



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AGUINALDO ARANHA MARQUES NETO

**ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO E
PRODUÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ESTERCO ANIMAL**

JOÃO PESSOA – PB

2024

AGUINALDO ARANHA MARQUES NETO

**ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO E
PRODUÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ESTERCO ANIMAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

JOÃO PESSOA – PB

2024

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPB - Biblioteca Setorial do CT

N469a Neto, Aguinaldo Aranha Marques.

Análise de um protótipo de biodigestor anaeróbico e
produção de biogás proveniente de esterco animal /
Aguinaldo Aranha Marques Neto. - João Pessoa, 2024.
51 f.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. biodigestores;biogás;biometano;biometanização. I.
dos Santos, Carlos Antônio Cabral. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 621(043.2)

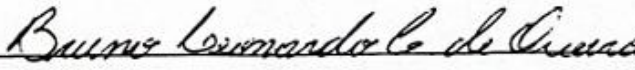
AGUINALDO ARANHA MARQUES NETO

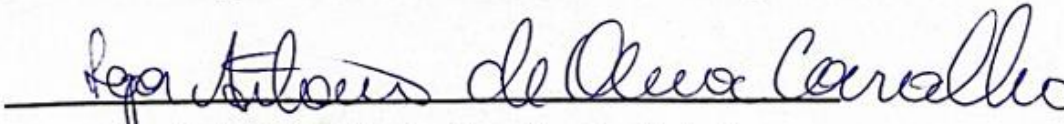
**ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO E
PRODUÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ESTERCO ANIMAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca
examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências
à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

João Pessoa, 24 de Outubro de 2024

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos (Orientador)
Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB


Prof. Dr. Bruno Leonardo Campelo de Queiroga (Avaliador)
Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB


Igor Antônio de Oliveira Carvalho (Avaliador)
Instituto Federal do Maranhão / IFMA

JOÃO PESSOA – PB

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por me capacitar a concluir este curso, e a minha família, em especial minha mãe, meu pai, meus irmãos, minha tia e minha noiva, que estiveram comigo em toda essa minha trajetória do curso e na vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Vera e Aguinaldo, por me apoiarem nos estudos desde pequeno, se sacrificando para que eu pudesse ter a melhor educação possível.

Agradeço aos meus irmãos, Rafael e Rodrigo, por sempre estarem comigo em todos os momentos.

Agradeço a minha noiva Bruna por estar ao meu lado desde o primeiro dia na universidade, participando de todos os momentos e sendo porto seguro em momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Cabral, por aceitar e me orientar todo esse tempo para realização deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas Igor, Merques, Davi e Carol, por todo apoio durante essa pesquisa, estando disponíveis para ajudar a todo momento.

Agradeço aos meus amigos de curso, em especial Bruno e Murillo, por toda a companhia e por deixar essa trajetória mais leve e com boas risadas.

RESUMO

O presente trabalho versa sobre a confecção de biodigestores anaeróbicos com a finalidade de produção do biogás e sua transformação para biometano, além de levantar os custos para a sua confecção. Para possibilitar a produção de biogás, foram desenvolvidos dois biodigestores: o primeiro, utilizando uma bombona plástica de 200 litros, e o segundo, com uma bombona de 100 litros. A matéria orgânica utilizada no processo foi o esterco animal de origem bovina, sendo diluída com água em uma proporção pré-estabelecida. Os dois biodigestores desenvolvidos mostraram capacidade de produção de biogás, que foi constatado após preenchimento completo de câmaras de ar de trator, além de testes de chama e uma análise cromatográfica realizados para observar a presença de metano (CH_4). O processo de produção de biogás foi acompanhado durante trinta dias. Para a realização da biometanização, desenvolveu-se um filtro purificador com a finalidade de eliminar os gases contaminantes e prejudiciais ao meio ambiente, e elevar o teor de metano. Após todo o processo de produção, foram levantados todos os custos para a confecção de cada biodigestor para uma análise da viabilidade de seu desenvolvimento. Por fim, o biogás coletado foi utilizado para uma análise cromatográfica a fim de verificar as concentrações dos componentes do biogás.

