

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos

Autor: Karina Juli Alves Feitosa

Orientador: Prof^a Dr^a Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes

Brasília, DF

2023



Karina Juli Alves Feitosa

Produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof^ª Dr^ª Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes

Brasília, DF

2023

Karina Juli Alves Feitosa

Produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos/ Karina Juli Alves Feitosa. – Brasília, DF, 2023-

68 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof^ª Dr^ª Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Biogás. 2. Resíduos sólidos orgânicos. I. Prof^ª Dr^ª Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos

CDU 02:141:005.6

Karina Juli Alves Feitosa

Produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 15 de dezembro de 2023

**Prof^ª Dr^ª Roseany de Vasconcelos
Vieira Lopes**
Orientador

Prof^ª Dr^ª Juliana Petrocchi Rodrigues
Convidado 1

**Prof. Dr. Rodrigo Arbey Munoz
Meneses**
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, força e sabedoria para concluir este desafio. Sua orientação e bênçãos foram fundamentais ao longo deste caminho.

Aos meus pais, Carlos Roberto Feitosa e Valdilena Alves de Araujo, por me incentivarem e darem todo suporte necessário em todos os momentos da minha vida, principalmente para que eu pudesse concluir o curso e este trabalho, compreendendo minha ausência enquanto me dedicava à faculdade.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo e ajuda, por toda troca de experiências, aprendizado e amizade, que foram essenciais durante essa caminhada.

À Emanuele e Samyla, por toda ajuda e contribuição para a realização deste trabalho. Agradeço pela colaboração essencial durante as coletas de alimentos no RU, nas alimentações e nas análises laboratoriais. Obrigada por estarem sempre presentes, oferecendo suporte, ânimo e sabedoria ao longo de toda essa jornada.

Ao professor Rodrigo, por sua colaboração e contribuição durante a realização desse projeto, bem como pelo seu ensino durante minha graduação.

À professora Roseany, por sua orientação e apoio durante a elaboração deste trabalho. Toda dedicação, zelo, organização, comprometimento e orientação foram fundamentais. Agradeço por todo apoio, paciência e sabedoria foram cruciais e fizeram a diferença não somente nesse trabalho, mas em toda minha formação.

À Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), pelo apoio concedido durante a realização deste trabalho (processo 00193.00001799/2022-19), através do suporte financeiro, estrutural e acadêmico oferecido pela Fundação, foi possível viabilizar a execução deste projeto.

A todos que contribuíram de alguma forma para minha formação e para que eu chegasse onde cheguei.

A todos vocês, muito obrigada.

Resumo

Atualmente, há uma crescente preocupação com o manejo inadequado de resíduos, especialmente os resíduos sólidos urbanos (RSU). Paralelamente, existe uma busca intensificada por soluções energéticas mais sustentáveis. Nesse contexto, o biogás surge como uma alternativa promissora para enfrentar esses desafios, pois permite o aproveitamento dos resíduos orgânicos, reduzindo assim o acúmulo desses materiais, ao mesmo tempo em que oferece uma fonte renovável e viável para a geração de energia. Neste trabalho, foram estudados alguns parâmetros que interferem diretamente na produção de biogás, são eles: temperatura, pH, tempo de retenção, carga orgânica volumétrica, umidade, teor de sólidos totais e teor de sólidos voláteis, além da e concentração de amônia e gás sulfídrico e o percentual de metano e gás carbônico. Assim, este estudo teve como objetivo o acompanhamento dos parâmetros citados para a produção de biogás utilizando um biodigestor em batelada, tendo como matéria prima os resíduos alimentares provenientes do Restaurante Universitário da Universidade de Brasília Campus Gama (UnB- FGA). Foi possível estimar a quantidade de biogás produzido nos dois biodigestores de bancada de 200 e 20 litros (4,2 m³ e 0,42 m³ respectivamente). Considerando a média de 53,75 kg de resíduos alimentares coletados, o potencial de produção de biogás é de aproximadamente 2,15 m³, com uma capacidade estimada de produzir cerca de 2,795 kWh de energia. A partir dos resultados obtidos, constatou-se variações consideráveis de temperatura ao longo das alimentações, em parte devido à amplitude térmica do Distrito Federal. Também foram encontrados altos teores de umidade, sólidos totais e sólidos voláteis, o que ocasionou o acúmulo de ácidos e, conseqüentemente, a acidificação do pH. Quanto ao gás produzido, foi observada uma baixa concentração de amônia, variando de 11,03 ppmV a 133,01 ppmV e uma baixa concentração de gás sulfídrico, variando de 4,62 ppmV a 286,09 ppmV. Com relação ao percentual de metano e dióxido de carbono no biogás, foi constatada uma alta qualidade do processo, com alta porcentagem média de metano na maioria das alimentações (65-75%), o que evidencia o potencial de aproveitamento dos resíduos alimentares do RU.

Palavras-chaves: biogás. biodigestor. biodigestão.

Abstract

Currently, there is growing concern about inadequate waste management, especially municipal solid waste (MSW). At the same time, there is an intensified search for more sustainable energy solutions. In this context, biogas appears as a promising alternative to face these challenges, as it allows the use of organic waste, thus reducing the accumulation of these materials, while offering a renewable and viable source for generating energy. In this work, some parameters that directly interfere in the production of biogas were studied: temperature, pH, retention time, volumetric organic load, humidity, total solids content and volatile solids content, in addition to the concentration of ammonia and gas hydrogen sulfide and the percentage of methane and carbon dioxide. Thus, this study aimed to monitor the parameters mentioned for the production of biogas with a batch biodigester, using food waste as raw material from the University Restaurant of the University of Brasília Campus Gama (UnB-FGA). It was possible to estimate the amount of biogas produced in the two benchtop biodigesters of 200 and 20 liters (4.2 m³ and 0.42 m³ respectively). Considering an average of 53.75 kg of food waste collected, the biogas production potential is approximately 2.15 m³, with an estimated capacity to produce around 2.795 kWh of energy. From the results obtained, considerable temperature variations were observed throughout the feeds, partly due to the thermal amplitude of the Federal District. High levels of moisture, total solids and volatile solids were also found, which caused the accumulation of acids and, consequently, acidification of the pH. About the gas produced, a low concentration of ammonia was observed, ranging from 11.03 ppmV to 133.01 ppmV and a low concentration of hydrogen sulfide gas, ranging from 4.62 ppmV to 286.09 ppmV. Regarding the percentage of methane and carbon dioxide in biogas, a high quality of the process was observed, with a high average percentage of methane in most feeds (65-75%), which highlights the potential for using food waste from RU.

Keywords: biogas. parameters. biodigestion.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Crescimento do número de novas plantas de biogás no Brasil na última década. | 17 |
| Figura 2 – Etapas da digestão anaeróbia. | 20 |
| Figura 3 – Degradação do aminoácido glicina. | 21 |
| Figura 4 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para a produção de biogás. | 34 |
| Figura 5 – Biodigestor e seus componentes. | 35 |
| Figura 6 – Restaurante Universitário da Faculdade do Gama. | 36 |
| Figura 7 – Coleta dos resíduos no Restaurante Universitário. | 37 |
| Figura 8 – Separação dos resíduos. | 37 |
| Figura 9 – Trituração dos resíduos. | 38 |
| Figura 10 – Inóculo coletado em processo prévio. | 39 |
| Figura 11 – Amostras preparadas para a análise de biomassa. | 40 |
| Figura 12 – Quantificação de pH. | 42 |
| Figura 13 – Equipamento Biofoto. | 43 |
| Figura 14 – Bag utilizado para armazenamento do biogás. | 43 |
| Figura 15 – Suporte para determinação de gás carbônico. | 45 |
| Figura 16 – Porcentagem de metano e gás carbônico presentes nas alimentações de 1 a 6. | 58 |
| Figura 17 – Porcentagem média de metano produzida nas alimentações. | 59 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Composição do biogás. | 19 |
| Tabela 2 – Teor de lignocelulose em diferentes substratos em base seca. | 24 |
| Tabela 3 – Percentual de inóculo, água destilada e substrato utilizada. | 39 |
| Tabela 4 – Quantificação dos resíduos aproveitados do Restaurante Universitário. . | 46 |
| Tabela 5 – Proporção de biomassa, água e inóculo utilizada em cada alimentação. . | 47 |
| Tabela 6 – Tempo de retenção hidráulica para cada alimentação. | 49 |
| Tabela 7 – Médias semanais das medições de temperatura realizadas na Alimen- tação 4. | 50 |
| Tabela 8 – Resultados de pH obtidos nas amostras coletadas das alimentações de 1 a 9. | 52 |
| Tabela 9 – Carga Orgânica Volumétrica (COV) calculada nas alimentações de 1 a 9. . | 55 |
| Tabela 10 – Resultados obtidos nas análises de gás realizadas nas alimentações de 1 a 6. | 56 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|----------|--|
| ABiogás | Associação Brasileira do Biogás |
| AGV | Ácidos graxos voláteis |
| CIBiogás | Centro Internacional de Energias Renováveis |
| CSTR | Reator de Tanque com Agitação Contínua |
| D.A. | Digestão Anaeróbia |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FGA | Faculdade do Gama |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| LaPRREn | Laboratório de Pesquisa em Recursos Renováveis e Energéticos |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| RU | Restaurante Universitário |
| ST | Sólidos Totais |
| SV | Sólidos Voláteis |
| TRH | Tempo de Retenção Hidráulica |

Lista de símbolos

| | |
|------------|---|
| CH_3COOH | Ácido Acético |
| H_2S | Ácido Sulfídrico |
| NH_3 | Amônia |
| NH_4^+ | Amônio |
| $NaHCO_3$ | Bicarbonato de Sódio |
| Co | Cobalto |
| CO_2 | Dióxido de Carbono |
| S | Enxofre |
| Fe | Ferro |
| P | Fósforo |
| H_2 | Hidrogênio |
| $NaOH$ | Hidróxido de Sódio |
| M_{mos} | Matéria orgânica seca |
| CH_4 | Metano |
| m^3 | Unidade de volume - Metro Cúbico |
| Mo | Molibdênio |
| CO | Monóxido de Carbono |
| Ni | Níquel |
| N_2 | Nitrogênio |
| O_2 | Oxigênio |
| ppm | Unidade de concentração - Partes por milhão |
| ppmV | Unidade de concentração - Partes por milhão em volume |
| P_{CH_4} | Produtividade do biometano |

| | |
|------------|--|
| A_{CH_4} | Rendimento do biometano |
| Se | Selênio |
| t_{mos} | Unidade de massa - Tonelada de matéria orgânica seca |
| V_{CH_4} | Volume de produção diária do biometano |
| VR | Volume do digestor |
| W | Tungstênio |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Objetivo Geral | 16 |
| 1.2 | Objetivos Específicos | 16 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 | Panorama do biogás no Brasil | 17 |
| 2.2 | Biogás | 18 |
| 2.3 | Etapas do Processo de biodigestão | 19 |
| 2.3.1 | Hidrólise | 20 |
| 2.3.2 | Acidogênese | 20 |
| 2.3.3 | Acetogênese | 21 |
| 2.3.4 | Metanogênese | 21 |
| 2.4 | Biodigestores | 22 |
| 2.5 | Biomassa | 23 |
| 2.6 | Parâmetros para avaliação da biomassa no processo de biodigestão | 24 |
| 2.6.1 | Temperatura | 25 |
| 2.6.2 | Potencial hidrogeniônico - pH | 25 |
| 2.6.3 | Amônia | 26 |
| 2.6.4 | Nutrientes | 26 |
| 2.6.5 | Tamanho das partículas | 27 |
| 2.6.6 | Tempo de retenção hidráulica (TRH) | 28 |
| 2.6.7 | Teor de lipídeos | 28 |
| 2.6.8 | Umidade | 29 |
| 2.6.9 | Teor de sólidos totais (ST) | 30 |
| 2.6.10 | Teor de sólidos voláteis (SV) | 30 |
| 2.6.11 | Taxa de carga orgânica | 31 |
| 2.6.12 | Agitação | 32 |
| 2.6.13 | Produtividade e rendimento | 32 |
| 3 | METODOLOGIA | 33 |
| 3.1 | Biodigestor | 34 |
| 3.2 | Caracterização dos resíduos do RU | 36 |
| 3.2.1 | Coleta | 36 |
| 3.2.2 | Separação | 37 |
| 3.2.3 | Pesagem | 38 |
| 3.2.4 | Trituração | 38 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.2.5 | Alimentação | 38 |
| 3.3 | Acompanhamento de parâmetros | 40 |
| 3.3.1 | Temperatura | 40 |
| 3.3.2 | Análise de umidade | 40 |
| 3.3.3 | Análise de sólidos totais (ST) | 41 |
| 3.3.4 | Análise de sólidos voláteis (SV) | 41 |
| 3.3.5 | Análise de pH | 41 |
| 3.3.6 | Análise de biogás | 43 |
| 3.3.6.1 | Determinação de Amônia (NH_3) | 43 |
| 3.3.6.2 | Determinação de ácido sulfídrico (H_2S) | 44 |
| 3.3.6.3 | Determinação de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) | 45 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 46 |
| 4.1 | Estimativa do potencial de biogás produzido com os resíduos cole- | |
| | tados | 47 |
| 4.2 | Estimativa do volume de biogás produzido nos reatores | 47 |
| 4.3 | Avaliação dos parâmetros estudados | 48 |
| 4.3.1 | Tempo de retenção hidráulica (TRH) | 49 |
| 4.3.2 | Temperatura | 49 |
| 4.3.3 | pH | 51 |
| 4.3.4 | Umidade | 52 |
| 4.3.5 | Teor de sólidos Totais (ST) | 53 |
| 4.3.6 | Teor de sólidos voláteis (SV) | 54 |
| 4.3.7 | Carga orgânica volumétrica (COV) | 54 |
| 4.3.8 | Análise de biogás | 55 |
| 4.3.8.1 | Amônia (NH_3) | 56 |
| 4.3.8.2 | Gás sulfídrico (H_2S) | 57 |
| 4.3.8.3 | Metano (CH_4) e Gás Carbônico (CO_2) | 58 |
| 5 | CONCLUSÃO | 61 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 65 |

1 Introdução

Diante do cenário atual em todo mundo onde a geração de lixo cresce em paralelo com o aumento da população, existe uma preocupação com remanejamento de resíduos sólidos relacionada ao acúmulo destes nos lixões e aterros sanitários sem destinação prévia. No entanto, as alternativas para o gerenciamento destes resíduos para algum tipo de aproveitamento são atrativas.

Uma dessas alternativas trata-se da produção de biogás, que é um biocombustível potencialmente promissor e a utilização dos resíduos sólidos orgânicos como fonte de biogás apresenta grande importância na redução dos impactos ambientais antrópicos, uma vez que contribui para o controle das emissões de metano na atmosfera, já que este possui o potencial de aquecimento global vinte e cinco vezes maior que o gás carbônico (REIS, 2012).

O biogás pode ser parte da solução de curto e médio prazos para a descarbonização de setores-chave da economia brasileira, com a ampliação da oferta de energia firme, renovável e a preço competitivo, garantindo segurança energética e redução da exposição brasileira aos preços de mercados internacionais e ao câmbio (ABIÓGÁS, 2022).

O biogás e biometano são fontes de energia renovável, produzidos a partir da degradação de materiais orgânicos tais como resíduos e efluentes e outras fontes de biomassa com grande potencial econômico, ambiental e social. O aproveitamento energético desses materiais, por meio da produção do biogás, contribui em muito para a sustentabilidade e a eficiência energética de importantes setores econômicos (ABIÓGÁS, 2022).

A digestão anaeróbia (D.A.) vem sendo estudada e aplicada ao tratamento de diversos tipos de resíduos orgânicos em todo o mundo. As principais vantagens deste tratamento concentram-se na baixa demanda por energia, menores requisitos de nutrientes e menor geração de lodo quando comparado aos sistemas aeróbios. O metano gerado pelo biogás pode ser aproveitado como fonte de energia elétrica, térmica ou ainda convertido em biometano para ser utilizado como gás veicular. Além disso, o efluente final do processo (digestato) tem potencial para ser aproveitado como biofertilizante em plantas de biogás alimentadas com a maioria dos tipos de resíduos rurais e agroindustriais, permitindo a reciclagem de nutrientes a partir da incorporação do solo (GEF Biogás Brasil, 2020).

A D.A. é um processo metabólico e complexo que requer condições específicas (como a ausência de oxigênio) e depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico em metano e dióxido de carbono. Para que se tenha êxito neste processo de produção, conhecer as características e particularidades dos substratos utilizados é fundamental para a tomada de decisões na operação de

plantas de biogás (GEF Biogás Brasil, 2020).

O uso da D.A. alinhado às questões energéticas tem a função de minimizar problemas ambientais causados pelo gerenciamento inadequado de resíduos, e auxilia por exemplo na redução poluição, eutrofização de corpos hídricos e emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (GEF Biogás Brasil, 2020).

A D.A. é uma tecnologia aplicada ao tratamento de resíduos. Além de degradar a matéria orgânica, reduzindo seu potencial poluidor, gerando dois produtos altamente consumíveis na atual situação energética e econômica (o biogás e o digestato). Trata-se do biogás e do digestato. O biogás inserido na matriz energética torna-se uma opção para geração de energia, elétrica, térmica e/ou veicular, e o digestato que dependendo de suas características serve para enriquecimento de nutrientes do solo (GEF Biogás Brasil, 2020).

