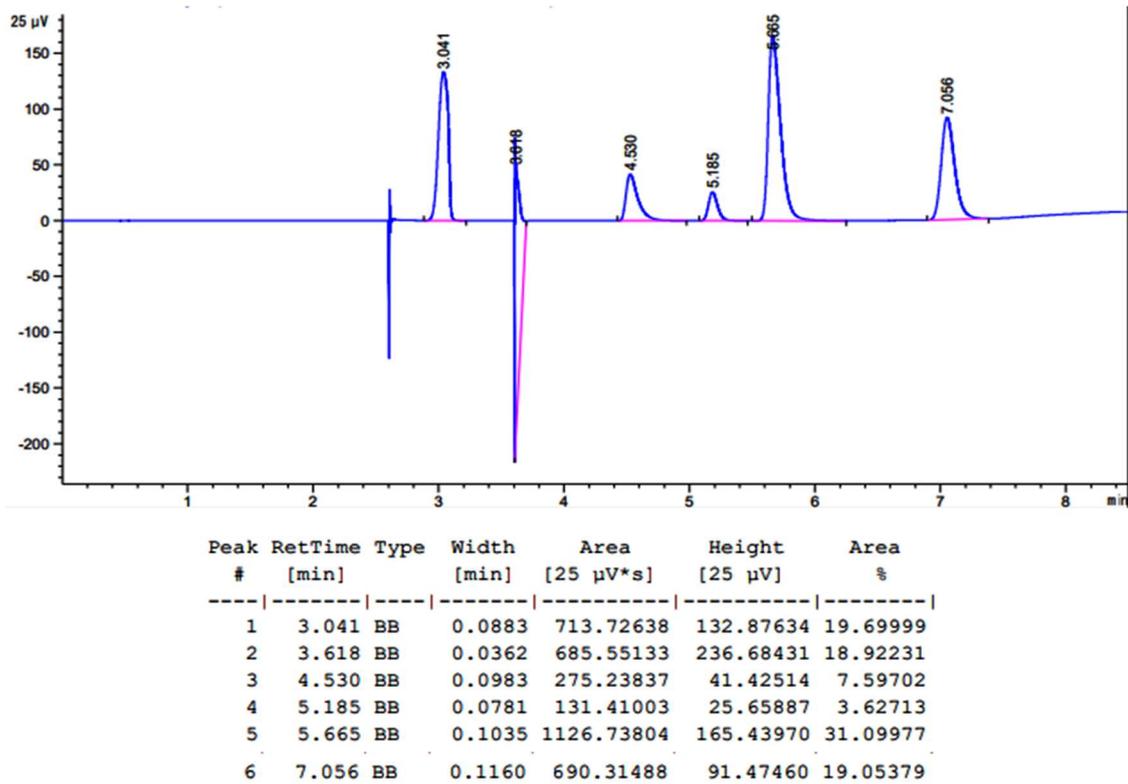


Figura 13. Amostra (injeção 1 em duplicado) - Cromatogramas e dados cromatográficos. Análise quantitativa.