Palavras-chave: biodigestores; biogás; biometano; biometanização; esterco animal; análise cromatográfica.

ABSTRACT

The present work deals with the manufacture of anaerobic biodigesters for the purpose of producing biogas and its transformation into biomethane, in addition to raising the costs for its manufacture. To enable the production of biogas, two biodigesters were developed: the first, using a 200 liter plastic drum, and the second, with a 100 liter drum. The organic matter used in the process was animal manure of bovine origin, being diluted with water in a pre-established proportion. The two biodigesters developed showed biogas production capacity, which was verified after completely filling tractor air chambers, in addition to flame tests and a chromatographic analysis carried out to observe the presence of methane (CH₄). The biogas production process was monitored for thirty days. To carry out biomethanization, a purifying filter was developed with the purpose of eliminating contaminating gases that are harmful to the environment, and increasing the methane content. After the entire production process, all costs for the manufacture of each biodigester were collected to analyze the feasibility of its development. Finally, the collected biogas was used for a chromatographic analysis in order to verify the concentrations of the biogas components.

Keywords: biodigesters; biogas; biomethane; biomethanization; animal manure; chromatographic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista em corte do biodigestor de batelada	24
Figura 2.2 – Representação do biodigestor no modelo chinês	25
Figura 2.3 – Vista em corte do biodigestor modelo chinês	25
Figura 2.4 – Biodigestor do modelo indiano	26
Figura 2.5 – Vista interna do biodigestor modelo indiano	27
Figura 2.6 – Biodigestor modelo canadense	27
Figura 2.7 – Processos de dessulfuração do biogás	30
Figura 2.8 – Principais mecanismos físicos na dessulfuração	30
Figura 3.1 – Primeiro biodigestor (200L)	35
Figura 3.2 – Segundo biodigestor (100L)	35
Figura 3.3 - Filtro purificador	36
Figura 3.4 – Esterco bovino coletado para utilização	37
Figura 3.5 – Verificação da massa do esterco	38
Figura 3.6 – Aparelho para aferição de pressão	38
Figura 3.7 – Pressão interna da câmara de ar	39
Figura 4.1 – Câmara de ar para armazenamento do biogás	42
Figura 4.2 – Chama resultante da queima do biogás	43
Figura 4.3 – Chama resultante da queima do biogás	44
Figura 4.4 – Resultado da análise cromatográfica	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resíduos agropecuários	17
Tabela 2.2 – Produção de biogás por resíduo animal	18
Tabela 2.3 – Produção de Biogás por tipo de resíduo	18
Tabela 2.4 – Composição do Biogás	20
Tabela 2.5 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	20
Tabela 3.1 – Materiais utilizados na confecção do biodigestor de 100L	39
Tabela 3.2 – Materiais utilizados na confecção do biodigestor de 200L	40
Tabela 3.3 – Materiais para confecção do filtro	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
OIE	Oferta Interna de Energia
GNV	Gás Natural Veicular

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	13
INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	14
1.3 OBJETIVO GERAL.....	15
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.5 ESTRUTURA O TRABALHO.....	15
CAPÍTULO II.....	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	17
2.2 ESTERCO ANIMAL.....	17
2.3 BIOGÁS.....	18
2.3.1 Composição do Biogás.....	19
2.3.2 Principais contaminantes do Biogás.....	21
2.4 BIODIGESTÃO E BIODIGESTORES.....	21
2.4.1 Processo de Biodigestão.....	21
2.4.2 Biodigestores.....	23
2.4.2.1 Biodigestor de Batelada.....	23
2.4.2.2 Biodigestor Contínuo.....	24
2.5 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	28
2.5.1 Dessulfuração do Biogás.....	29
2.5.1.1 Adsorção com Carvão Ativado.....	32
2.5.2 Método de remoção de água.....	33
2.5.3 Método de remoção de gás carbônico.....	33
CAPÍTULO III.....	34
MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 INTRODUÇÃO.....	34
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	34
3.2.1 Confeção de protótipo de Biodigestor.....	34
3.2.2 Alimentação do Biodigestor.....	37
3.2.3 Pressão de Produção.....	38