O Brasil possui uma ampla variedade de substratos que estão disponíveis para produção de biogás, eles são classificados em diferentes categorias: agropecuários (efluentes da suinocultura, bovinocultura, avicultura, entre outros), agroindustriais (unidades de processamento de mandioca, laticínios, abatedouros, cervejarias, usinas sucroalcooleiras entre outros), industriais (indústria de papel e celulose, alimentos e bebidas, entre outros) e resíduos urbanos (resíduos sólidos urbanos e esgoto sanitário). Cada tipo de resíduo e segmento possuem características específicas as quais exigem atenção nas etapas de manejo, preparo, tratamento e aplicação (GEF Biogás Brasil, 2020).

O biogás tem papel fundamental no agronegócio brasileiro, reduzindo custos com energia, garantindo energia firme e de qualidade para o produtor e viabilizando o aumento da produção ao dar destinação correta aos resíduos. Além disso, o biogás é um ativo importante para a redução de parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (ABIOGÁS, 2022).

No Brasil, a tecnologia e o aproveitamento energético do biogás contribuem para a evolução da matriz energética nacional, oferta local de energia elétrica, térmica e combustível a partir de uma fonte renovável, promoção da eficiência energética e ambiental, sustentabilidade de setores produtivos e inclusão social. Os equipamentos e a tecnologia do biogás, bem como a maneira de operar os biodigestores e tratar os resíduos, foram aprimorados e garantem uma produção segura, eficiente, confiável, dentro de padrões de qualidade e, principalmente, rentável (ABIOGÁS, 2022).

Desta forma, este trabalho tem por objetivo acompanhar os parâmetros operacionais do processo de biodigestão, de resíduos, do restaurante universitário (RU) da Faculdade do Gama (FGA) para produção de biogás.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral acompanhar os parâmetros do processo de biodigestão anaeróbia dos resíduos do restaurante universitário da FGA para produção de biogás, utilizando dois biodigestores de bancada de 200 litros e 20 litros.

1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja cumprido é necessário desenvolver o trabalho realizando os objetivos específicos a seguir:

- Após obtenção dos resíduos do RU realizar a triagem dos mesmos e separação dos materiais inertes ao processo, tais como: plásticos, papel, alumínio, etc;
- Realizar o pré-tratamento da biomassa antes de inseri-la no biodigestor, triturando os resíduos e diluindo-os em proporções de água específicas para a quantidade de massa em kg que será utilizada;
- Acompanhar o processo de biodigestão monitorando os parâmetros operacionais em tempos pré-determinados, tais como: temperatura, pH, tempo de retenção, carga orgânica volumétrica, umidade, teor de sólidos totais, teor de sólidos voláteis, concentração de amônia, concentração de gás sulfídrico, percentual de metano e percentual de gás carbônico;
- Realizar a análise do gás produzido para verificação da presença de amônia, gás sulfídrico, metano e gás carbônico.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Panorama do biogás no Brasil

Apesar de nos últimos anos a situação da economia brasileira ter sido desfavorável, o setor de biogás continua apresentando crescimento. Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis [CIBIOGÁS \(2022\)](#), o setor de biogás segue crescendo no Brasil. Mesmo em um cenário aparentemente desfavorável, com as flutuações no preço do barril de petróleo e a alta do dólar que desencadeou o aumento nos preços dos combustíveis e do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), com a crise hídrica que levou à entrada em vigor da bandeira de escassez hídrica no setor elétrico, além da pandemia da COVID-19 que afetou diversos setores da economia, a indústria do biogás brasileira continua aquecida.

Segundo a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), é crescente o desenvolvimento da indústria nacional de fornecedores de bens e serviços para o setor de biogás e isso tem ajudado a diminuir os custos de instalação de plantas de biogás e biometano no país. De acordo com o último levantamento nacional de plantas de biogás e biometano, realizado pelo CIBiogás o número de unidades em operação passou de 653, em 2020², para 755 em 2021 (Figura 1). Isso representa um crescimento de 16% a nível nacional ([CIBIOGÁS, 2022](#)).

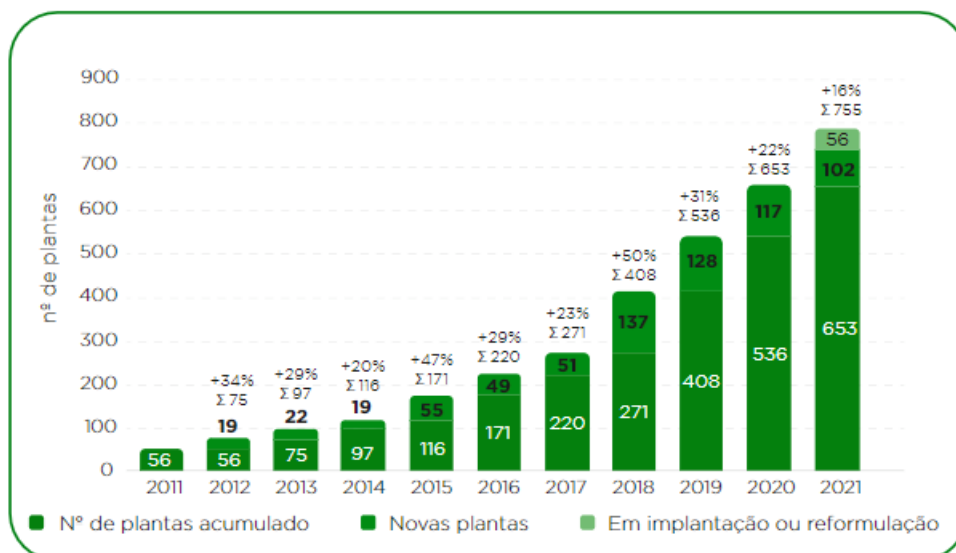


Figura 1 – Crescimento do número de novas plantas de biogás no Brasil na última década.

Fonte: [CIBIOGÁS \(2022\)](#)

Segundo a [CIBIOGÁS \(2022\)](#), houve um aumento de 16% no número de plantas em operação e 10% no volume de biogás produzido em 2021, em comparação ao ano

anterior.

De acordo com [Barros \(2021\)](#), são perspectivas para o biogás: diferentes modelos de negócios (injeção de gasodutos, geração de eletricidade, produção de calor e uso veicular); Potencial de biogás por fonte (até 2030, o potencial do Biogás no setor Sucroenergético); Comercialização biometano/gás natural e biogás nos leilões de energia elétrica.

[Barros \(2021\)](#), ainda afirma que existe um elevado potencial do uso do biogás, considerando inclusive como uma fonte distribuída de energia. Além disso, há evolução dos mercados para o biogás, aumentando as oportunidades de negócio e subsidiando um maior desenvolvimento de novos projetos.

A ABiogás estima que o Brasil deixa de aproveitar por ano, aproximadamente, 44,1 bilhões de metros cúbicos de biogás, considerando a geração de resíduos da agroindústria, pecuária e saneamento, que poderiam fornecer 19 GW de capacidade instalada para a produção de energia elétrica ou 120 milhões de m³/dia de biometano (ou gás natural renovável). Se traduzidos em equivalência energética, esse montante de biogás poderia suprir 34,5% da demanda por energia elétrica ou substituir 70% do consumo de diesel do país ([ABIOGÁS, 2022](#)).

O Brasil tem um potencial de produção de biogás que não se compara a qualquer outro país do mundo e, exclusivamente, a partir de resíduos. Isso significa que o biogás amplia a geração de energia sem a necessidade de plantar ou inutilizar áreas de cultivo, apenas aproveitando, para fins energéticos, os resíduos hoje desperdiçados e que já estão gerando emissões de gás metano ([ABIOGÁS, 2022](#)).

De acordo com [Esteves \(2020\)](#), são oportunidades para o setor de biogás: a evolução do ambiente regulatório, a pulverização e a capilaridade da oferta, o aumento das fontes intermitentes na matriz, substituição ao diesel no setor agropecuário e automotivo, geração distribuída de energia, redução das emissões de gases do efeito estufa e diversificação dos riscos.

2.2 Biogás

Segundo [Coldebella, Souza e Koheler \(s.d.\)](#), o biogás é um gás natural resultante da fermentação anaeróbica (na ausência de ar) de dejetos animais, de resíduos vegetais, lixo industrial ou residencial em condições adequadas.

O biogás é composto por uma mistura de gases que tem sua concentração determinada pelas características do resíduo e as condições de funcionamento do processo de digestão. É constituído principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), geralmente apresenta em torno de 65% de metano, o restante é composto na maior parte por dióxido de carbono e alguns outros gases como nitrogênio, hidrogênio, monóxido de

carbono entre outros, porém, em menores concentrações (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição do biogás.

| Gás | Fórmula Química | Concentração no biogás (%) |
|-------------------------|------------------|----------------------------|
| Metano | CH_4 | 50-80 |
| Dióxido de carbono | CO_2 | 20-40 |
| Hidrogênio | H_2 | 1-3 |
| Nitrogênio | N_2 | 0,5-3 |
| Gás sulfídrico e outros | H_2S, CO, NH_3 | 1-5 |

Fonte: (COLDEBELLA; SOUZA; KOHELER, s.d. apud FARGE; MAUGUIN, 1995)

Dos gases que compõem o biogás, o gás carbônico e o gás sulfídrico devem receber atenção especial pois são considerados como o principal problema na viabilização de seu armazenamento e na produção de energia, interferindo principalmente na qualidade do biogás, acarretando problemas de corrosão no sistema de condução do biogás até sua transformação como fonte de energia elétrica ou térmica, necessitando de processos de tratamento (MAGALHÃES, 2018).

Dentre os componentes gasosos, o metano (CH_4) é o mais atrativo pois pode ser aproveitado para a geração de energia em substituição às fontes convencionais (carvão, petróleo, gás natural) e em diferentes formas, como elétrica, energia térmica e combustível utilizado em veículos (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.3 Etapas do Processo de biodigestão

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e resíduo líquido rico em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação 2.1 (ARAÚJO, 2017).



A digestão anaeróbia é um processo de fermentação simples que pode ocorrer em uma lagoa anaeróbia ou em um tanque. A degradação anaeróbia da matéria orgânica a metano é um processo biológico que ocorre em diferentes fases, sob ação de microorganismos que atuam de forma simbiótica (ARAÚJO, 2017).

A Figura 2 apresenta as etapas do processo de digestão anaeróbia:

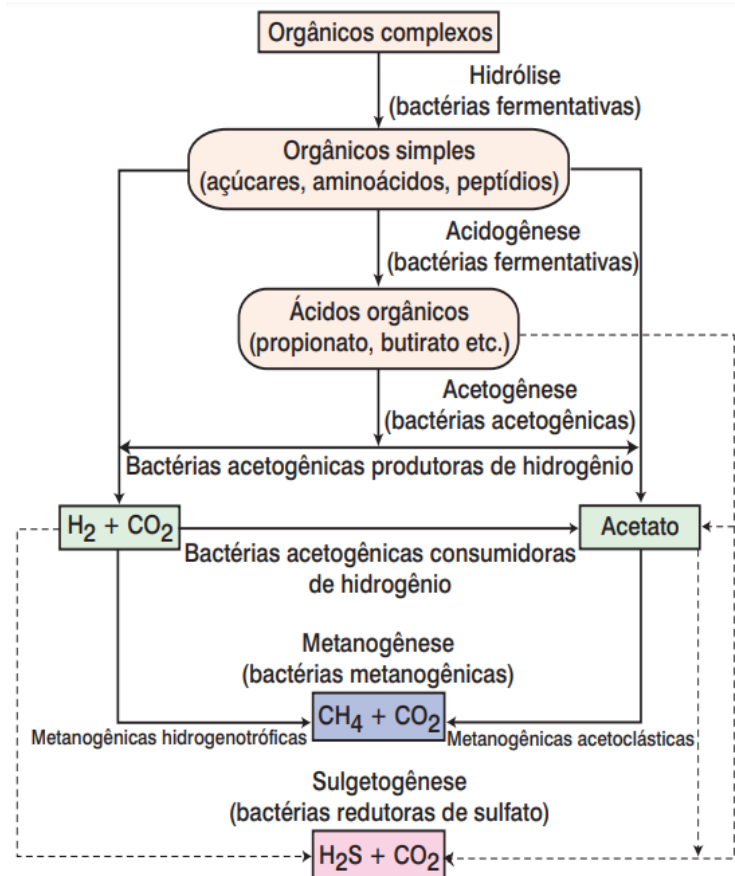


Figura 2 – Etapas da digestão anaeróbia.

Fonte: CHERNICHARO (2007)

2.3.1 Hidrólise

A hidrólise (hidro=água e lysis=quebra) é a primeira etapa da digestão anaeróbia (D.A). Durante esta etapa, os componentes químicos mais complexos (polímeros) presentes nos substratos são degradados em meio aquoso e convertidos em moléculas menores (monômeros), que são então consumidos durante as etapas posteriores. Durante a hidrólise os polímeros são convertidos em compostos menores por meio de enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas, ou seja, a degradação neste estágio inicial ocorre fora das células dos microrganismos (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.3.2 Acidogênese

Os produtos solúveis provenientes da fase de hidrólise são metabolizados, no interior das células das bactérias fermentativas, em compostos mais simples que são posteriormente excretados por um grupo diversificado de bactérias, das quais a maioria é anaeróbia obrigatória. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis de cadeia curta (AGV), álcoois, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, para além de novas células bacterianas. A acidogênese é efetuada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, designadamente as espécies *Clostri-*

dium Bacteroids que formam esporos, o que lhes confere capacidade de sobrevivência em ambientes adversos (REIS, 2012).

Durante a etapa de acidogênese, a degradação dos aminoácidos resulta na produção de ácidos orgânicos (ex.: ácido acético e ácido butírico), além da liberação de amônia (NH_3) por meio da quebra das ligações peptídicas (GEF Biogás Brasil, 2020). A Figura 3 mostra a degradação do aminoácido glicina, originando a amônia e o ácido acético.

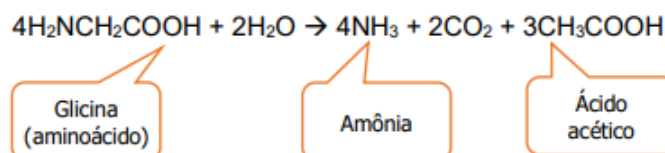


Figura 3 – Degradação do aminoácido glicina.

Fonte: GEF Biogás Brasil (2020)

2.3.3 Acetogênese

Por sua vez, nessa etapa as bactérias acetogênicas realizam a oxidação dos produtos gerados na fase da acidogênese e, como produto adquirem o substrato com as características necessárias para o desenvolvimento das bactérias e arqueas metanogênicas.

Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são: Hidrogênio (H_2), Dióxido de carbono (CO_2) e ácido acético (CH_3COOH). Durante a produção dos ácidos acético e propiônico, é formada uma grande quantidade de hidrogênio, fazendo com que o valor do pH do meio se acidifique. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas bactérias metanogênicas. Porém, pelo menos 50% da matéria biodegradável é convertida em propionato e butirato que são posteriormente decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (AQUINO, 2005).

Dessa forma, os produtos da acidogênese são transformados pelas bactérias acetogênicas em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato.

2.3.4 Metanogênese

A metanogênese é a última etapa do processo de degradação da matéria orgânica. Nela, o metano é formado principalmente a partir de acetato, CO_2 e H_2 por bactérias estritamente anaeróbias. Desta forma, todos os produtos da fermentação devem ser convertidos em compostos que podem ser utilizados pelas metanogênicas (GEF Biogás Brasil, 2020).

As arqueas acetoclásticas são heterótrofas, produzindo o metano e CO_2 a partir da redução do acetato (fermentação) (REIS, 2012).

Nessa etapa, é importante observar a quantidade de nutrientes presentes na mistura.

A adição de grandes quantidades de mono e dissacarídeos presentes em resíduos de frutas, por exemplo, podem resultar na acidificação dos reatores anaeróbios e morte das arqueas metanogênicas. Como a etapa de metanogênese é mais lenta que a hidrólise e a fermentação (acidogênese a acetogênese), a rápida degradação destes compostos leva à formação de ácidos orgânicos em uma velocidade maior com que as metanogênicas conseguem consumir, resultando em acúmulo de ácidos dentro do reator (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.4 Biodigestores

Os biodigestores anaeróbios podem ser definidos como câmaras fechadas, nas quais é colocado o substrato orgânico para ser decomposto na ausência de oxigênio molecular, tendo como subproduto principal o biogás. Para que isso ocorra, é necessária a ação conjunta de diversos micro-organismos, o que pode exigir tempos de detenção elevados, para que o substrato adicionado seja decomposto (REIS, 2012).

O biodigestor é constituído por um reservatório que armazena a biomassa por um determinado tempo e por uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido. O biogás fica retido na parte livre do biodigestor e, em seguida, pode ser canalizado para ser utilizado em diversas aplicações, como processos de aquecimento, resfriamento, ou na geração de energia elétrica. O biodigestor pode ser classificado como contínuo ou intermitente. No primeiro caso, o abastecimento de biomassa é diário, com descarga proporcional à entrada de biomassa. Já no intermitente, utiliza-se a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até a completa biodigestão. Em seguida, são retirados os restos da digestão e realiza-se uma nova recarga (ARAÚJO, 2017).