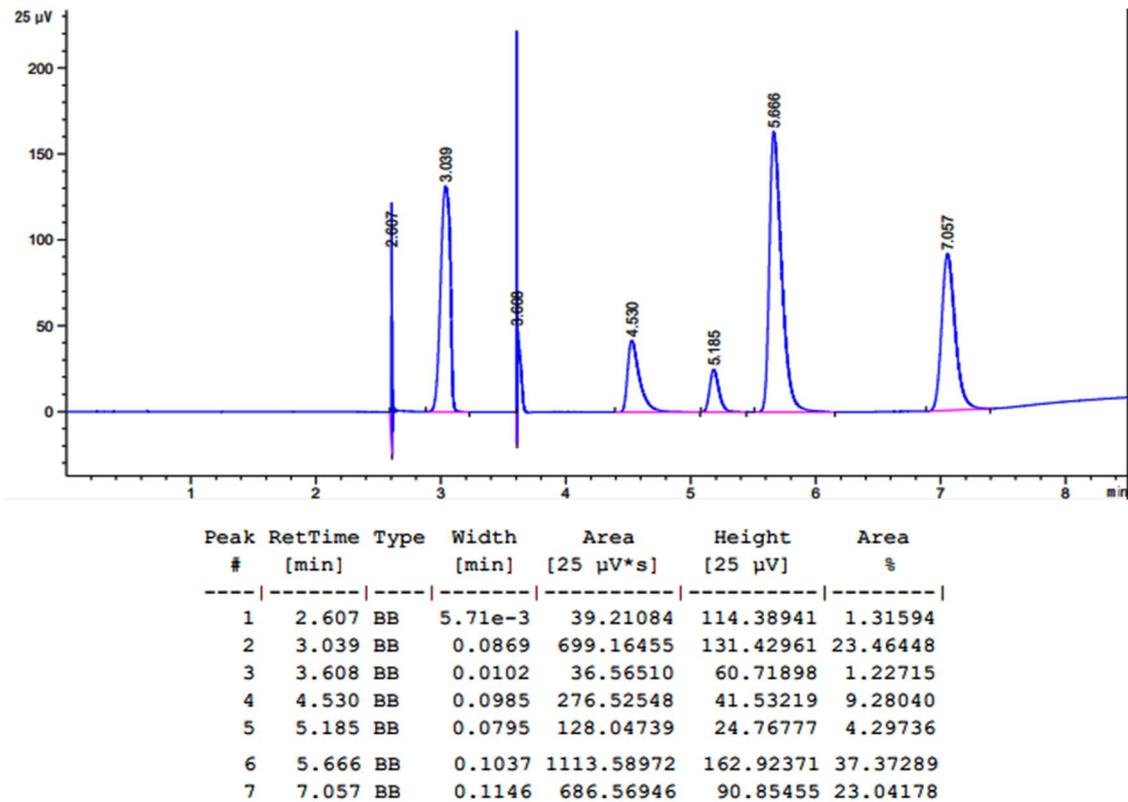


Figura 14. Amostra (injeção 2 em duplicado) - Cromatogramas e dados cromatográficos. Análise quantitativa.

4 Conclusões

É usual encontrar referências bibliográficas descrevendo a composição típica do biogás apenas em (%) (Mignogna et al., 2023; Paladino, 2022; Abubakar, Silas, and Aji, 2022).

Para não ocorrer erro de interpretação de unidades, os resultados das cromatografias serão comparados com a “Tabela - Especificação do biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto” da Resolução ANP N° 886, de 29 de Setembro de 2022 - DOU de 29.09.2022 da Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis do Brasil (ANP, 2022).

A Tabela 6 mostra de forma comparativa as especificações do biometano e a composição do biogás produzido utilizando-se a metodologia proposta neste trabalho.

Tabela 6. Biometano segundo a ANP e cromatografia do biogás produzido.

Resolução ANP - BIOMETANO		Cromatografia. Amostra 1ª injeção. (Figura 11) - BIOGÁS	
Característica	Limite (% mol)	Analito	Composição (% mol)
Metano, mín.	90,0	CH ₄	10
Oxigênio, máx.	0,8	O ₂	4
CO ₂ , máx.	3,0	CO ₂	38
CO ₂ + O ₂ +N ₂ , máx.	10	CO ₂ + O ₂ +N ₂	38+4+46

Com relação ao dióxido de carbono (CO₂), o valor de 38%mol não é um problema, considerando as etapas de limpeza e purificação realizadas para se obter o biometano.

A quantidade de oxigênio, de 4%mol, é preocupante porque demonstra que se infringiu o princípio da digestão anaeróbia que deve ocorrer sem a presença do O₂. Um valor próximo de 0,8%mol é considerado como usual e realista.

A quantidade de 46%mol de N₂ é extremamente alta. Considerando CO₂+O₂+N₂=10 a quantidade máxima de N₂ seria de aproximadamente 6%mol. O nitrogênio faz parte da estrutura molecular das proteínas (ligações peptídicas) e pode variar de acordo com o tipo de ração, pastagem ou silagem adicionada à alimentação do animal. Logo, o teor de nitrogênio deve ser monitorado na digestão anaeróbia, pois, quando convertido em amônia (NH₃), pode inibir as metanogênicas (Bastos et al., 2023). A etapa final, metanogênese, ocorre em condições estritamente anaeróbias. Deste modo, o carbono contido na biomassa é convertido em dióxido de carbono e metano através da ação das arqueas metanogênicas. As arqueas metanogênicas acetoclásticas (ex. Methanosarcina) convertem acetato a metano e as arqueas metanogênicas hidrogênótóxicas (ex. Methanobacterium e Methanospirillum) convertem hidrogênio e dióxido de carbono a metano (Kunz, Steinmetz and Amaral, 2022).

A quantidade de hidrogênio de 1%mol condiz com a composição típica do biogás.

Em suma, é possível concluir que o biogás apresenta um potencial de aproveitamento bastante elevado, contudo o maior entrave ao uso em massa deste recurso é a quantidade produzida. Os principais fatores determinantes para a máxima produção de biogás são o controle de pH, de temperatura, do tempo de retenção da matéria orgânica no sistema, da quantidade de água no sistema, da quantidade de nutrientes e da agitação.