3.2.4	Materiais Utilizados.....	39
3.2.5	Condições de trabalho.....	41
CAPÍTULO IV.....		42
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		42
4.1	VOLUME DE PRODUÇÃO.....	42
4.2	TESTE DE CHAMA.....	43
4.3	ANÁLISE CROMATOGRÁFICA.....	44
CAPÍTULO V.....		46
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		46
REFERÊNCIAS.....		48

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A utilização de energia elétrica oriunda de fontes renováveis tem se tornado cada vez mais frequente atualmente, tendo em vista a preocupação crescente com o meio ambiente e a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE). A sua implementação carrega consigo características promissoras no que diz respeito à inovação e à rentabilidade, reduzindo as dificuldades de produção de energia elétrica no país e garantindo uma diversificação na matriz energética brasileira. Fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de fontes alternativas se torna indispensável para o apoio no planejamento das cidades, indústrias e do país. Embora a energia sustentável esteja em pauta mundial, percebe-se que, no Brasil, as fontes não-renováveis ocupam a maior parte da Oferta Interna de Energia (OIE), alcançando 50,9% (BEN, 2024).

Na matriz energética brasileira, as fontes renováveis atingem 49,1% da energia ofertada, sendo 7,2% denominadas “Licor preto e Outras renováveis”. Dentro desse grupo, encontra-se o biogás (responsável por apenas 2,0% do total), uma fonte renovável e alternativa para não ocorrer uma dependência das termelétricas e das fontes não-renováveis de energia (BEN, 2024). Além do aproveitamento de resíduos, sua utilização estimula a substituição em relação aos combustíveis fósseis. Apesar de ainda ser uma participação pequena em relação ao total, o biogás surge como um grande potencial para ser uma alternativa viável na produção de energia do país. (FIGUEIREDO, 2011).

A produção do biogás é feita através da digestão anaeróbia, ou seja, a quebra da matéria orgânica na ausência de oxigênio. As principais fontes utilizadas para a produção são, geralmente, resíduos sólidos provenientes de aterros sanitários, indústria de alimentos ou bebidas e esterco animal. (EPE, 2024). O biogás é composto majoritariamente por gás metano (CH_4), o que faz da sua utilização ainda mais importante. O seu descarte para a atmosfera tem uma grande relevância quanto ao meio ambiente, visto que o CH_4 é um dos gases mais prejudiciais para o efeito estufa, com um grau de poluição vinte e uma vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2). (EPE, 2024)

No Brasil, a atividade agropecuária tem grande destaque em todo o território do país. Em virtude disso, destaca-se uma considerável quantidade de resíduos gerados na criação de animais. Esses resíduos animais (esterco animal), quando não tratados, contribuem para emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente, os gases do efeito estufa (GEE). A geração de resíduos possui um grande potencial para a produção de biogás e biofertilizantes. Com o biogás produzido, a geração de energia elétrica é um dos principais aproveitamentos do esterco animal. (SILVA; SILVA; FILHO, 2015).

Para a obtenção do biogás, ressalta-se a utilização de biodigestores como uma excelente alternativa, visto que contribui para a redução da emissão de gases como o CO_2 e CH_4 no meio ambiente, além do melhor aproveitamento dos resíduos de matéria orgânica.

A aplicação final do biogás depende de um processo de purificação para uma melhor utilização, já que o seu uso não purificado se mostra ineficiente devido a presença de gases como o Sulfeto de Hidrogênio (H_2S), que possui um alto poder de corrosão. Como o biogás, no seu estado inicial, é composto por CH_4 , CO_2 e outros gases como o H_2S , faz-se necessário a eliminação desses gases de uma forma correta e responsável, a fim de obter o biometano (biogás com qualidade adequada para aplicação final) com concentração de CH_4 superior a 96,5%. (MIYAWAKI, 2014).