Segundo Biogás (2020), as características do substrato definem o regime de alimentação de uma planta de biogás, tendo assim, impacto na escolha do tipo de tecnologia e na produção de biogás. Essencialmente, a classificação conforme o regime segue os seguintes tipos: contínuo, semi-contínuo e em batelada. Dessa forma:

- Contínuo: Neste sistema, a alimentação do digestor é ininterrupta, sendo a vazão de entrada igual a vazão de saída. Esse tipo de fluxo é utilizado principalmente para biodigestores que realizam o tratamento de esgotos industriais e urbanos.
- Semi-contínuo: A alimentação é feita apenas uma vez até completar o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), posteriormente, são adicionadas novas cargas, onde o digestato é descarregado regularmente na mesma quantidade de substrato inserido. Este processo é mais usual em pequenas escalas, como em áreas rurais.

- Batelada: Conhecido também como descontínuo, esses reatores trabalham com ciclos de alimentação, digestão e descarte. São alimentados uma única vez até se findar a biodigestão. Após isso, são esvaziados e alimentados novamente, iniciando um novo processo de fermentação. Esse regime é utilizado quando a concentração de sólidos no substrato é mais elevada, por exemplo: biodigestão de resíduos da avicultura ou de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

2.5 Biomassa

Segundo o Ministério de Minas e Energia -MME (2007), biomassa corresponde à matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos derivados, tais como as florestas, as culturas e os resíduos agrícolas, os dejetos animais e a matéria orgânica que é contida nos rejeitos industrial e urbano. Esta matéria contém a energia química acumulada através da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida através de diferentes processos em produtos energéticos de natureza distinta, tais como: carvão vegetal, etanol, gases combustíveis e de síntese, óleos vegetais combustíveis e outros.

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontram-se os resíduos urbanos, agrícolas e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais, por exemplo, mamona e soja. A utilização da biomassa, como fonte da matriz energética, por países que aderiram a tal tecnologia, tem sido reconhecida como precursora de um ato estratégico para o futuro, pois trata-se de uma fonte renovável de baixo custo, com aproveitamento dos resíduos que ainda podem ser utilizados como biofertilizantes. Além do mais, vale salientar que é potencialmente menos poluente em relação às fontes convencionais (ARAÚJO, 2017 apud CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008).

Em se tratando da biomassa lignocelulósica, esta possui uma estrutura rígida e complexa, formada principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Além disso, também fazem parte da sua composição a água e pequenas quantidades de proteínas e minerais. A lignocelulose representa aproximadamente 20% a 30% da massa seca da parede celular dos vegetais (GEF Biogás Brasil, 2020).

A celulose é um polímero formado a partir de ligações de glicose. A propriedades da celulose dependem do seu grau de polimerização, ou seja, do número de unidades de glicose repetidas na molécula. Usualmente o grau de polimerização da celulose é superior a 300, com valores médios entre 800 a 10.000. As fibras celulósicas são cobertas por hemicelulose e lignina (GEF Biogás Brasil, 2020).

A hemicelulose é um composto de baixo peso molecular formado principalmente

por xilose. Os polímeros que formam a hemicelulose são, de forma geral, facilmente hidrolisáveis. No entanto, a hemicelulose é responsável pela ligação entre as moléculas de celulose e lignina, o que torna a estrutura muito mais rígida (GEF Biogás Brasil, 2020).

A lignina é um polímero formado por uma estrutura complexa de álcoois aromáticos interligados, cuja estrutura em um vegetal tem a função de promover resistência aos ataques microbianos e ao estresse oxidativo. A limitação da D.A. da lignina ocorre pela toxicidade de seus componentes aos microrganismos anaeróbios, pela barreira física da sua estrutura que impede o acesso das enzimas e por este ser um composto hidrofóbico, ou seja, não absorve água, a ação das enzimas torna-se ainda mais limitada (GEF Biogás Brasil, 2020).

Segundo GEF Biogás Brasil (2020) a proporção dos diferentes componentes de lignocelulose dos substratos varia de acordo com o tipo de substrato e fase de formação. A Tabela 2 mostra o teor de lignocelulose em diferentes substratos em base seca.

Tabela 2 – Teor de lignocelulose em diferentes substratos em base seca.

| Substrato | Celulose (%) | Hemicelulose (%) | Lignina (%) |
|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| Espiga de milho | 45 | 35 | 15 |
| Frutas e hortaliças | 17 | 10 | 6 |
| Gramíneas | 35 | 45 | 20 |
| Palha de trigo | 30 | 50 | 15 |
| Dejeto suíno | 6 | 30 | N.I. |
| Dejeto bovino | 3 | 2 | 5 |

Fonte: GEF Biogás Brasil (2020)

2.6 Parâmetros para avaliação da biomassa no processo de biodigestão

A decomposição de biomassa feita através de bactérias metanogênicas dependem das condições encontradas dentro dos biodigestores, porém, a qualidade do biogás e a porcentagem de metano estão associadas a parâmetros que interferem diretamente no processo de D.A.. Isso se deve ainda, pelo fato de que os substratos de difícil degradação biológica, principalmente materiais lignocelulósicos, encontram na hidrólise a etapa limitante do processo, visto que as enzimas hidrolíticas não são eficientes na quebra desses materiais (GUERI; SOUZA; KUCZMAN, 2017).

Neste tópico são apresentados os principais parâmetros para acompanhamento do processo de biodigestão.

2.6.1 Temperatura

A temperatura é um parâmetro importante pois sua alteração brusca pode causar dano as bactérias metanogênicas na primeira fase.

Segundo Rocha (2016), a faixa ideal para a produção do biogás é entre 35 a 45 °C, podendo também ser possível a produção em uma faixa de 50 a 60 °C. Mesmo dentro de uma faixa, as bactérias metanogênicas mesofílicas são bastante sensíveis às alterações de temperatura. Portanto, para a boa eficiência dos reatores anaeróbios a temperatura de operação de um reator deve ser mantida dentro de uma faixa de ± 2 °C. Caso esse critério não seja garantido, perdas de até 30% quanto à eficiência na produção de metano podem ser registradas.

A atividade biológica e a produção de metano são diretamente relacionadas à temperatura de operação dos reatores. A maioria das arqueas metanogênicas são atividades em duas faixas de temperatura: entre 30-40 °C (temperatura mesofílica) e entre 50-60 °C (temperatura termofílica). Por ser uma faixa de transição, temperaturas na faixa de 40-50 °C causam inibição das metanogênicas (GEF Biogás Brasil, 2020).

Na biodigestão anaeróbia a temperatura determina a velocidade das reações químicas bem como a taxa de produção de biogás e a qualidade do produto. Então para que os microrganismos se desenvolvam da melhor maneira possível e gerem quantidades satisfatórias de biogás, é necessário que o calor seja fornecido externamente (KARLSSON et al., 2014).

2.6.2 Potencial hidrogeniônico - pH

As variações de acidez seguem o mesmo princípio da temperatura, na qual cada grupo de bactérias possui seu ponto ideal de acidez. Nas fases da hidrólise e da acidogênese, o pH ideal fica em torno de 5,2 à 6,3. Já na acetogênese e metanogênese o pH ideal fica entre 6,5 à 8. Abaixo do pH crítico pode haver precipitação dos íons metálicos, bem como inibição da ação bacteriana, devido à produção de ácidos, visto que a parede celular bacteriana é mais permeável às moléculas não dissociadas em comparação com suas formas ionizadas. Acima do pH crítico, a partir do qual a concentração de íons carbonato disponíveis é elevada, os metais pesados passam a ser precipitados na forma de carbonatos, e neste caso é acentuada a influência do pH (ARAÚJO, 2017).

Uma queda acentuada no pH da solução, provocada pela rapidez na acidificação pode inibir a produção de biogás, provocando queda na atividade metanogênica (BARCELOS, 2009).

Para evitar a formação de amônia dentro do reator deve-se equilibrar a dosagem de substratos ricos em proteínas e manter um pH do sistema próximo da neutralidade (pH = 7). Valores mais baixos de pH podem inibir a atividade biológica das metanogênicas e

valores mais altos podem favorecer a formação de amônia e aumentar o risco de toxicidade (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.6.3 Amônia

Amônia (NH_3) é um gás e amônio (NH_4^+) é um íon solúvel em água e estes compostos são formados a partir da degradação anaeróbia das proteínas e aminoácidos. A concentração do gás amônia ou do íon amônio depende do pH do meio. Quando o pH do sistema é de aproximadamente 7,0, a relação $NH_4^+:NH_3$ é de 99:1, ou seja, 99% de amônio e 1% de amônia. Por outro lado, quando o pH é de 9,25 tem-se um equilíbrio de 50:50. A temperatura também influencia no equilíbrio entre a concentração de NH_3 e NH_4^+ . Dessa forma quanto maior a temperatura do sistema maior a formação de amônia, ou seja, o efeito inibidor aumenta com o aumento da temperatura (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.6.4 Nutrientes

A presença de alguns macroelementos como o carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos são necessários para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, sendo assim, o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são importantes. Se for necessário, pode ser feita a dosagem de nutrientes e ativadores químicos para que ocorra uma boa fermentação da biomassa (ARAÚJO, 2017 apud FILHO, 1981).

Os principais nutrientes podem ser classificados em macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) e micronutrientes: ferro (Fe), níquel (Ni), cobalto (Co), selênio (Se), molibdênio (Mo) e tungstênio (W).

A relação ótima entre carbono/nitrogênio (C:N) é de 30:1. No entanto, esta é apenas uma indicação e relações da ordem de 30-60 podem ser aceitáveis para a D.A., caso os demais parâmetros sejam mantidos em condições ótimas. Para que o carbono presente na matéria orgânica possa ser convertido em metano, é necessária a presença de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, em quantidades apropriadas. São recomendadas as seguintes relações em massa: Carbono/Nitrogênio de 20/1 a 30/1 e de Carbono/Fósforo de 150/1. A relação C/N influencia o processo e, conseqüentemente, a produção de gás (NAZARO, 2016).

Caso o substrato não contenha quantidades suficientes de nutrientes, estes devem ser adicionados, levando-se em conta o fato de que altas concentrações de nitrogênio total podem provocar inibição na digestão, visto que durante o processo uma parte considerável do nitrogênio total é transformada em nitrogênio amoniacal. O nitrogênio amoniacal tem efeito tóxico em concentrações acima de 1500 mg/L e altos valores de pH em concentrações

maiores que 3000 mg/L para qualquer valor de pH (ROCHA, 2016 apud SOUZA, 1984).

A deficiência de nitrogênio no substrato implica em limitação da atividade metabólica dos microrganismos, que neste caso não conseguem degradar todo o carbono existente, resultando em ineficiência do processo de bioconversão de substratos em biogás. Por outro lado, o excesso de nitrogênio pode não ser totalmente utilizado pelas bactérias e este nitrogênio tende a acumular no sistema, principalmente na forma de amônia (NH_3), o que provoca inibição da atividade biológica das metanogênicas e, conseqüentemente, instabilidade e ineficiência do sistema (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.6.5 Tamanho das partículas

A ação dos microrganismos sobre o substrato pode ser dificultada se o resíduo for composto de partículas de grandes dimensões. Assim, torna-se necessário um pré-tratamento, a exemplo da moagem, que aumenta a superfície de contato entre o material e os microrganismos, facilitando tanto essa ação como a mistura do material. Resíduos lignocelulósicos podem necessitar de pré-tratamento para liberar a celulose e hemicelulose da lignina. A palha, por exemplo, deve ser pré-fermentada e se possível triturada em pequenos pedaços para facilitar o processo (NAZARO, 2016).

No caso da utilização de substratos de restos de comida, é conveniente que este material seja triturado antes de sua introdução no reator (NAZARO, 2016). Esse processo é recomendado para aumentar a digestibilidade dos resíduos alimentares, aumentando o contato superficial entre substrato e micro-organismos, tornando as partículas menores para facilitar a biodigestão.

As culturas energéticas com altos teores de celulose, hemicelulose e lignina (palha, grama, silagem, alimentos, resíduos vegetais em geral) são degradadas lentamente na biodigestão, devido à sua estrutura complexa. A fim de maximizar a taxa de digestão de materiais ricos em celulose é benéfico cortá-lo e/ou promover um processo de trituração para quebrar a estrutura complexa da celulose e torná-la mais acessível para a digestão como uso do calor ou tratamento químico. Portanto, quanto menor a partícula, mais acessível estará o substrato para que os micro-organismos realizem a biodigestão. Diminuir seu tamanho pode aumentar a taxa de degradação e proporcionar um maior rendimento na produção de biogás, pois há mais contato superficial entre substrato e micro-organismos (GEF Biogás Brasil, 2020).

Dessa forma, para que a biodigestão ocorra de maneira eficiente é recomendado que o tamanho máximo das partículas seja de 12 milímetros. Vários estudos mostram a correlação entre o tamanho de partícula e a produção de metano, podendo um tamanho máximo de partícula de degradação ser inferior a um milímetro. Partículas excessivamente pequenas podem causar problemas, como, por exemplo, o entupimento do equipamento

em fábrica de grande escala. Os organismos no processo de biogás têm uma capacidade única para degradar os diferentes compostos. Muitas vezes, é necessário que apenas seja dado ao substrato o tempo suficiente para que ele se degrade. Esse é muito importante economicamente para uma planta de biogás, pois significa que o tempo de retenção pode ser menor sem que comprometa a produção de biogás (KARLSSON et al., 2014).

2.6.6 Tempo de retenção hidráulica (TRH)

O tempo de retenção é caracterizado pelo tempo em que a matéria orgânica vai permanecer no biodigestor para que ocorra a digestão completa.

Segundo Barcelos (2009), a presença de substâncias tóxicas no sistema pode inibir a digestão anaeróbia, visto que as arqueas metanogênicas são sensíveis e vulneráveis. A sensibilidade dos sistemas anaeróbios a cargas tóxicas depende, significativamente, do parâmetro operacional tempo de retenção hidráulica.

O tempo de retenção hidráulica pode ser obtido por meio da Equação 2.2.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (2.2)$$

Onde:

TRH = tempo de retenção hidráulica (dia)

Q = volume do substrato introduzido no digestor por dia ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

V = volume do digestor (m^3)

2.6.7 Teor de lipídeos

Os lipídeos são substratos ricos em energia e com elevado potencial para a produção de biogás com alto teor de metano. Os lipídeos incluem as gorduras e os óleos e são encontrados nos tecidos tanto das plantas quanto dos animais, sendo formados a partir da ligação entre uma molécula de glicerol e três moléculas de ácidos graxos (de cadeia longa), que juntos formam os triglicerídeos (GEF Biogás Brasil, 2020).

As gorduras animais (ex.: banha) e as gorduras e óleos vegetais (ex: azeite de oliva e óleo de girassol) são as principais formas de lipídeos na natureza. A gordura saturada é proveniente de derivados de carne bovina e leite. A gordura monoinsaturada é derivada de frutas como abacate e óleos vegetais. Já a gordura poli-insaturada é encontrada em peixes, soja e grãos em geral (GEF Biogás Brasil, 2020).

As gorduras e óleos são hidrolisados na primeira etapa da digestão anaeróbia e transformados em ácidos graxos de cadeia longa. Durante a fase de fermentação estes ácidos são convertidos em ácidos orgânicos voláteis (até 7 unidades de carbono) que são

então consumidos pelas bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas (GEF Biogás Brasil, 2020).

O alto teor de lipídeos presente no substrato utilizado para a alimentação dos reatores pode resultar em elevado volume de biogás. Contudo, o acúmulo de ácidos graxos dentro do reator pode acarretar inibição do sistema (GEF Biogás Brasil, 2020).

2.6.8 Umidade

O teor de umidade aumenta o crescimento de bactérias metanogênicas e facilita seu movimento e transporte de nutrientes (MROSSO; MECHA; KIPLAGAT, 2023).

Sabe-se que a umidade fornece meio aquoso essencial para a digestão dos resíduos, facilita o transporte de nutrientes e microrganismos pelo interior do aterro ou digestor. Além disso, quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção de gás, visto que este fator influencia na degradação e na taxa de geração do biogás (FILHO, 2005).

Segundo Bidone e Povinelli (1999) o teor de umidade dos resíduos está na faixa entre 40 – 60%, porém, alguns estudos apontam que umidades acima desses valores também oferecem bons resultados.

É importante que o substrato não seja muito diluído, ou seja, não deve conter muita água em relação à quantidade de substratos, pois pode comprometer a taxa de crescimento dos microrganismos. A quantidade de água a ser adicionada ao substrato depende do tipo de processo a ser utilizado. Um substrato muito diluído pode ser tratado por meio de diferentes técnicas, de modo a reter os microrganismos ou trazer a biomassa de volta ao processo (KARLSSON et al., 2014).

A Equação 2.3 mostra o teor de umidade determinado de acordo com a metodologia da World Health Organization (1978), no qual, uma amostra úmida (M_h) é pesada em uma balança analítica em cápsulas de porcelana, em seguida colocada em estufa a temperatura de 65°C por um período de 2 horas, até atingir peso constante.

$$\%W = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (2.3)$$

Onde:

$\%W$ = Teor de umidade (% em massa);

M_h = Peso da amostra úmida (g);

M_s = Peso da amostra seca (g).