Ajustes precisariam ser feitos nas variáveis de controle para aumentar a quantidade de metano produzido para então projetar um gerador de energia elétrica que viabilize a minimização do gasto com eletricidade.

A principal conclusão é que com o plantel de animais que está disponível na Mitra a melhor aplicação seria o uso do metano para fins de aquecimento de uma forma geral (ambiente, água, etc.). Para colocar em prática esta possibilidade duas situações devem ser consideradas: a realização de análises da composição do biogás de forma intermitente, no mínimo uma vez ao dia durante o tempo de retenção hidráulica e a construção do biodigestor nos moldes do projeto da EPAGRI (2021) para bovinos de leite.

Referências bibliográficas

Abubakar, AM, Silas, K and Aji, MM (2022). ‘An elaborate breakdown of the essentials of biogas production’, *Journal of Engineering Research and Sciences*, v.1, n. 4, pp. 93-118. <https://doi.org/10.55708/js0104013>

- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2022). *Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022*. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 29 setembro 2022.
- Bastos, JA, Goncalves, S, Soares, I, Wojcieckowski, F, Marques, R, Vigna, GDS. and Gambetta, R (2023). Produção de biogás com dejetos de bovino leiteiro em uma propriedade de pequeno porte. In: *Encontro De Pesquisa E Inovação Da Embrapa Agroenergia*, 7, Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2023. pp. 168-172.
- Canal Solar (2023). *Demanda global de energia elétrica deve aumentar 2% em 2023, aponta IEA*. [online]. Disponível: <https://canalsolar.com.br/demanda-global-de-energia-eletrica-deve-aumentar-2-em-2023-aponta-iea/> (Acessado 13 de maio de 2024).
- Deganutti, R, Palhaci, MCJP, Rossi, M, Tavares, R and Santos, C (2002). Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: *4th Encontro de Energia no Meio Rural*. Campinas, SP. Disponível: www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn (Acessado 25 de abril de 2024).
- Eckert, CT, Frigo, EP, Mari, AG, Junior, AM, Cabral, AC, Grzesiuck, AE and Dierings, LS (2015). 'Construção De Biodigestores De Batelada Para Escala Laboratorial', *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, pp. 65-82.
- EMBRAPA (2023). '*Biodigestor modelo tubular ou batelada*'. [online]. Disponível: www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/residuos/biogas/biodigestores/tubular (Acessado 23 de fevereiro de 2024).
- Energia e Biogás (n.d.). 'Panorama da geração de energia elétrica com a fonte Biogás - Biogás no Brasil e no Mundo'. Disponível: <https://energiaebiogas.com.br/biogas-no-brasil> (Acessado 23 de fevereiro de 2024).
- EPAGRI (2021). '*Epagri apresenta experiência de SC no 3º Fórum Sul Brasileiro de Biogás e Biometano*'. [online]. Disponível: www.epagri.sc.gov.br/index.php/2021/03/25/epagri-apresenta-experiencia-de-propriedade-leiteira-de-sc-com-producao-de-biogas-no-3o-forum-sul-brasileiro-de-biogas-e-biometano/ (Acessado 23 de fevereiro de 2024).
- Ferreira, RS (2020). 'Biodigestores e os fatores que determinam sua máxima produção', *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, p. e544972677. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v97.2677>
- Folha de São Paulo (2024). 'Biometano disputa espaço do petróleo e avança na transição energética'. [online]. Disponível em: www1.folha.uol.com.br/ambiente/2024/01/biometano-disputa-espaco-do-petroleo-e-avanca-na-transicao-energetica.shtml (Acessado 23 de fevereiro 2024).
- Kunz, A, Steinmetz, RLR and Amaral, AC (2019). *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves.
- Mignogna, D, Ceci, P, Cafaro, C, Corazzi, G and Avino, P (2023). 'Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review'. *Applied Sciences*, v. 13, n. 18, p.10219. <https://doi.org/10.3390/app131810219>
- Mito, JDL, Kerkhoff, S, Silva, JLG, Vendrame, MG, Steinmetz, RLR and Kunz, A (2018). *Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil*. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves.
- Paladino, O (2022). 'Data driven modelling and control strategies to improve biogas quality and production from high solids anaerobic digestion: A mini review'. *Sustainability*, v. 14, n. 24, p. 16467. <https://doi.org/10.3390/su142416467>
- Universidade de Évora – Instituto de Ciências da Terra (n.d.). '*Meteo-Data*'. Disponível: www.ict.uevora.pt/g1/index.php/meteo-data/ (Acessado 23 de fevereiro de 2024).