Dessa forma, o presente trabalho propõe realizar a coleta de resíduos animais de origem bovina para a sua utilização como substrato na produção de biogás. Para isso, fez-se necessário a confecção de um protótipo de biodigestor de pequeno porte para realizar a digestão anaeróbia do resíduo orgânico. Com isso, propõe-se estimar os custos para desenvolver o protótipo de biodigestor, além de realizar testes de chama e uma análise cromatográfica com o intuito de verificar as concentrações dos componentes do biogás produzido através do esterco bovino.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A crescente busca por soluções que amenizem os impactos ambientais ampliou a necessidade da criação de tecnologias mais limpas. Os estudos sobre energias renováveis tem sido uma temática mundial.

Ainda assim, temas que são fundamentais para aliviar esses problemas ainda são pouco estudados e/ou utilizados na prática. O potencial existente no Brasil para a produção de biogás através de dejetos bovinos é enorme, visto a importância da pecuária bovina no país.

Ciente do exposto, o presente trabalho visa mostrar a viabilidade da produção de biogás através de resíduos bovinos (esterco), mostrando uma solução para reduzir os impactos ambientais em consequência da liberação de gás metano (CH_4) no meio ambiente.

1.3 OBJETIVO GERAL

Confeccionar um protótipo de biodigestor para a produção de biogás, utilizando esterco bovino como substrato, e estimar o custo para a sua confecção.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Coletar esterco animal;
- b) Construir um protótipo de biodigestor para realizar o experimento;
- c) Verificar a existência de algum vazamento que comprometa a produção;
- d) Alimentar o protótipo de biodigestor com a matéria orgânica coletada;
- e) Estimar o custo para a confecção do protótipo de biodigestor
- f) Produzir o biogás a partir do esterco animal coletado;

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos onde são abordados os tópicos referentes ao referencial teórico, materiais e métodos, resultados e discussão, além da conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo I são apresentados os argumentos e os conteúdos que estão relacionados com o escopo e justificativa estudados no trabalho. Nesse capítulo encontra-se a introdução, motivação do trabalho, objetivos gerais e específicos, e a estrutura do trabalho.

No capítulo II são apresentados os conhecimentos teóricos necessários para um bom entendimento sobre a produção do biogás através de esterco bovino. Nesse capítulo é feita uma abordagem sobre a pecuária bovina no Brasil, que gera uma quantidade significativa de resíduos com potencial de geração de biogás. Além disso, fala-se sobre o biogás e sua composição, alertando para os gases contaminantes que necessitam serem eliminados no processo de

purificação para uma melhor qualidade do biogás. Por fim, esse capítulo trata sobre os biodigestores e seus diferentes tipos.

No capítulo III é apresentada toda a metodologia utilizada no trabalho. São descritos os processos realizados, desde a coleta do resíduo hortifruti em feiras livres até a construção do biodigestor e produção do biogás. Aqui é detalhada a quantidade de resíduo utilizada no processo, como é realizado o preparo do substrato, além das dimensões do biodigestor construído e utilizado no processo.

No capítulo IV são apresentados os resultados e discussões referentes à produção de biogás utilizando como substrato os resíduos hortifruti de feiras livres.

No capítulo V são apresentadas as conclusões que foram obtidas na realização do presente trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O biogás oriundo da biodegradabilidade da matéria orgânica pode ocorrer de várias formas. A principal é o efeito da biodigestão (anaeróbica ou aeróbica). Neste trabalho, o enfoque é dado a biodigestão anaeróbica.