A presença de água é um importante parâmetro para a D.A., tendo em vista que favorece o contato entre os nutrientes, substratos e microrganismos responsáveis pelo processo; além de estimular o crescimento destes microrganismos que são responsáveis

pela produção de biogás e metano (LUCENA, 2016 apud PIKANÇO; ALVES; LEITE et al.; BARCELOS, 2004, 2008, 2009, 2009), além de conduzir e transportar enzimas e outros metabólitos importantes para a D.A. e viabilizar determinadas reações necessárias ao processo conforme afirmam Leite (2002) e Picanço (2004).

De acordo com Mrosso, Mecha e Kiplagat (2023), os processos de bioconversão são adequados para o substrato que contém um teor de umidade superior a 50%. Um grande problema da D.A. em resíduos que contêm frutas e vegetais é a rápida acidificação devido ao baixo pH e um maior nível de produção de ácidos graxos voláteis, o que limita a metanogênese no digestor.

2.6.9 Teor de sólidos totais (ST)

Um indicador da massa total a ser tratada é a concentração de sólidos que se refere ao resíduo total presente no substrato, sendo este de origem orgânica ou inorgânica. Como o processo anaeróbio decompõe somente a fração teoricamente orgânica do substrato, quanto maior a concentração de sólidos totais voláteis no substrato, que representa o teor de matéria orgânica biodegradável, maior será a taxa de bioconversão do resíduo (ROCHA, 2016 apud LEITE; POVINELLI, 1999).

O teor de sólidos totais é calculado a partir do teor de umidade e corresponde à fração restante ao se retirar a fração úmida (Eq 2.4).

$$ST = 100 - W \quad (2.4)$$

Onde:

ST = Teor de sólidos totais (% em massa);

W = Umidade (%).

2.6.10 Teor de sólidos voláteis (SV)

Os sólidos voláteis (SV) é uma fração de sólidos totais, que segundo Firmo (2013) é tido como parâmetro para a análise da biodegradabilidade do resíduo por medir de forma indireta a quantidade de material que ainda pode ser degradado, sendo sua biodegradabilidade diretamente proporcional ao teor de sólidos voláteis. Desta forma, segundo Zhang et al. (2007), a biodegradabilidade do resíduo e a produção de biogás está relacionada com o teor de sólidos totais e voláteis presente na amostra.

Os sólidos voláteis também funcionam como um indicativo para a estabilização biológica, que segundo Kelly et al. (2002), quando o teor de SV se encontra com menos de 20%, significa que contém pouca quantidade de matéria orgânica e pode ser considerado

como estabilizado, como por exemplo, o resíduo de 7 anos estudado por [Alves \(2008\)](#) que apresentou teor de 9,2% de sólidos voláteis.

A análise de sólidos voláteis é realizada de acordo com [World Health Organization \(1978\)](#) e [American Public Health Association \(1995\)](#). Uma amostra de 3g de substratos secos a 105°C (M1), são pesados em uma balança analítica em cadinhos de porcelana e levados para calcinação em um forno mufla por 2h, a 550°C.

Após este período, o cadinho com a amostra calcinada (M2) é levado a um desidratador com sílica gel e mantido a vácuo para resfriamento antes de sua pesagem. A concentração de sólidos voláteis é calculada pela Equação 2.5.

$$\%SV = \frac{M1 - M2}{M1} * 100 \quad (2.5)$$

Onde:

%SV = teor de sólidos voláteis (% em massa);

M1 = massa da amostra seca (g);

M2 = massa da amostra calcinada (g).

2.6.11 Taxa de carga orgânica

A taxa de carga orgânica consiste na quantidade de sólidos voláteis inseridos dentro do reator. Segundo [Gueri, Souza e Kuczman \(2017 apud MAO et al., 2015\)](#), com o aumento da carga orgânica a produção de biogás tende a ampliar, respeitando-se o limite máximo de 6,4 $kg.m^3.d^{-1}$, caso contrário, o equilíbrio do processo de digestão pode ser gravemente afetado com inibição microbiana. Alterações repentinas no tipo de substrato a ser inserido ao reator também podem levar a inibição da atividade microbiana nas fases da fermentação.

A carga orgânica volumétrica (COV) é calculada de acordo com a Equação 2.6.

$$COV = \frac{Q * SV}{V_r} \quad (2.6)$$

Sendo:

SV = teor de sólidos totais voláteis (%)

Q = vazão afluyente de substrato ($m_3.dia_{-1}$)

V_r = volume líquido do reator ($\%m_3$)

2.6.12 Agitação

A mistura dentro do reator ocorre por meio da agitação do substrato. De acordo com Nazaro (2016), deve-se minimizar os espaços mortos e,consequentemente, a ocorrência de curto circuitos no reator, promovendo a mistura do substrato por bombeamento de líquido, gás ou ainda por agitação mecânica. O objetivo da agitação da biomassa é aumentar a homogeneização do substrato em termos de concentração,possibilitando um efetivo contato entre substrato e microrganismos, agitando os reagentes para garantir a mistura adequada.

2.6.13 Produtividade e rendimento

Esses dois parâmetros servem para quantificar o desempenho de um biodigestor.

A produtividade é expressa pela produção de gás em relação ao volume do biodigestor. Ela é definida pelo quociente entre a produção diária de gás e o volume do reator, indicando, portanto, a eficiência. A produtividade pode se referir tanto à produção de biogás (Pbiogás) quanto à produção de metano (P_{CH_4}). A produtividade de metano conseguida no biodigestor pode ser calculada pela Equação 2.7 (PROBIOGÁS, 2010).

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{VR} \quad (2.7)$$

Onde:

P_{CH_4} : Produtividade do biometano ($m^3 / (m^3 \cdot d)$)

V_{CH_4} : Volume de produção diária do metano (Nm^3/d)

VR: Volume do digestor (m^3).

O rendimento expressa a produção de gás em relação à quantidade de substrato introduzida. Da mesma forma que a produtividade, o rendimento (A) pode se referir tanto à produção de biogás (Abiogás) quanto à produção de metano (Ametano). Ele é determinado pelo quociente entre o volume de gás produzido e a quantidade de matéria orgânica seca introduzida. Para o caso do metano o rendimento é dado pela relação expressa na Equação 2.8 (PROBIOGÁS, 2010).

$$A_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{M_{mos}} \quad (2.8)$$

Onde:

A_{CH_4} : Rendimento do biometano (m^3/t_{mos});

V_{CH_4} : Volume de produção diária do metano (m^3/d);

M_{mos} : Matéria orgânica seca introduzida no digestor (t_{mos}/d).

3 Metodologia

Este capítulo trata da metodologia empregada no trabalho, após a construção do biodigestor, onde foi iniciada a primeira digestão anaeróbia, seguida pela descrição dos parâmetros avaliados da biomassa estudada.

O fluxograma da Figura 4 descreve as etapas desenvolvidas para a produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos obtidos do Restaurante Universitário (RU), passando pelo processo de fermentação anaeróbia no biodigestor construído no Laboratório de Pesquisa em Recursos Renováveis e Energéticos (LaPRREn) da Faculdade Gama - FGA da Universidade de Brasília. Os parâmetros estudados foram: temperatura, pH, tempo de retenção, umidade, teor de sólidos voláteis e totais, além de carga orgânica volumétrica, concentração de amônia, concentração de gás sulfídrico e porcentagem de amônia e gás carbônico.

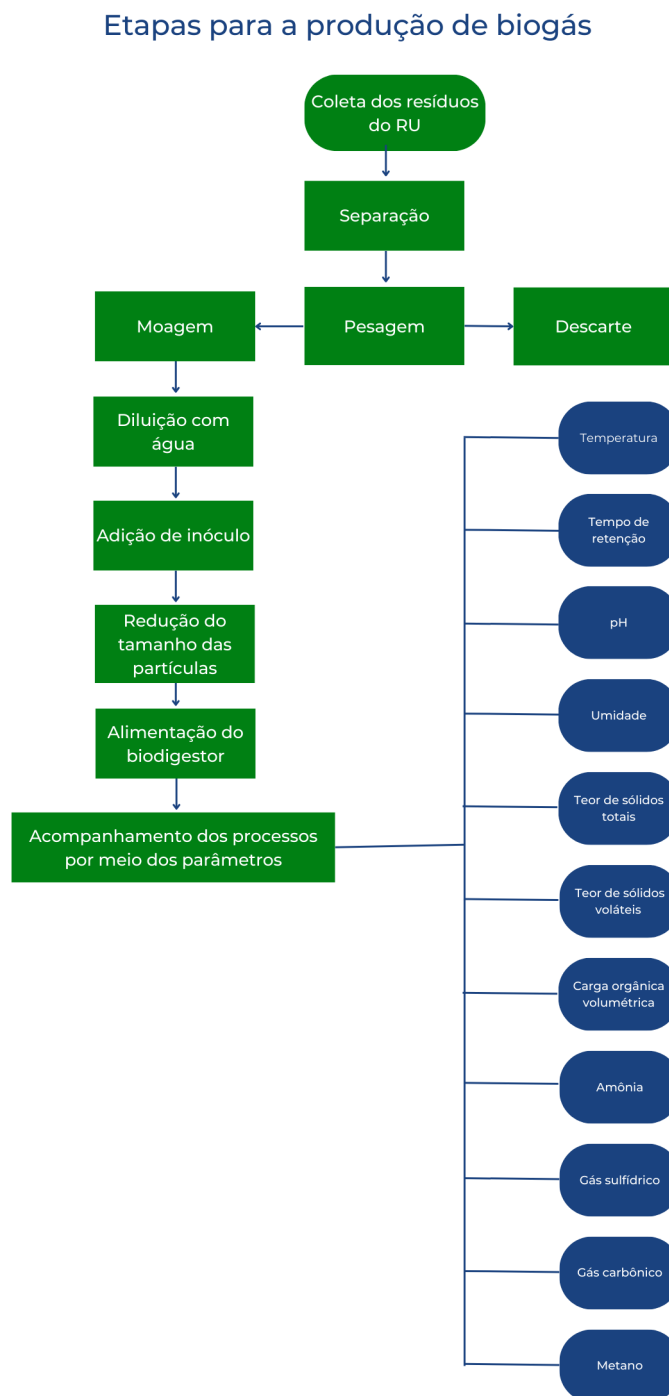


Figura 4 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para a produção de biogás.
Fonte: Elaboração própria.

3.1 Biodigestor

Esse trabalho teve início após a construção de um biodigestor realizada em trabalhos paralelos e que, inicialmente, foi o equipamento escolhido para acompanhamento dos parâmetros para produção de biogás. O processo de aquisição de materiais, montagem do equipamento e realização de atividades como substituição de componentes, testes de

vazamento, vedação e ajustes do equipamento ocorreu entre junho de 2022 a março de 2023, onde foi realizada a primeira batelada.

O biodigestor construído é constituído por uma bombona plástica de 200 litros (câmara de fermentação) onde o material orgânico é armazenado. Também possui uma entrada para o substrato, uma saída para o biogás e uma saída para o digestato. O biogás é armazenado dentro do sistema (não possui gasômetro), quando ocorre o aumento de pressão no interior câmara de fermentação o gás é deslocado para saída. O sistema é composto ainda por dois sensores termopares para medição de temperatura, posicionados na parte inferior para medição da temperatura da biomassa em sua parte inferior e superior. A Figura 5 mostra o biodigestor e seus componentes.

Biodigestor

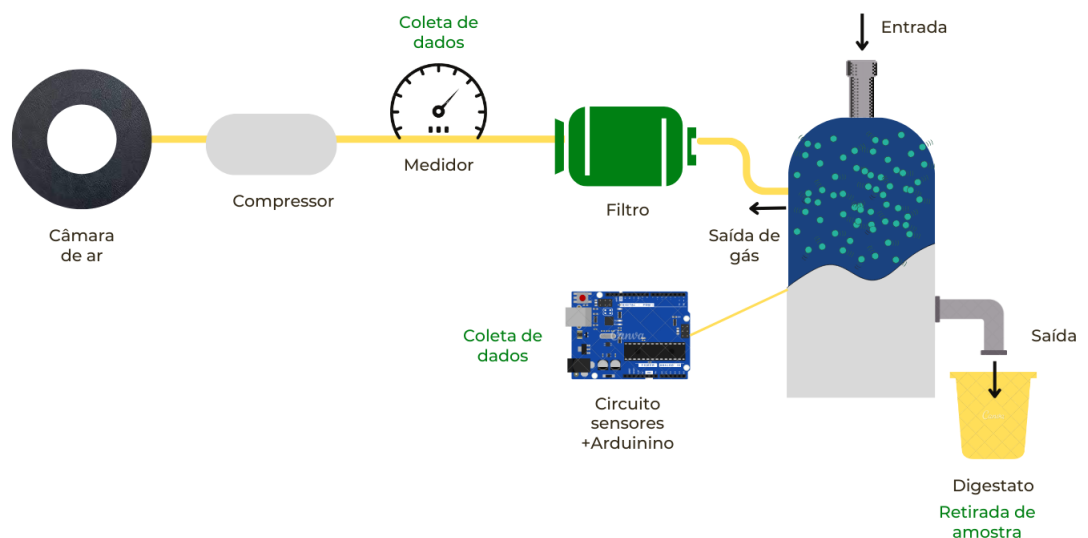


Figura 5 – Biodigestor e seus componentes.

Fonte: Elaboração própria.

A alimentação e a retirada do digestato são feitas manualmente e o substrato é diluído em água destilada para facilitar a entrada, evitar entupimentos e viabilizar a circulação do material no interior do biodigestor.

O segundo biodigestor construído é composto por 1 galão de água de 20 litros, com adaptação de uma válvula conectada para a saída de gás. Na parte superior foi colocado um balão (gasômetro) que infla à medida em que a produção de biogás ocorre. Para esse tipo de biodigestor foram realizadas seis bateladas que ocorreram entre o período de 30/08/2023 até 01/12/2023 e os resultados coletados para posterior análise.

3.2 Caracterização dos resíduos do RU

Os resíduos orgânicos utilizados no estudo, foram provenientes do descarte de alimentos do Restaurante Universitário da Universidade de Brasília (Figura 6), localizado no Módulo Esportivo e Serviços (MESP/FGA).



Figura 6 – Restaurante Universitário da Faculdade do Gama.
Fonte: [Universidade de Brasília \(2014\)](#)

Os resíduos coletados são produto da preparação das refeições (cascas de frutas e legumes, folhagens descartadas, carnes e restos alimentares) e na devolução de alimentos pelos usuários do restaurante (restos e sobras), que foram devidamente separados do lixo comum (guardanapos, embalagens e palitos).

3.2.1 Coleta

A coleta dos resíduos orgânicos produzidos pelo RU da FGA foi realizada em baldes de 100 litros (Figura 7). Os resíduos coletados corresponderam aos restos e sobras do café da manhã, almoço e jantar de até dois dias antes do manuseio para o início da biodigestão.



Figura 7 – Coleta dos resíduos no Restaurante Universitário.
Fonte: Elaboração própria.

3.2.2 Separação

A separação dos resíduos coletados foi feita manualmente, onde cascas de frutas e verduras e grandes pedaços de carne foram retirados para melhor controle do processo. As cascas das frutas por se tratarem de materiais lignocelulósicos, podem resultar em um processo de decomposição mais prolongado quando comparadas ao restante dos resíduos. Além disso, grandes pedaços de carne apesar de possuírem um grande potencial para a produção de biogás, podem causar obstruções ou disfunções no sistema, além de representarem desafios na etapa de trituração. Guardanapos, embalagens e palitos também foram devidamente separados e descartados (Figura 8).



Figura 8 – Separação dos resíduos.
Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Pesagem

A pesagem foi feita primeiramente após a coleta dos resíduos no restaurante, a fim de identificar a quantidade de material coletado. Essa etapa foi feita em uma balança para peso corporal, marca Omron modelo HN-289.

Após a separação, uma nova pesagem foi feita para identificar a quantidade de matéria orgânica a ser inserida no biodigestor.

3.2.4 Trituração

A preparação da biomassa envolveu a trituração em um triturador industrial marca Poli modelo LB-25. Para facilitar a trituração, foi feita a diluição do material em água destilada, numa proporção de duas partes de biomassa para cada parte de água (proporção de 2:1). Adicionalmente, foi introduzido um décimo (10%) do inóculo obtido previamente. A Figura 9 mostra o processo de trituração dos resíduos orgânicos.



Figura 9 – Trituração dos resíduos.
Fonte: Elaboração própria.

3.2.5 Alimentação

Para aprimorar a capacidade de produção de biogás, foram incorporadas mais duas fases ao procedimento: redução do tamanho das partículas e introdução de inóculo obtido a partir do primeiro ciclo de alimentação.

Para uniformizar a granulometria do substrato, atender as recomendações da literatura quanto a esse parâmetro e, dessa forma, aumentar a superfície de contato e facilitar o processo de biodigestão foi adquirida uma peneira ASTM 7/16, TYLER 0,441; abertura 11.200 mm.