2.2 ESTERCO ANIMAL

A atividade pecuária brasileira tem papel importante no âmbito econômico e socioambiental. O Brasil ocupa o segundo lugar no mundo em relação a criação bovina, perdendo apenas para Índia como o maior rebanho bovino do mundo.

A intensificação da pecuária tem afetado diretamente o meio ambiente. A criação de bovinos em grande escala produz uma quantidade significativa de dejetos (esterco). Além da contaminação dos solos e recursos hídricos, a maior consequência da geração de resíduo são as emissões de gases de efeito estufa (GEE), com destaque para o gás metano (CH₄). No que diz respeito aos GEE's, a pecuária é responsável por aproximadamente 1/5 das emissões, devido a presença do metano que é chega a reter 20 vezes mais calor que o CO₂. (BIELLO, 2018).

A produção de esterco de bovinos leiteiros é, aproximadamente, 45 a 48 kg/vaca/dia, enquanto os bovinos de corte produzem por volta de 30 a 35 kg/cabeça/dia. (REVISTA AGROPECUÁRIA, 2018). A tabela a seguir apresenta informações relativas agropecuária nacional, mostrando a atividade realizada e a quantidade de resíduo gerado.

Tabela 2.1 – Resíduos agropecuários

Atividade	Número	Produção média/cabeça	Estimativa de resíduo gerado
Avicultura	3,82 bilhões de aves de corte	2,6 kg/ciclo	9,93 milhões de t/ano
Pecuária bovina	213 milhões de cabeças	20 kg/dia	1.512.560 milhões de t/ano
Suinocultura	37,5 milhões de cabeças	-	900 milhões de t

Fonte: ABISOLO, 2016

Na tabela 2.2, são apresentados dados referentes a produção de biogás de acordo com tipo de resíduo animal, além da quantidade de metano presente.

Tabela 2.2 – Produção de biogás por resíduo animal

Biomassa utilizada	Produção diária de resíduo (kg/animal)	Produção de biogás (a partir de material seco em m ³ /ton)	Percentual de gás metano produzido
Bovinos	15	270	55%
Suínos	2,25	560	50%
Equinos	10	260	Variável
Ovinos	2,80	250	50%
Aves	0,18	285	Variável

Fonte: Adaptado de MOURA (2012) e Gaspar (2003)

Vale ressaltar que o tipo de alimentação ofertada para o animal influencia na quantidade de biogás produzido. A tendência é que animais que sejam confinados tendem a produzir uma quantidade maior de metano (CH₄). (TORRES; SILVA, 2015).

2.3 BIOGÁS

O Brasil é um país que promove a produção de diferentes tipos de biomassa. O biogás é uma dessas formas de reaproveitamento, bem como dos resíduos vegetais agrícolas gerados. (SITORUS & PANJAITAN, 2013). O biogás é produzido pela interação microbiana na digestão anaeróbica (sem oxigênio) da matéria orgânica. (SCANO *et al.*, 2013). A quantidade de matéria-prima para ser utilizada como biomassa na produção de biogás é bem diversificada, podendo ser utilizado frações de resíduos sólidos urbanos, resíduos alimentares, dejetos da bovinocultura, suinocultura, avicultura, entre outros.

Na tabela a seguir, apresenta-se a produção média de biogás de acordo com o resíduo utilizado.

Tabela 2.3 – Produção de Biogás por tipo de resíduo

Resíduo	Média de produção de biogás (m ³ .t ⁻¹)	Referência
---------	--	------------

Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos/ Resíduos alimentares	130 m ³	CHESSHIRE(2006); AXPO KOMPOGAS (2012); NORDBERG (2003); MONNET (2003); BIRKMOSE (2000); PRACTICALLY GREEN (2013); KOTTNER (2004)
Dejetos bovinocultura	23 m ³	
Dejetos suinocultura	20 m ³	
Dejetos avicultura	93 m ³	
Resíduos de matadouro	79 m ³	

Fonte: MATIELLO, 2017.