Foi realizada ainda a adição de inóculo (Figura 10) à biomassa tratada utilizando o material recolhido e armazenado previamente, utilizando a matéria composta por microrganismos anaeróbicos que são previamente adaptados à decomposição da matéria orgânica, com o intuito de acelerar a atividade das bactérias metanogênicas no sistema. A Tabela 3 mostra o percentual de inóculo, água destilada e substrato utilizada no processo de biodigestão.



Figura 10 – Inóculo coletado em processo prévio.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 – Percentual de inóculo, água destilada e substrato utilizada.

| Total(%) | Biomassa (%) | Água destilada (%) | Inóculo(%) |
|----------|--------------|--------------------|------------|
| 100 | 60 | 30 | 10 |

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, os materiais orgânicos preparados foram introduzidos no biodigestor.

As alimentações 2 e 3 foram realizadas no mesmo dia. Para melhor acompanhamento do processo, a Alimentação 3 foi usada como controle para produção de biogás, ou seja, a Alimentação foi iniciada e as análises dos parâmetros foram realizadas apenas no final do processo, ao contrário da Alimentação 2 onde foram retiradas amostras semanalmente, tanto da matéria orgânica biodigerida quanto de gás.

Dessa forma, na Alimentação 3 o biogás foi produzido de forma ininterrupta. Assim, todas as amostras de biogás e de substratos foram recolhidas do biodigestor da Alimentação 2.

Da mesma forma, as alimentações 5 e 6 foram realizadas no mesmo dia. Para melhor acompanhamento do processo, a Alimentação 5 foi usada como controle para

produção de biogás e a Alimentação 6 produziu biogás de forma ininterrupta. Assim, todas as amostras de biogás e de substratos foram recolhidas do biodigestor da Alimentação 5.

Em todas as alimentações, foram utilizados 70% do volume do biodigestor. Como não se sabia se o volume de biogás produzido seria considerável e constante, para garantir que a pressão interna do biodigestor não aumentasse e, por medida de segurança, foram estipulados esses percentuais para utilização do volume útil do biodigestor.

3.3 Acompanhamento de parâmetros

3.3.1 Temperatura

Durante o processo de biodigestão feito no biodigestor de 200 litros, a temperatura foi acompanhada através de dois sensores: T1 e T2, onde a primeira temperatura (T1) se dá pelo termopar na camada mais baixa e a segunda temperatura (T2) se dá pelo termopar na camada mais alta.

Para o processo de medição foi conectado o circuito dos sensores ao computador através de um cabo USB, onde com o auxílio do programa Arduino IDE foi feita a coleta dos dados dos sensores. A coleta de dados ocorreu de segunda a sábado, sendo feita preferencialmente entre o período de 12h às 15h.

3.3.2 Análise de umidade

O teor de umidade (%W) foi determinado de acordo com a metodologia da [World Health Organization \(1978\)](#), no qual, uma amostra úmida (Mh) foi pesada em uma balança analítica (SHIMADZU ATX224) em cápsulas de porcelana previamente taradas (Figura 11), em seguida colocada em estufa (MARCONI MA 033) a temperatura de 65°C por um período de 2 horas, até atingir peso constante.



Figura 11 – Amostras preparadas para a análise de biomassa.
Fonte: Elaboração própria.

Após a estabilização, a cápsula com a amostra seca (Ms) foi levada a um dessecador com sílica gel e mantido sob vácuo para resfriamento antes da sua pesagem em balança analítica. O cálculo do teor de umidade foi realizado utilizando-se a Equação 2.3. As análises de teor de umidade foram realizadas em duplicata nos substratos. Para o cálculo de percentual de umidade, foi utilizado o método de determinação do resultado de medições indiretas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

3.3.3 Análise de sólidos totais (ST)

O teor de sólidos totais foi calculado de acordo com a Equação 2.4, utilizando o teor de umidade calculado anteriormente.

3.3.4 Análise de sólidos voláteis (SV)

A análise de sólidos voláteis foi realizada segundo [World Health Organization \(1978\)](#) e [American Public Health Association \(1995\)](#). Uma amostra de 3g de substratos secos a 105°C (M1), foram pesados na balança analítica em cadinhos de porcelana (previamente tarados) e levados para calcinação em um forno mufla por 2h, a 550°C para obter a amostra calcinada (M2).

Após este período, o cadinho com a amostra calcinada (M2) foi levado a um dessecador com sílica gel e mantido a vácuo para resfriamento antes de sua pesagem. Foi realizado uma quantidade mínima de 4 medições de massa (com intervalos de 30 minutos entre as medições) para cada amostra de substrato para verificação de estabilização da massa. A concentração de sólidos voláteis foi calculada pela Equação 2.5. Para o cálculo do teor de sólidos voláteis, foi utilizado o método de determinação do resultado de medições indiretas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

3.3.5 Análise de pH

A análise do pH do substrato foi feita a partir de amostras coletadas no biodigestor aproximadamente a cada uma ou duas semanas. O material foi armazenado em recipientes de plástico.

Para as medições de pH, foi utilizado um pHmetro digital modelo edge, da empresa Hanna Instruments, equipado com um sensor de pH devidamente calibrado usando soluções-tampão com pH 4,0 e 7,0. A figura 12 mostra parte do procedimento feito para aferição. Todos os testes foram conduzidos em triplicata.



Figura 12 – Quantificação de pH.
Fonte: Elaboração própria.

Para determinar o erro das medições foi utilizado o erro máximo do equipamento, no valor de $\pm 0,01$.

De acordo com Almeida (2020), existem diversas formas de favorecer a produção do metano, pois, mesmo que espontâneas, e o aumento de temperatura não favorecendo os produtos, há a possibilidade de inserir os reagentes no meio. Como exemplo a utilização do bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$), como uma forma de alcalinizar a solução, onde o íon bicarbonato é liberado aumentando a concentração dos reagentes, deslocando a equação no sentido dos produtos e potencializando o metano.

Dessa forma, para minimizar os efeitos e viabilizar a etapa de metanogênese foi adicionada uma solução de $NaHCO_3$ de acordo com a metodologia aplicada por Almeida (2020), sendo $3,0 g.L^{-1}$ às Alimentações 2 e 5 e $3,5 g.L^{-1}$ nas Alimentações 3 e 6, porém o pH não se manteve superior a 6,94.

Uma nova tentativa foi realizada com solução de concentração variável de hidróxido de sódio – $NaOH$ (1 a 5M), onde foram conduzidos ensaios envolvendo a utilização de hidróxido de sódio como substituto do bicarbonato de sódio para a neutralização do pH em uma das amostras de biomassa retirada. Para este propósito, foi preparada uma amostra padronizada de 50g de biomassa, onde uma solução de $NaOH$ em forma de escamas solubilizada em água, foi adicionada.

Em todas as tentativas observou-se que a adição de $NaOH$ não causou alteração significativa no pH da biomassa, onde devido a quantidade de substrato seria necessário um volume grande dessa solução para elevar o pH o que seria inviável dentro das condições do projeto.

3.3.6 Análise de biogás

Para iniciar a medição, foi colhida uma amostra inicial para limpar o bag. Essa limpeza é feita para retirar tudo e qualquer tipo de contaminação e deve ser abrir a válvula do biodigestor e a válvula do bag para circulação do gás.

A análise foi feita através do equipamento Biofoto da marca ALFAKIT da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (Figura 13).

Os componentes do kit analisador de biogás: 1 caixa de transporte, 2 amostradores de gás- bag (Figura 14), 2 válvulas reservas, 1 seringa para amônia, 2 seringas de 5 ml, 1 seringa 10 ml, 2 seringas para gás carbônico, 1 seringa de vidro, 4 tubos de ensaio, 2 cubetas de plástico marcadas, 2 cubetas de plástico grandes, 1 suporte analisador de gás carbônico, 1 frasco de vaselina, 1000 ml de água Deionizada, 3 reagentes para determinação de amônia (15 ml cada), 2 reagentes para determinação de gás Sulfídrico (20 ml e 10 ml), 2 Soluções de pré-tratamento (20 ml 500 m), 5 tubos para Biofoto e 1 Biofoto.



Figura 13 – Equipamento Biofoto.



Figura 14 – Bag utilizado para armazenamento do biogás.

A seguir, são apontadas as análises feitas no gás obtido.

3.3.6.1 Determinação de Amônia (NH_3)

Primeiramente foram inseridos 5 ml de água ultra pura para o teste em branco e 5 ml para a amostra a ser analisada. Logo após, foram adicionadas duas gotas de Solução Pré- tratamento 1 do kit Alfabik no teste em branco e duas gotas da Solução

Pré-tratamento 1 na amostra. Os dois recipientes foram fechados e agitados por dois minutos.

Logo após, 5 ml foram coletados e transferidos para o recipiente do teste em branco. Em seguida foram transferidos 5 ml para seringa de amônia até o nível de solução. O restante da seringa foi preenchido com volume especificado com o gás a ser analisado que está no bag.

Foi feita mistura ainda com a seringa conectada ao bag, agitando o conjunto por dois minutos. Após o conteúdo foi transferido para o frasco para início da análise colorimétrica.

Em seguida foram colocadas três gotas de cada solução: Amônia Indotest 1, Amônia Indotest 2 e Amônia Indotest 3, agitando cada uma das amostras por dois minutos após a aplicação de cada solução.

Após um tempo de 10 minutos, o teste em branco foi inserido no equipamento biofoto para calibração. Após a calibração, foram feitas as medições com a amostra. O resultado é a concentração de amônia em ppmV - parte por milhão por volume. Para determinar o erro das medições, foi utilizado o erro máximo do equipamento (3%), de acordo com ALBERTAZZI e SOUSA (2008).

3.3.6.2 Determinação de ácido sulfídrico (H_2S)

Primeiramente foram inseridos 5 ml de água ultra pura para o teste em branco e 5 ml para a amostra a ser analisada. Logo após, foram adicionadas duas gotas de Solução Pré-tratamento 1 no teste em branco e duas gotas da Solução Pré-tratamento 1 na amostra. Os dois recipientes foram fechados e agitados por dois minutos.

Logo após, 5 ml foram coletados e transferidos para o recipiente do teste em branco. Em seguida foram transferidos 5 ml para seringa de 20 ml até o nível de solução. Logo após foi preenchido o restante da seringa ao volume especificado com o gás a ser analisado que está no bag.

Uma mistura foi feita ainda com a seringa conectada ao bag, agitando o conjunto por dois minutos. Posteriormente, o conteúdo foi transferido para o frasco para início da análise colorimétrica.

Para a análise colorimétrica, foram colocadas cinco gotas do reagente Sulfeto 1 e duas gotas do reagente Sulfeto 2, agitando cada uma das amostras por dois minutos após a aplicação de cada reagente.

Após aguardar por 10 minutos, o teste em branco foi inserido no equipamento biofoto para calibração. Após a calibração, foram feitas as medições com a amostra. O resultado é a concentração de gás sulfídrico em ppmV - parte por milhão por volume.

Para determinar o erro das medições, foi utilizado o erro máximo do equipamento (3%) de acordo com ALBERTAZZI e SOUSA (2008).

3.3.6.3 Determinação de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2)

Para determinação de gás carbônico foi transferida pequena quantidade da solução Pre-tratamento 2 para cubeta de plástico. Logo após, 5 ml da solução foram coletados e a seringa conectada ao suporte, transferindo a solução para a seringa plástica de CO_2 .

Em seguida, o amostrador de biogás foi conectado no suporte (Figura 15), abrindo a válvula e transferindo o gás para a seringa de vidro. Em seguida a válvula da seringa e a válvula do amostrador foram fechadas.

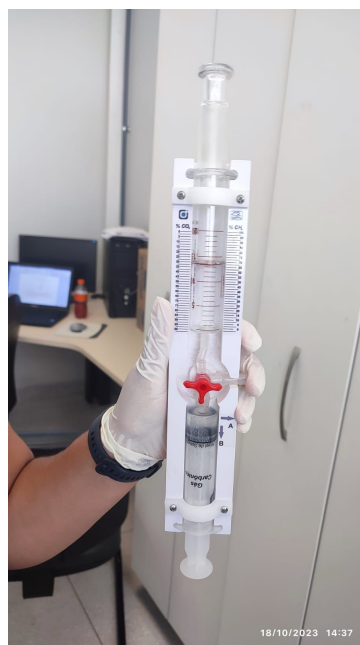


Figura 15 – Suporte para determinação de gás carbônico.

Fonte: Elaboração própria.

O gás da seringa de vidro foi transferido para a seringa de plástico, deixando a válvula aberta. Logo após a transferência, o mostrador foi desconectado. A solução não pode ser transferida para a seringa de vidro.

A mistura foi agitada por dois minutos. Logo após, o suporte foi posicionado na posição vertical com a seringa de plástico para baixo, a conexão entre as seringas foi aberta e todo o gás da seringa pra plástico foi transferido para a seringa de vidro, empurrando o embolo da seringa de plástico. Ao final do processo, a conexão foi fechada e a leitura do volume de gás carbônico e de metano foi feita. A leitura da porcentagem de CO_2 é feita diretamente na escala do suporte. A porcentagem de CH_4 presente na amostra é equivalente a diferença da porcentagem de CO_2 .

4 Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos desde as análises das quantidades de resíduos coletados e aproveitados em diferentes alimentações, as análises da biomassa antes, bem como os parâmetros estudados e dados relacionados a medições dos gases (CH_4 , H_2S , CO_2 , NH_3). Os resultados fornecem uma visão abrangente de todo o processo. Foi avaliado também o desempenho dos dois biodigestores, onde foram realizadas seis alimentações em batelada, sendo uma no biodigestor de 200 litros e cinco no de 20 litros.

A Tabela 4 mostra a quantificação dos resíduos coletados no RU. É possível observar um aproveitamento de 32,66% na Alimentação 1, 14,75% na Alimentação 2, 14,24% na alimentação 3, 13,13% na Alimentação 5 e 13,71% na Alimentação 6. A Alimentação 4 obteve o maior aproveitamento da biomassa coletada, com 66,89%. O maior aproveitamento da biomassa residiu no fato de que foram encontrados menos materiais inertes ao processo de digestão anaeróbia.

Tabela 4 – Quantificação dos resíduos aproveitados do Restaurante Universitário.

| Alimentação | Tipo | Volume do biodigestor (l) | Resíduos coletados (kg) | Resíduos aproveitados (kg) | Porcentagem de aproveitamento (%) |
|--------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1 | Batelada | 20 | 24,8 | 8,1 | 32,66 |
| 2 | Batelada | 20 | 59,0 | 8,7 | 14,75 |
| 3 | Batelada | 20 | 59,0 | 8,4 | 14,24 |
| 4 | Batelada | 200 | 44,1 | 29,5 | 66,89 |
| 5 | Batelada | 20 | 67,8 | 8,9 | 13,12 |
| 6 | Batelada | 20 | 67,8 | 9,3 | 13,71 |

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 5 mostra a proporção de biomassa, água e inóculo realizada em cada alimentação, onde foram estipuladas os percentuais de biomassa, água e inóculo de acordo com a Tabela 3. As alimentações 2 e 3 e 4 e 5 foram realizadas no mesmo dia.

Tabela 5 – Proporção de biomassa, água e inóculo utilizada em cada alimentação.

| Alimentação | Data | Biomassa (kg) | Água (l) | Inóculo (l) |
|-------------|------------|------------------|----------|-------------|
| 1 | 30/08/2023 | 8,40 | 4,2 | 1,40 |
| 2 | 11/10/2023 | 8,70 | 4,20 | 1,40 |
| 3 | 11/10/2023 | 8,40 | 4,20 | 1,40 |
| 4 | 25/10/2023 | 29,5 | 14,75 | 4,90 |
| 5 | 10/11/2023 | 8,4 | 4,20 | 1,4 |
| 6 | 10/11/2023 | 8,40 | 4,20 | 1,40 |

Fonte: Elaboração própria.

4.1 Estimativa do potencial de biogás produzido com os resíduos coletados

Analisando os resíduos coletados do RU, é possível estimar o potencial de biogás que poderia ser produzido a partir desses resíduos. Em média, foram coletados 53,75 kg de resíduos do RU. Contudo, é crucial ressaltar que esse número pode variar de acordo com o calendário acadêmico da universidade (férias, recessos, feriados e períodos de avaliação) e o cardápio oferecido. Além disso, é relevante mencionar que uma parcela significativa dos resíduos gerados pelo RU é coletada e utilizada como alimentação para animais, de acordo com a administração do restaurante.

Segundo a Agência Embrapa de Tecnologia e Informação (AGEITEC), para vegetais e resíduos orgânicos, a cada 1 kg de resíduos é possível produzir cerca de 0,04 m³ de biogás. Em termos teóricos, o potencial de geração de energia é baseado na produção diária de biogás, na qual cerca de 1m³ pode gerar cerca de 1,3 kWh (LIMA; TAVARES, 2017).

Dessa forma, considerando a média de 53,75 kg de resíduos alimentares coletados do RU, seria possível produzir 2,15 m³ de biogás. Em se tratando de potencial de geração de energia, seria possível gerar 2,795 kWh. Levando em consideração que essa estimativa foi feita apenas com parte dos resíduos gerados pelo restaurante, esses valores devem ser maiores.

4.2 Estimativa do volume de biogás produzido nos reatores

De acordo com Arruda et al. (2002), o volume do biogás pode ser determinado a partir da produção de metano pela biomassa no digestor. Considerando que 1m³ de biomassa produz 30m³ de metano (CH₄), é possível estimar o volume de biogás produzido. Dessa forma, se o biodigestor tiver um volume de 1m³, ele produzirá 30m³ de biogás.

Para o biodigestor de 200 litros ($0,2 \text{ m}^3$), foi considerado que 70% do volume do digestor é ocupado pela biomassa, portanto, um tambor de $0,2 \text{ m}^3$ terá aproximadamente $0,14 \text{ m}^3$ de material. O restante ($0,6 \text{ m}^3$), será ocupado com biogás processado pela biomassa. Assim, considerando que 1 m^3 de biomassa produz 30 m^3 de CH_4 , $0,14 \text{ m}^3$ de biomassa produziram $4,2 \text{ m}^3$ de biogás no digestor.

Da mesma forma, para o biodigestor de 20 litros ($0,02 \text{ m}^3$), foi considerado que 70% do volume do digestor é ocupado pela biomassa, portanto, um tambor de $0,02 \text{ m}^3$ terá aproximadamente $0,014 \text{ m}^3$ de material. O restante ($0,006 \text{ m}^3$), será ocupado com biogás processado pela biomassa. Assim, considerando que 1 m^3 de biomassa produz 30 m^3 de CH_4 , $0,014 \text{ m}^3$ de biomassa produziram $0,42 \text{ m}^3$ de biogás no digestor.

Embora tenha havido redução em dez vezes no volume do biodigestor, é possível que o equipamento de 20 litros não tenha produzido o volume estimado, uma vez que na Alimentação 1 o medidor que estava conectado ao equipamento de 200 litros registrou cerca de $0,004 \text{ m}^3$ de gás, onde não se sabe ao certo se foi majoritariamente metano porque o teste de chama não apresentou queima. Tudo isso indica que a produção de biogás em ambos os equipamentos foi abaixo do estimado. Contudo, pode-se dizer que os biodigestores são viáveis, mas as condições de operação (temperatura, agitação, presença de diferentes inóculos, etc) devem ser aprimoradas para obtenção de bons resultados.

4.3 Avaliação dos parâmetros estudados

Ao longo da evolução do processo de biodigestão, foi feito o monitoramento dos parâmetros inerentes a esse processo.

Para a avaliação das características da biomassa (substrato) empregada: antes, durante e após a D.A. foram conduzidas análises de umidade, teor de sólidos totais, teor de sólidos voláteis e pH em amostras coletadas periodicamente. As coletas das amostras foram realizadas semanalmente, mas em alguns momentos o tempo de análise aumentou alguns dias. A amostra A0 refere-se à coleta efetuada no dia da alimentação inicial, seguida pela amostra A1, correspondente à próxima coleta, e assim sucessivamente ao longo do período de estudo.

A Alimentação 4 foi conduzida no biodigestor de 200 litros. Apesar de as medições iniciais que indicaram uma baixa vazão de gás gerado em alimentações realizadas anteriormente nesse reator, foi realizada uma nova tentativa. Esta tentativa adicional permitiu a coleta e análise do gás produzido.

Assim, a partir da Alimentação 1, foram realizadas análises semanais do biogás produzido, onde foram medidas a concentração de amônia e a concentração de gás sulfídrico, bem como a proporção de CH_4 e CO_2 no biogás.

A seguir estão apresentados os resultados do monitoramento dos parâmetros inerentes a esse processo.

4.3.1 Tempo de retenção hidráulica (TRH)

O tempo de retenção hidráulica - TRH tem papel importante no tratamento da biomassa e na formação de metabólitos intermediários importantes para os microrganismos durante a digestão anaeróbia. Então, se o processo de D.A. ocorrer fora do TRH ideal a produção de metabólitos intermediários (ácidos orgânicos, álcoois, amônia etc.) indesejáveis pode ocorrer. Se um processo de D.A. operar com longo TRH, esse tempo pode favorecer a morte de alguns tipos de microrganismos em função da ausência de nutrientes.

A Tabela 6 mostra a data inicial de cada alimentação e o tempo de retenção em dias.

Tabela 6 – Tempo de retenção hidráulica para cada alimentação.

| Alimentação | Data inicial | TRH (dias) |
|-------------|--------------|------------|
| 1 | 30/08/2023 | 15 |
| 2 | 11/10/2023 | 21 |
| 3 | 11/10/2023 | 21 |
| 4 | 25/10/2023 | 36 |
| 5 | 10/11/2023 | 21 |
| 6 | 10/11/2023 | 21 |

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a Tabela 6 observa-se que o TRH para a Alimentação 4 foi o maior quando comparado às demais alimentações. É importante considerar que o tipo de substrato utilizado como biomassa influencia no TRH. Isso quer dizer, por exemplo, que carboidratos complexos e matéria lignocelulósica requerem longos TRH para que os microrganismos possam quebrar as moléculas e converter em biogás (GEF Biogás Brasil, 2020).

Vale ressaltar ainda que no momento da separação dos resíduos sempre foi observada uma grande quantidade de arroz e cuscuz, cuja composição apresenta o amido que é um carboidrato complexo. Dessa forma, sugere-se que, provavelmente, houve uma quantidade maior de amido na composição dos substratos para a D.A da Alimentação 4. Por isso, o TRH foi superior às demais alimentações, cujo TRH foi dentro do esperado (15-30 dias) (ZHANG; LOH; ZHANG, 2018).

4.3.2 Temperatura

De acordo com GEF Biogás Brasil (2020) a atividade dos microorganismos e a produção de metano são diretamente relacionadas à temperatura de operação do processo

de digestão anaeróbia. Sendo assim, a maioria das arqueas metanogênicas atuam nas faixas de temperatura mesofílica (30-40 °C) e termofílica (50-60 °C). Isso sugere que se a digestão anaeróbia ocorrer em faixas de temperaturas inferiores a 30 °C ou mesmo se a temperatura diária variar muito ao longo do dia, as arqueas metanogênicas não atuarão de maneira eficiente na produção de biogás, uma vez que a instabilidade térmica no interior do biodigestor não viabilizará esse processo (MROSSO; MECHA; KIPLAGAT, 2023).

O monitoramento e controle da temperatura foram realizados exclusivamente no biodigestor de 200 litros porque o mesmo estava equipado com o sistema de medição composto por dois termopares conectados ao sistema do Arduino. No caso do biodigestor de 20 litros, não foi viável instalar um sistema similar devido a dificuldades de implementação desse suporte para o tipo de reator, bem como dos equipamentos que estavam conectados ao biodigestor de 200 litros. Vale salientar que todas as medições foram realizadas entre o período de 12h às 15h, o qual registrou as temperaturas mais elevadas do dia.

A Tabela 7 mostra os valores de temperatura registrados pelos termopares para a Alimentação 4.

Tabela 7 – Médias semanais das medições de temperatura realizadas na Alimentação 4.

| Dias | Data de início | T1 | T2 |
|-------|----------------|-------|-------|
| 0-6 | 25/10/2023 | 34,51 | 34,70 |
| 7-13 | 01/11/2023 | 36,46 | 37,02 |
| 14-20 | 08/11/2023 | 40,66 | 41,30 |
| 21-26 | 15/11/2023 | 41,98 | 42,34 |

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a Tabela 7, observa-se que houve uma variação considerável de temperatura dentro do biodigestor ao longo da alimentação ocorrida, e isso é justificado pelo fato do Distrito Federal, ao longo do ano, apresentar grande amplitude térmica, onde a temperatura média diária varia de 12,9 a 28,3°C (INPE, 2023) ao ano. Esse é um indicativo de que as temperaturas registradas contribuíram sobremaneira para a baixa produção de biogás. Foi observado ainda que mesmo com a variação de temperatura apresentada, as temperaturas registradas enquadram-se na faixa de temperatura mesofílica, porém com instabilidade térmica.

Adicionalmente, pode-se inferir também que em períodos de temperaturas amenas a produção de biogás foi desfavorecida, uma vez que se encontravam abaixo da faixa de temperatura mesofílica.

Um outro fator a ser considerado é que com a atividade biológica dos microrganismos durante a D.A. em temperaturas maiores, o tempo de degradação da matéria orgânica é menor. Ou seja, quanto mais baixa a temperatura, maior deve ser o tempo em que o material orgânico permanece dentro do reator.

Então, a temperatura foi um dos parâmetros que colaborou para um elevado tempo de retenção na Alimentação 4, conforme mostra a Tabela 7. Dessa forma, não houve possibilidade de ambientação dos microrganismos ao meio de maneira permanente.

Em observância à Tabela 7, referente às médias semanais das medições de temperatura realizadas na Alimentação 4, foi observada uma temperatura um pouco maior do que as registradas em trabalhos anteriores. Isso se deve principalmente por conta da onda de calor constante que ocorreu no último mês no DF, onde pode ter havido estabilidade térmica dentro do biodigestor, favorecendo uma maior temperatura e a produção de biogás.

Vale destacar ainda que a T1 é a temperatura medida pelo termopar em contato com o substrato na parte inferior do reator e a T2 é a medida pelo termopar em contato com a parte superior do reator. Observa-se pelos dados da Tabela 7 que esses valores foram próximos, variando pouco e sempre dentro da mesma ordem de grandeza. Isso quer dizer que a temperatura no interior do biodigestor é constante, e que uma vez que seja bem controlada pode haver produção de biogás considerável.

É importante considerar também que mesmo não tendo havido possibilidade de registrar as temperaturas nas Alimentações de 1 a 6 (com exceção da 4), é muito provável que tenha ocorrido a mesma variação de temperatura nessas alimentações, a qual foi constatada em trabalhos anteriores. Também é provável que as alimentações 5 e 6 tiveram os resultados satisfatórios devido a onda de calor constante que ocorreu durante o período no DF, favorecendo a estabilidade térmica dentro do biodigestor e a produção de biogás.

4.3.3 pH

O pH é mais um parâmetro relevante e que afeta diretamente a atividade enzimática dos microrganismos envolvidos na D.A. A atividade das bactérias acidogênicas e acetogênicas ocorre preferencialmente em pH inferior à 4,5, mas pode ocorrer de forma aceitável em pH superior a 5,0, pois estas bactérias são menos sensíveis ao pH (GEF Biogás Brasil, 2020).

A Tabela 8 mostra os resultados de pH obtidos para as alimentações de 1 a 9, onde verifica-se que esse parâmetro se manteve na faixa de 3,61 a 6,94 para todas as amostras analisadas (antes, durante e após a D.A.) nas 9 alimentações. Esses resultados confirmam que as etapas de acidogênese e acetogênese prevaleceram no processo de D.A e, certamente, ocorreu o acúmulo de ácidos orgânicos e álcoois no interior do biodigestor e estes não foram consumidos na etapa de metanogênese para produção de metano, uma vez que as reações de metanogênese ocorrem em pH superior a 6,2 e assim, o pH volta à neutralidade (GEF Biogás Brasil, 2020).

É importante salientar que os resíduos alimentares são uma mistura complexa de

Tabela 8 – Resultados de pH obtidos nas amostras coletadas das alimentações de 1 a 9.

| Alimentação | Amostra | Data | Dia | pH |
|-------------|---------|------------|-----|-------------|
| 1 | 0 | 30/08/2023 | 0 | 4,62 ± 0,01 |
| | 1 | 13/09/2023 | 14 | 3,96 ± 0,01 |
| 2 | 0 | 11/10/2023 | 0 | 4,92 ± 0,01 |
| | 1 | 19/10/2023 | 8 | 4,11 ± 0,01 |
| | 2 | 27/10/2023 | 16 | 4,12 ± 0,01 |
| | 3 | 31/10/2023 | 20 | 4,18 ± 0,01 |
| 3 | 0 | 11/10/2023 | 0 | 4,80 ± 0,01 |
| | 1 | 31/10/2023 | 20 | 4,13 ± 0,01 |
| 4 | 0 | 25/10/2023 | 0 | 6,94 ± 0,01 |
| | 1 | 01/11/2023 | 7 | 4,07 ± 0,01 |
| | 2 | 08/11/2023 | 14 | 4,18 ± 0,01 |
| | 3 | 16/11/2023 | 22 | 4,12 ± 0,01 |
| | 4 | 20/11/2023 | 26 | 4,09 ± 0,01 |
| 5 | 0 | 10/11/2023 | 0 | 4,92 ± 0,01 |
| | 1 | 16/11/2023 | 6 | 4,07 ± 0,01 |
| | 2 | 24/11/2023 | 14 | 3,97 ± 0,01 |
| | 3 | 01/12/2023 | 21 | 3,92 ± 0,01 |
| 6 | 0 | 10/11/2023 | 0 | 5,05 ± 0,01 |
| | 1 | 01/12/2023 | 21 | 4,01 ± 0,01 |

Fonte: Elaboração própria.

carboidratos e gorduras de cadeias grandes e, dependendo da composição desse substrato podem ser de difícil degradação. [Mrosso, Mecha e Kiplagat \(2023\)](#) afirmam que resíduos de arroz cozido podem colaborar para diminuir o pH do meio e, pelo fato de serem muito sensíveis os microrganismos que sintetizam os ácidos e álcoois, e estes são afetados, o que dificulta a etapa de metanogênese.

4.3.4 Umidade

O teor de umidade ótimo em um biodigestor deve compreender a faixa entre 60 a 90% do peso do conteúdo total, pois esta alta faixa de umidade pode facilitar a D.A. e aumentar a geração de biogás. No entanto, é possível que essa faixa seja mais baixa a depender do tipo de substrato a ser utilizado, pois se o mesmo apresentar elevado teor de umidade, essa faixa pode ser diminuída ([LUCENA, 2016](#) apud [ANDREOLI; BOUALLA-GUI, 2003, 2004](#)).

Com base nos dados obtidos foi observado alto teor de umidade em algumas alimentações, o que em alguns casos pode ser considerado benéfico para o processo de biodigestão. Para [Santos \(2019\)](#), os resultados obtidos indicaram que os substratos obtidos em seu estudo (bagaço de laranja, casca de maracujá e bagaço de caju) contém elevado teor

de umidade e sólidos voláteis favoráveis para a D.A., sendo em geral, recomendada a faixa de teor de umidade para a digestão anaeróbia acima de 80%. Contudo, valores elevados no teor de umidade em algumas amostras podem indicar possível presença de água em excesso na biomassa, o que pode afetar o desempenho do processo de biodigestão, ou seja, a umidade excessiva pode ser prejudicial à atividade dos microrganismos por causa do estímulo a atividade fermentativa, que pode ocasionar o acúmulo de ácidos e, consequentemente, a acidificação do pH (LUCENA, 2016 apud CHIAN; ALVES; MAYER, 1977, 2008, 2013).

Por outro lado, a escassez da umidade dificulta o transporte e a distribuição dos microrganismos em toda a massa do substrato (LUCENA, 2016 apud LEITE et al., 2009).

Os dados de umidade encontrados para as 6 alimentações indicam que os teores de umidade apresentaram, em sua maioria, valores acima de 100%, indicando umidade excessiva, corroborando os valores de pH determinados, uma vez que foi constatada a presença de ácidos e, possivelmente, o acúmulo destes no interior do biodigestor. Para as Alimentações 2 e 3 os teores de umidade foram abaixo do teor de umidade considerado ótimo, ou seja, pode ter havido escassez de umidade e dificuldade no transporte e distribuição dos microrganismos em todo o substrato. Por outro lado, a Alimentação 1 apresentou teores de umidade acima de 70%, sugerindo que nos períodos em que essas amostras foram coletadas houve produção de biogás, mesmo que em pequena quantidade.

As alimentações 1, 4 e 5 apresentaram alto teor de umidade (acima de 100%), indicando umidade excessiva, o que pode gerar uma redução na eficiência da produção do biogás.

4.3.5 Teor de sólidos Totais (ST)

O teor de sólidos totais é caracterizado pela quantidade de sólido disponível no substrato (matéria-prima/biomassa) após a vaporização da água contida nele.

O teor de sólidos totais presentes no substrato é influenciado pelo teor de umidade, sendo este acima de 40%, em um biodigestor pode levar a estagnação da digestão em decorrência da escassez de água necessária para o crescimento dos microrganismos. Quando se tem em um processo menos que 15% de sólidos totais, ocorrerá a diluição de diversos inibidores que afetam as metanogênicas sendo esta uma grande vantagem (LUCENA, 2016).

Segundo D'Aquino (2018), para restos de alimentos, a média encontrada na literatura é de $24,7 \pm 2,1\%$ de sólidos totais. Para Mata-Alvarez (2003), em geral, a faixa recomendada para sólidos totais está entre 10% e 15%. Dessa forma, é possível afirmar que algumas das medidas realizadas encontram-se em discordância com a literatura, ultrapassando o limite máximo recomendado e indicando provavelmente que o sistema

apresentou-se muito acidificado, resultado esse concordante com o pH observado em todas as alimentações.

Com base nos resultados obtidos foi observado que em nenhuma alimentação o teor de sólidos totais foi inferior a 15%. Para a Alimentação 1 o teor de sólidos totais foi em média acima de 40%, indicando uma possível estagnação da D.A.

As Alimentações 5 e 6 cujo teores de umidade foram abaixo do teor de umidade considerado ótimo, obtiveram ST variando de 40,40% a 54,47%. Por outro lado, as Alimentações 1, 4, 5 e 6 apresentaram teores de ST muito diferentes do limite recomendado, sugerindo a estagnação do processo.

4.3.6 Teor de sólidos voláteis (SV)

Os resíduos alimentares costumam apresentar elevados teores de SV, na faixa de 75 a 95%, indicando uma presença significativa de materiais passíveis de degradação (MROSSO; MECHA; KIPLAGAT, 2023).

Os dados de sólidos voláteis encontrados para as alimentações 1 e 2 indicam que os teores de sólidos voláteis apresentaram valores acima de 81,4% em algumas amostras, confirmando a alta biodegradabilidade dos substratos. Nas demais alimentações foram verificados teores de sólidos voláteis acima de 100%, o que indica uma maior eficiência na produção de biogás.

Dessa forma, observa-se alto teor de sólidos voláteis nas alimentações, o que em alguns casos pode ser considerado benéfico para o processo de biodigestão, porém o alto teor de sólidos voláteis pode não necessariamente ser transformado em alto rendimento de biogás, pois há a existência de sólidos voláteis inadequados do material de lignina (YAVINI; CHIA; JOHN, 2014).

4.3.7 Carga orgânica volumétrica (COV)

A COV influencia diretamente a dinâmica dos processos bioquímicos dentro do biodigestor. A determinação da COV ideal depende do tipo de biomassa, do TRH desejado, do tipo de reator e da temperatura de operação. Dessa forma, a Tabela 9 apresenta a Carga Orgânica Volumétrica (COV) calculada (Equação 2.6) nas alimentações de 1 a 9.

A Tabela 9 mostra que foram encontrados valores relativamente altos para COV das amostras coletadas durante as alimentações. Em geral, a faixa recomendada de COV para a digestão anaeróbia situa-se entre 1,0 e 4,0 kg DQO (Demanda Química de Oxigênio) por metro cúbico de volume do reator por dia (D'AQUINO; MELLO; JR., 2017).

Observando os valores na tabela, as alimentações com os menores valores de COV

são: Alimentação 2, com COV = 64,10 kg DQO/m³.dia e Alimentação 6, Amostra 1: COV = 58,41 kg DQO/m³.dia, que são considerados ligeiramente altos comparados com os valores da literatura.

É importante destacar que a carga orgânica volumétrica está intrinsecamente ligada ao teor de sólidos totais voláteis (STV), cujo nível também foi identificado como elevado neste estudo.

Dessa forma, a carga orgânica é um fator que influencia consideravelmente na estabilidade do sistema. Uma COV alta pode indicar uma maior produção de biogás, mas também pode desencadear a acidificação do meio ou inibir a atividade dos microrganismos. Ainda segundo [Lucena \(2016\)](#), pode ocorrer uma diminuição da produção de metano com o aumento da carga orgânica, provavelmente em decorrência da concentração de amônia no meio.

Tabela 9 – Carga Orgânica Volumétrica (COV) calculada nas alimentações de 1 a 9.

| Alimentação | Amostra | COV (kg DQO/m ³ .dia) |
|-------------|---------|----------------------------------|
| 1 | 0 | 65,14 |
| | 1 | 65,33 |
| 2 | 0 | 65,14 |
| | 1 | 64,10 |
| | 2 | 65,14 |
| | 3 | 64,10 |
| 3 | 0 | 66,34 |
| | 1 | 64,10 |
| 4 | 0 | 66,34 |
| | 1 | 66,37 |
| | 2 | 66,34 |
| | 3 | 66,37 |
| | 4 | 66,57 |
| 5 | 0 | 66,37 |
| | 1 | 66,57 |
| | 2 | 66,02 |
| | 3 | 66,57 |
| 6 | 0 | 66,02 |
| | 1 | 58,41 |

Fonte: Elaboração própria.

4.3.8 Análise de biogás

A Tabela 10 apresenta a concentração de amônia NH_3 , concentração de ácido sulfídrico H_2S e a proporção de CO_2 e CH_4 no biogás.

Tabela 10 – Resultados obtidos nas análises de gás realizadas nas alimentações de 1 a 6.

| Data | Alimentação | NH_3 (ppmV) | H_2S (ppmV) | CH_4 (%) | CO_2 (%) |
|------------|-------------|---------------|---------------|------------|------------|
| 04/09/2023 | 1 | 11,03 ± 0,33 | 286,09 ± 8,58 | 50 | 45,5 |
| 18/10/2023 | 2 | 20,42 ± 0,61 | 73,45 ± 2,20 | 70 | 30 |
| 27/10/2023 | 2 | 59,80 ± 1,79 | 128,90 ± 3,86 | 53 | 55 |
| 31/10/2023 | 2 | 111,91 ± 3,35 | 4,62 ± 0,13 | 65 | 35 |
| 31/10/2023 | 3 | 133,01 ± 3,99 | 129,02 ± 3,87 | 35 | 65 |
| 31/10/2023 | 4 | 36,93 ± 1,10 | 84,87 ± 2,54 | 60 | 40 |
| 08/11/2023 | 4 | 19,86 ± 0,57 | 51,81 ± 1,55 | 80 | 20 |
| 16/11/2023 | 4 | 43,819 ± 1,31 | 97,16 ± 2,91 | 70 | 30 |
| 20/11/2023 | 4 | 25,88 ± 0,77 | 6,66 ± 0,19 | 80 | 20 |
| 16/11/2023 | 5 | 82,28 ± 2,46 | 94,50 ± 2,83 | 65 | 35 |
| 24/11/2023 | 5 | 18,20 ± 0,54 | 46,84 ± 1,40 | 60 | 30 |
| 01/12/2023 | 5 | 39,94 ± 1,19 | 71,21 ± 2,14 | 95 | 5 |
| 01/12/2023 | 6 | 50,24 ± 1,50 | 19,07 ± 0,57 | 70 | 30 |

Fonte: Elaboração própria.

A seguir, são discutidos os resultados da concentração de amônia NH_3 , concentração de ácido sulfídrico H_2S e a proporção de CO_2 e CH_4 no biogás.

4.3.8.1 Amônia (NH_3)

A amônia é um nutriente essencial para o crescimento dos microrganismos anaeróbios, mas também pode ser tóxica em concentrações elevadas (acima de 100 ppmV). A fermentação de materiais ricos em ureia e proteínas produz amônia. Em função do pH e temperatura do meio reacional, pode-se ter uma geração elevada de amônia livre (KUNZ et al., 2022).

A Tabela 10 mostra a concentração de amônia obtida nos testes de biogás.

Altos valores de NH_3 podem influenciar negativamente o processo, afetando a saúde dos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbica. A maior concentração de amônia foi registrada na Alimentação 3, com um valor de 133,01 ppmV, e a menor concentração de amônia foi registrada na Alimentação 1, com um dos valores listados de 11,03 ppmV.

Para a Alimentação 1, a concentração de amônia aumentou ao longo do tempo, visto que o valor na Amostra 1 (60,88 ppmV) é maior do que na Amostra 0 (11,03 ppmV).

Para a Alimentação 2, a concentração de amônia também aumentou ao longo do tempo. Os valores de NH_3 foram crescentes da Amostra 1 (20,42 ppmV) para a Amostra 3 (111,91 ppmV).

Para a Alimentação 4 e Alimentação 5, não há uma tendência clara de aumento ou diminuição ao longo do tempo. Os valores flutuaram entre as amostras.

Por fim, nas alimentações 2,3,5 e 6, onde as alimentações 2 e 5 eram de controle e as alimentações 6 e 9 produziram biogás de forma ininterrupta, foi observada uma maior concentração de amônia (NH_3) nas alimentações em que não foi feita a coleta semanalmente.

De acordo com Kunz, Oliveira e Piccinin (2007) a concentração ideal de NH_3 é aproximadamente de 100 ppmV, dessa forma os resultados obtidos se mostraram razoáveis levando em consideração o tipo de resíduos alimentares utilizados e as condições operacionais (temperatura, pH, etc) do sistema.

4.3.8.2 Gás sulfídrico (H_2S)

O H_2S é um gás indesejado em excesso, pois pode ser tóxico e influenciar negativamente na qualidade do biogás produzido. A Tabela 10 mostra a concentração de gás sulfídrico obtida nos testes de biogás, onde a maior concentração de gás sulfídrico foi registrada na Alimentação 1, com um valor de 286,09 ppmV e a menor concentração de gás sulfídrico foi registrada na Alimentação 2, na terceira amostra, com um valor de 4,62 ppmV.

Na Alimentação 1 a concentração de H_2S diminuiu consideravelmente da primeira amostra (286,09 ppmV) para a segunda amostra (78,09 ppmV). Na Alimentação 2 a concentração de H_2S variou ao longo das amostras. Inicialmente, houve uma diminuição de 73,45 ppmV para 4,62 ppmV na terceira amostra, o que representa uma redução significativa.

Na Alimentação 4 houve uma variação na concentração de H_2S , começando com 84,87 ppmV na primeira amostra, diminuindo para 6,66 ppmV na quarta amostra. Houve flutuações significativas nesses valores. Na Alimentação 5, assim como na Alimentação 4, houve flutuações na concentração de H_2S , variando de 94,50 ppmV na primeira amostra para 71,21 ppmV na terceira amostra.

Catapan, Catapan e Catapan (2010) afirmam que a composição de H_2S , responsável pela corrosão, deve ser baixa, pois quanto menor é sua concentração, melhor para aumentar a vida útil do processo, uma vez que em sistemas de produção de biogás, a presença de H_2S em níveis elevados pode causar danos aos equipamentos e às estruturas utilizadas no processo de produção e armazenamento de biogás.

De acordo com a Probiogás (2010), a concentração de H_2S tem um importante papel na qualidade da mistura gasosa. A concentração não pode ser elevada demais, pois já em reduzidas concentrações o sulfeto de hidrogênio é capaz de inibir o processo de digestão. O sulfeto de hidrogênio (H_2S), na forma não dissociada em solução age como citotoxina, sendo capaz de inibir o processo de digestão já a partir de concentrações de 50 mg/l. À medida em que o pH se reduz, aumenta a fração de H_2S livre, agravando o

risco de inibição.

De acordo com [Madigan et al. \(2006\)](#), as concentrações de gás sulfídrico no biogás podem chegar a concentrações superiores a 30.000 ppmV, dependendo do substrato processado. Este composto, durante o processo de combustão ao se oxidado, forma ácidos corrosivos. Geralmente, deve-se removê-lo a concentrações inferiores a 200 ppmV. Dessa maneira, as concentrações de H_2S alcançadas podem ser classificadas como aceitáveis dentro dos parâmetros estabelecidos para a qualidade do gás produzido.

4.3.8.3 Metano (CH_4) e Gás Carbônico (CO_2)

Os percentuais de CH_4 e CO_2 são indicadores essenciais da qualidade do biogás gerado. O metano é o componente principal e desejado do biogás, enquanto o dióxido de carbono pode variar dependendo das condições de processo e da eficiência da digestão. A Tabela 10 mostra os percentuais de CH_4 e CO_2 nas Alimentações de 1 a 6. Os dados mostram que em algumas alimentações houve um equilíbrio entre os gases desejados (maior presença de metano), o que é positivo para a produção de biogás de qualidade.

[Santos \(2019\)](#) encontrou, em termos composição de biogás, em todas as configurações estudadas, elevada percentagem de metano (58% a 71%), atestando a efetividade do processo de digestão anaeróbia. Já o dióxido de carbono, para [Madigan et al. \(2006\)](#), geralmente apresenta concentrações de 25 a 40% no biogás bruto, o que reduz o conteúdo energético do gás devido ao seu efeito diluidor.

A Figura 16 mostra a porcentagem de metano e gás carbônico presentes nas alimentações de 1 a 9, onde foram verificadas alta porcentagem de CH_4 no biogás nas alimentações 4 e 5.

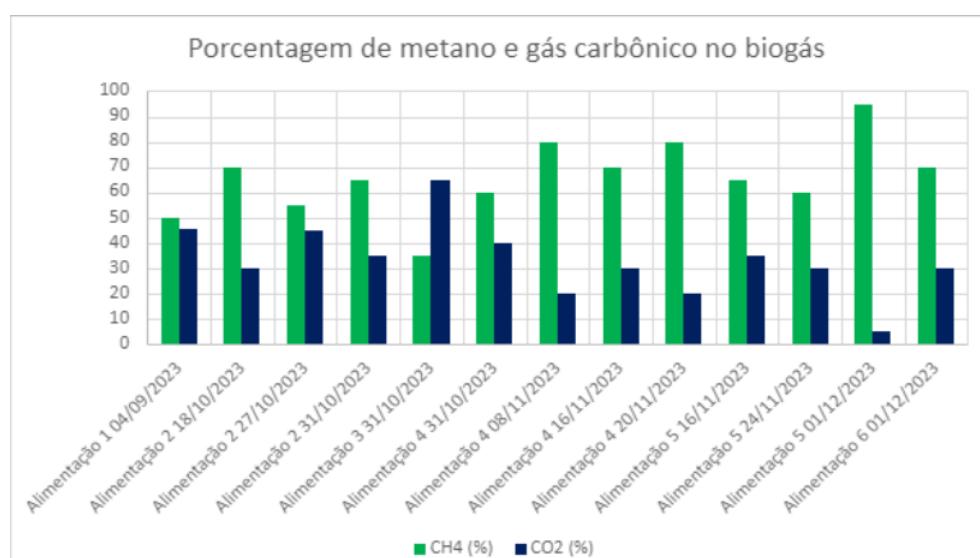


Figura 16 – Porcentagem de metano e gás carbônico presentes nas alimentações de 1 a 6. Fonte: Elaboração própria.

A Alimentação 2 apresentou uma variação significativa nos percentuais de CH_4 e CO_2 entre a primeira e a terceira semana. Isso sugere que pode ter ocorrido condições adversas ocasionadas por outros fatores que afetaram as condições de fermentação. A Alimentação 3 apresentou uma proporção de CH_4 menor do que as demais alimentações.

As alimentações 4 e 5 apresentaram uma proporção de CH_4 maior do que as demais alimentações. Isso pode ser devido ao fato de que ambos os processos tiveram menos exposições as variações de temperatura. De acordo com Probiogás (2010), a disponibilidade dos nutrientes para os microrganismos deve ser mantida em níveis ótimos. A quantidade de metano que pode ser obtida do substrato é determinada pelo seu teor de proteínas, gorduras e carboidratos. Esses fatores influenciam igualmente a necessidade específica de nutrientes. A Alimentação 6 apresentou uma proporção de CH_4 semelhante à da Alimentação 2.

A Figura 17 exibe a média da porcentagem de metano produzida nas diferentes alimentações. Notavelmente, a Alimentação 4, realizada no biodigestor de 200 litros, apresentou a maior proporção média de metano produzido (75%), seguida pela Alimentação 6 (70%), conduzida no biodigestor de 20 litros. Esses resultados sustentam a eficiência comprovada dos dois modelos construídos para a produção de biogás.

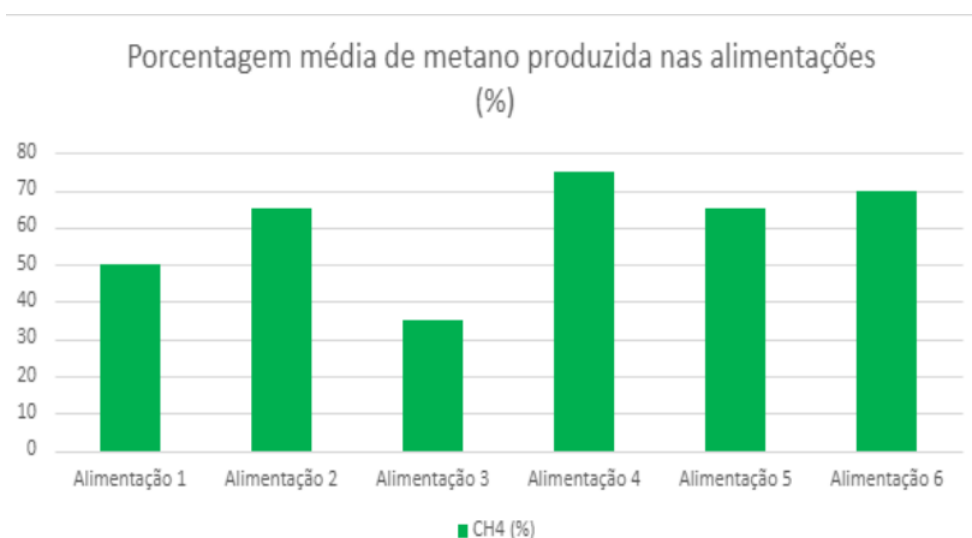


Figura 17 – Porcentagem média de metano produzida nas alimentações.
Fonte: Elaboração própria.

Durante a observação, foi notado que a produção de biogás é um processo dinâmico. Por exemplo, ao coletar amostras, foi percebido que as medições foram apenas de pequenos intervalos. Isso levanta a questão da representatividade dessas medidas. Essa produção é cumulativa ao longo do tempo, ocorrendo de maneira gradual. A coleta de amostras proporcionou uma visão pontual, mas ao longo dos dias, a produção se somou gradualmente.

Assim, ao analisar os resultados, é importante considerar a natureza pontual das medições. Por exemplo, variações como períodos de calor podem influenciar significativamente na produção de CH_4 . Em momentos de alta temperatura, foi percebido um aumento na produção de biogás, evidenciando a sensibilidade desse processo aos parâmetros ambientais, como a temperatura.

Embora tenha sido identificado que certos parâmetros, como a agitação manual dos recipientes, podem ter impactado nas medições, é essencial compreender que essas ações também podem ter influenciado os resultados. Porém, mesmo que algumas variáveis pareçam ter causado desvios nos dados, isso não invalida completamente a produção de metano observada.

Em resumo, ao analisar as variações nos resultados, é importante considerar a natureza dinâmica do processo de produção de biogás. As flutuações nos parâmetros e nas técnicas de coleta podem influenciar as medições pontuais, mas não descredibilizam o processo geral de produção de metano.

5 Conclusão

A investigação conduzida ofereceu uma visão abrangente do desempenho dos biodigestores construídos, demonstrando os resultados obtidos ao longo do processo de digestão anaeróbia. A análise abordou desde a quantidade de resíduos coletados e aproveitados em diferentes alimentações até a avaliação dos gases produzidos (CH_4 , H_2S , CO_2 , NH_3), a temperatura, o tempo de retenção e a proporção de biomassa, água e inóculo em cada alimentação.

Os dados obtidos na quantificação dos resíduos coletados do Restaurante Universitário revelaram uma variabilidade no aproveitamento da biomassa, com percentuais que oscilam entre 13,13% e 66,89%. Essa variação é atribuída à presença de materiais inertes no processo de digestão anaeróbia.

A análise dos resíduos provenientes da Restauração Universitária (RU) revelou um potencial significativo na geração de biogás, aproximadamente $2,15 \text{ m}^3$, a partir da média de $53,75 \text{ kg}$ de resíduos alimentares coletados. Este biogás, com uma capacidade estimada de produzir cerca de $2,795 \text{ kWh}$ de energia, representa uma valiosa oportunidade para a Universidade de Brasília empregar uma fonte de energia renovável e sustentável. Além de contribuir para a mitigação do impacto ambiental, o aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos alimentares não apenas oferece alternativas viáveis de geração de energia, mas também demonstra um compromisso com a gestão eficiente de resíduos e a promoção da sustentabilidade no ambiente universitário. Além disso, este potencial pode ser aproveitado para diversos usos, dentre eles: geração de energia elétrica, produção de calor, combustível para veículos, cozinha ou calefação residencial e fertilizante.

A estimativa do volume de biogás produzida nos reatores foi realizada analiticamente considerando a produção de metano pela biomassa no digestor. Esta estimativa proporcionou uma avaliação aproximada do volume de biogás produzido nos biodigestores de 200 e 20 litros ($4,2 \text{ m}^3$ e $0,42 \text{ m}^3$ respectivamente).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) exerceu um papel crucial no tratamento da biomassa, pois esse parâmetro influencia na formação de metabólitos intermediários durante a D.A.. Foi observada uma variação significativa no TRH entre as diferentes alimentações (21 a 36 dias), com destaque para a Alimentação 7, que apresentou TRH mais longo, possivelmente devido ao tamanho do reator.

Portanto, os resultados desta análise oferecem uma compreensão mais ampla do processo de digestão anaeróbia e evidenciam a importância de considerar a composição dos substratos, o tempo de retenção e a presença de materiais inertes para otimizar a eficiência do processo de produção de biogás em biodigestores. Estas descobertas podem

contribuir significativamente para o aprimoramento e desenvolvimento de estratégias mais eficazes no tratamento de resíduos orgânicos para a produção sustentável de biogás.

Já a avaliação dos demais parâmetros durante o processo de biodigestão revelou nuances significativas que afetaram diretamente a eficiência e a conclusão do processo em diferentes alimentações. A análise dos parâmetros como temperatura e pH foi crucial para entender a dinâmica do sistema e suas implicações na produção de biogás.

A temperatura, um fator crítico na atividade dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia, apresentou variações consideráveis ao longo das alimentações, em parte devido à amplitude térmica do Distrito Federal. A variação térmica afetou a produção de biogás, sendo observado que temperaturas mais amenas desfavoreceram essa produção, enquanto a estabilidade térmica favoreceu a mesma.

O pH, outro parâmetro relevante, manteve-se predominantemente na faixa ácida (3,61 a 6,94), indicando a prevalência das etapas de acidogênese e acetogênese. Isso evidenciou o acúmulo de ácidos orgânicos e álcoois no biodigestor, não consumidos na etapa de metanogênese devido ao pH abaixo do ideal para essa etapa. Durante as alimentações, foi observado que resíduos alimentares específicos, como resíduos de arroz cozido, podem impactar negativamente o pH, afetando a atividade dos microrganismos envolvidos na produção de biogás.

É evidente que a umidade desempenha um papel crucial, afetando diretamente a eficácia da digestão anaeróbica. Uma faixa de umidade entre 60% e 90% parece ser ideal, mas variações podem ser necessárias dependendo do substrato específico. Os valores extremos impactaram negativamente o processo, influenciando a produção de ácidos e, conseqüentemente, a acidificação do pH.

Da mesma forma, o teor de sólidos totais e voláteis também foi significativo. Altos teores de sólidos voláteis indicaram maior biodegradabilidade, mas nem sempre se traduzem em maior produção de biogás.

A carga orgânica volumétrica influenciou diretamente na estabilidade do sistema.

A presença de amônia e gás sulfídrico afetaram de certa forma a saúde dos microrganismos envolvidos na digestão e indicam que apesar das variações as concentrações de amônia e gás sulfídrico se mantiveram em níveis aceitáveis para um processo eficiente de biodigestão.

A proporção de metano e dióxido de carbono no biogás é um indicador da qualidade do processo, com uma alta porcentagem de metano sendo desejável. No geral, as alimentações mostraram altos percentuais de metano, o que caracteriza sucesso na qualidade do gás produzido.

Em suma, o processo de produção de biogás é um processo dinâmico e contínuo. As

flutuações nos parâmetros e nas técnicas de coleta podem afetar as medições específicas, mas não desacreditam o processo geral de produção de metano.

Dessa forma, a avaliação desses parâmetros foi essencial para compreender as dificuldades enfrentadas no processo de biodigestão, evidenciando a necessidade de controlar e ajustar variáveis como temperatura e pH para otimizar a produção de biogás. No entanto, desafios significativos persistem, especialmente relacionados à composição dos substratos, que demandam estratégias específicas para melhorar a eficiência do processo de biodigestão.

É importante ressaltar também que as variações nos parâmetros podem ser influenciadas por vários fatores, como composição do substrato, condições ambientais e até mesmo as práticas de coleta e análise. Portanto, ajustes personalizados e estratégias adaptadas podem ser necessários para otimizar a produção de biogás, levando em consideração a complexidade e as particularidades de cada sistema de biodigestão.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para trabalhos futuros oferecem um caminho promissor para melhorar o processo de biodigestão e a produção de biogás. Aqui está uma análise detalhada dessas sugestões:

Instalação de um sistema de controle de temperatura: A temperatura é um fator crítico para a atividade dos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbica. Um sistema de controle de temperatura pode manter as condições ideais para o crescimento e a atividade desses microrganismos, maximizando a eficiência do processo de biodigestão.

Realização de testes com a variação do percentual de substrato e água: A proporção entre o substrato e a água pode influenciar significativamente o desempenho da digestão anaeróbica. Experimentos com diferentes proporções podem revelar a combinação mais eficiente para a produção de biogás, ajudando a otimizar a relação entre os componentes.

Instalação de um sistema de agitação no biodigestor: Um sistema de agitação pode melhorar a homogeneidade do substrato, garantindo uma distribuição mais uniforme dos microrganismos e nutrientes. Isso pode aumentar a eficiência do processo e reduzir possíveis zonas mortas no biodigestor.

Adição de inóculos diferentes ao processo: A introdução de diferentes tipos de inóculos pode enriquecer a diversidade microbiana no sistema de biodigestão. Microrganismos específicos podem desempenhar papéis importantes na degradação de diferentes compostos, melhorando a eficácia do processo global.

Realização de codigestão com diferentes substratos: A combinação de diferentes

tipos de substratos pode criar sinergias benéficas para a produção de biogás. A codigestão pode aproveitar as características complementares de diferentes materiais orgânicos, aumentando a produção de biogás e a eficiência do processo.

Realizar a neutralização do substrato com carbonato de cálcio ($CaCO_3$) para os casos onde houver permanência de baixo pH: O pH desempenha um papel fundamental na eficiência da digestão anaeróbica. A neutralização do substrato com $CaCO_3$ pode ajudar a manter um pH adequado, evitando a acidificação e melhorando as condições para os microrganismos.

Essas sugestões oferecem uma abordagem abrangente para aprimorar o processo de biodigestão. No entanto, é importante realizar cada uma delas de forma controlada e monitorada, considerando as interações complexas entre os diferentes fatores e suas influências no sistema de biodigestão. Experimentos e testes iterativos podem ajudar a determinar a eficácia de cada sugestão e sua aplicabilidade específica ao contexto do processo de biodigestão em questão.

Referências

- ABILOGÁS. *Programa Nacional do Biogás e Biometano PNBB*. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 18.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. de.. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. [S.l.]: São Paulo: Manolo, 2008. v. 1 ed. Citado 3 vezes nas páginas 41, 44 e 45.
- ALMEIDA, C. E. D. *Importância do pH no equilíbrio químico de biodigestores anaeróbios*. 2020. Citado na página 42.
- ALVES, I. R. de F. S. *Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos*. 2008. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 53.
- American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th. ed. New York: American Public Health Association Inc., 1995. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 41.
- ANDREOLI, C. V. Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás. In: CASSINI, S. T. (Ed.). *Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. p. 204. Citado na página 52.
- AQUINO, C. A. L. C. S. F. D. *Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVS) em reatores anaeróbicos sob estresse: Causas e estratégias de controle*. 2005. Citado na página 21.
- ARAÚJO, A. P. C. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico*. 2017. Citado 5 vezes nas páginas 19, 22, 23, 25 e 26.
- ARRUDA, M. H. et al. *Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa*. 2002. Citado na página 47.
- BARCELOS, B. R. *Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos*. 2009. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 30.
- BARROS, R. *Biogás do Futuro e o Futuro do Biogás. EPE - VIII Fórum do Biogás*. 2021. Citado na página 18.
- BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. [S.l.]: EESC/USP, 1999. Citado na página 29.
- BIOGÁS, G. *Fundamentos da Digestão Anaeróbia de Substratos Agroindustriais - Conceitos básicos e digestão anaeróbia*. 2020. Citado na página 22.
- BOUALLAGUI, H. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*, v. 39, p. 2143–2148, 2004. Citado na página 52.
- CATAPAN, A.; CATAPAN, D. C.; CATAPAN, E. A. C. antonio. *Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: Uma abordagem do custo de geração da energia*. 2010. Citado na página 57.

- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2007. Citado na página 20.
- CHIAN, E. S. K. Stability of organic matter in landfill leachates. *Water Research*, v. 11, p. 225–232, 1977. Citado na página 53.
- CIBIOGÁS. *Panorama do biogás no Brasil-2021*. 2022. Citado na página 17.
- COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M. de; KOHELER, A. C. *Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite*. s.d. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. *Biomassa para Energia*. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. Citado na página 23.
- D'AQUINO, C. A. *Geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: Estudo de caso da cidade universitária da USP*. 2018. Citado na página 53.
- D'AQUINO, C. A.; MELLO, T. C. d.; JR., L. C. C. *Efeito da variação da carga orgânica volumétrica natural na produção de biogás a partir de dejetos suíno em diferentes tempos de retenção hidráulica*. 2017. Congresso ABES FENASAN 2017. São Paulo, SP. Anais. Citado na página 54.
- ESTEVES, H. B. B. *Biogás no Brasil: Visão atual e futura*. 2020. Citado na página 18.
- FARGE, B. de L.; MAUGUIN, P. *Le biogaz: procédés de fermentation méthanique*. Masson, 1995. (Ingénierie de l'environnement). ISBN 9782225842573. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=cu8zAAAACAAJ>>. Citado na página 19.
- FILHO, J. A. C. *Biogás, independência energética do Pantanal Matogrossense*. Corumbá, 1981. 53 p. Citado na página 26.
- FILHO, L. F. de B. Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. 10 2005. Citado na página 29.
- FIRMO, A. L. B. *Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos*. 2013. Citado na página 30.
- GEF Biogás Brasil. *Fundamentos da Digestão Anaeróbia de Substratos Agroindustriais - Digestão Anaeróbica: Características do Substrato, Principais Fontes e Etapas da Produção de Biogás*. 2020. Citado 15 vezes nas páginas 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 49 e 51.
- GUERI, M. D.; SOUZA, S. N. M. D.; KUCZMAN, O. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. *BIOFIX Scientific Journal*, Universidade Federal do Parana, v. 3, p. 17, 12 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 31.
- INPE, I. N. de P. E. *Estação de Brasília - Climatologia Local*. 2023. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/brasil-clima.html#:~:text=A%20temperatura%20m%C3%A9dia%20atinge%20valores,do%20ano%2C%20em%20m%C3%A9dia%2018%C2%BAC.>> Citado na página 50.
- KARLSSON, T. et al. Manual básico de biogás. v. 1, p. 1–70, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 29.

- KELLY, R. J. et al. *Solid Waste Biodegradation Enhancements and the Evaluation of Analytical Methods Used to Predict Waste Stability*. 2002. Citado na página 30.
- KUNZ, A. et al. *Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato*. 2ª edição. ed. [s.n.], 2022. 15-211 p. ISBN 97865881155028. Disponível em: <www.embrapa.br/fale-conosco/sac>. Citado na página 56.
- KUNZ, A.; OLIVEIRA, L. d.; PICCININ, L. S. *Manual de Análise do Biogás*. Florianópolis: Alfakit, 2007. Citado na página 57.
- LEITE, V. D. Influência da umidade na digestão anaeróbia de resíduos sólidos. In: . [S.l.: s.n.], 2002. Citado na página 30.
- LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 53.
- LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, p. 229–232, 1999. Citado na página 30.
- LIMA, E. X.; TAVARES, G. M. Proposta de produção de biogás e geração de energia por meio dos resíduos orgânicos do restaurante universitário/uema. Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Citado na página 47.
- LUCENA, T. V. de. *Avaliação da geração de biogás sob diferentes condições de biodegradação de resíduos alimentares*. 2016. Citado 4 vezes nas páginas 30, 52, 53 e 55.
- MADIGAN, M. T. et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO₂. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v. 14, n. 4, p. 226–237, Out./Dez. 2006. Citado na página 58.
- MAGALHÃES, G. V. V. *Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: Ensaio de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real*. 2018. Citado na página 19.
- MAO, C. et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540–555, 2015. Citado na página 31.
- MATA-ALVAREZ, J. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. [S.l.]: IWA, 2003. 323 p. ISBN 1900222140. Citado na página 53.
- MAYER, M. C. *Estudo da influência de diferentes inóculos no tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos*. 70 p. Dissertação (Dissertação) — Mestrado em ciência e tecnologia ambiental, Campina Grande, 2013. Citado na página 53.
- MME, M. d. M. e. E. *Balanco Energético Nacional*. [S.l.]: MME, 2007. Citado na página 23.
- MROSSO, R.; MECHA, A. C.; KIPLAGAT, J. Characterization of kitchen and municipal organic waste for biogas production: Effect of parameters. *Heliyon*, Elsevier Ltd, v. 9, 5 2023. ISSN 24058440. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 50, 52 e 54.

- NAZARO, M. S. *Desenvolvimento de um biodigestor residencial para processamento de resíduos sólidos orgânicos*. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 32.
- PICANÇO, A. P. Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. *Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*, 2004. Citado na página 30.
- PROBIOGÁS. *Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização*. 2010. Disponível em: <www.cidades.gov.br/saneamento>. Citado 3 vezes nas páginas 32, 57 e 59.
- REIS, A. D. S. *Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio*. 2012. Citado 3 vezes nas páginas 14, 21 e 22.
- ROCHA, C. M. D. *Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares*. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 30.
- SANTOS, L. A. dos. *Potencial de geração de biogás a partir de resíduos agroindustrial de frutas*. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 58.
- SOUZA, M. E. de. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE*, v. 44, 1984. Citado na página 27.
- Universidade de Brasília. *Guia FGA - Estrutura*. 2014. Acessado em: 25/10/2023. Disponível em: <<https://fga.unb.br/guia-fga/estrutura>>. Citado na página 36.
- World Health Organization. *International Reference Center for Wastes Disposal. Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost*. Switzerland: [s.n.], 1978. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 40 e 41.
- YAVINI, T. D.; CHIA, A. I.; JOHN, A. Evaluation of the effect of total solids concentration on biogas yields of agricultural wastes. *Int. Res. J. Environ. Sci*, v. 3, n. 2, p. 70–75, 2014. Citado na página 54.
- ZHANG, L.; LOH, K.-c.; ZHANG, J. Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects. *Bioresource Technology Reports*, Elsevier BV, v. 105, p. 153–159, aug 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.005>>. Citado na página 49.
- ZHANG, R. et al. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 929–935, 3 2007. ISSN 09608524. Citado na página 30.