A produção do biogás depende da composição do resíduo utilizado como matéria prima, temperatura e tempo no reator. Quando maior o tempo de retenção no biodigestor, maior o nível de degradação da matéria orgânica. (AL SEADI *et al.*, 2008; JORGENSEN, 2009).

De acordo com Oliver *et al.*, (2008), o biogás é um gás combustível que possui uma queima limpa e renovável, o que faz ele ser utilizado como combustível e outras fontes de energias. O metano, principal componente do biogás, é um gás inodoro, incolor e que é altamente combustível. A sua queima não produz fuligem e seu índice de contaminação do ar atmosférico é inferior ao butano, que está presente na composição do gás de cozinha. (GASPAR, 2003). A presença do metano (CH₄) no biogás garante a ele a capacidade de ser fonte de energia, gerando calor, energia elétrica e mecânica, além do biometano.

O processo de purificação do biogás confere a ele a sua utilização como biometano, no qual pode ser utilizado como substituto ao gás natural, no abastecimento de veículos e na indústria. A quantidade de metano na composição do biogás diz sobre a qualidade do gás, ou seja, quando maior a presença de CH₄, maior será a qualidade do biogás produzido. (GARCILASSO *et al.*, 2018).

2.3.1 Composição do Biogás

O biogás é uma mistura gasosa com alto poder calorífico, constituído majoritariamente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros em menores proporções como o nitrogênio (N₂), hidrogênio (H) e o sulfeto de hidrogênio (H₂S). (KUNZ, STEINMETZ, DO AMARAL, 2022).

A composição do biogás depende do tipo de digestor, substrato e tempo de retenção. (POLPRASERT, 2007). De acordo com Al Seadi *et al.*, a composição teórica do biogás se apresenta da seguinte maneira:

Tabela 2.4 – Composição do Biogás

Composto	Conteúdo (Vol. %)
Metano (CH ₄)	50 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 45
Vapor D'agua (H ₂ O)	2 (20°C) – 7 (40°C)
Oxigênio (O)	< 2
Nitrogênio (N)	< 2
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	< 1
Hidrogênio (H)	< 1
Amônia (NH ₄)	< 1

Fonte: AL SEADI et al., 2008

O potencial de combustão do biogás está ligado diretamente a quantidade de metano presente na mistura devido ao seu poder calorífico. (POLPRASERT, 2007). A tabela a seguir mostra a variação do poder calorífico de acordo com a composição do biogás, ou seja, a presença de CH₄.

Tabela 2.5 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química do Biogás	Peso Específico (Kg/Nm³)	Poder Calorífico (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
50% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Avellar, 2001 apud Costa, 2006

2.3.2 Principais contaminantes do biogás

Em relação aos compostos presentes no biogás, destaca-se a importância da redução de gases prejudiciais na mistura. Dentre eles, estão o dióxido de carbono, vapor d'água, sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e amônia.

- **Dióxido de Carbono (CO₂):** É o gás com a maior concentração na mistura, logo após o metano, o que faz diminuir a qualidade do biogás devido ao seu poder diluidor. (MAGALHÃES *et al.*, 2006). Ele associado a umidade presente na mistura, pode se tornar corrosivo. (HAHN e HOFFSTEDE, 2010). A sua redução mostra-se importante não somente para a mistura como também para o meio ambiente.
- **Sulfeto de Hidrogênio (H₂S):** Este composto, durante a combustão, tem alto poder de formação de ácidos corrosivo, prejudicando equipamentos e todo o sistema envolvido. (BRANCO, 2010).
- **Vapor de Água (H₂O):** O biogás, na saída do biodigestor, encontra-se saturado de vapor de água. Mesmo em baixas concentrações, o vapor de água pode provocar corrosão, juntamente com o H₂S, quando condensado. Ele pode ser facilmente eliminado em processos de purificação. (PETERSSON e WELLINGER, 2009).
- **Nitrogênio (N₂) e Oxigênio (O₂):** A presença destes compostos deve ser evitada no biogás, principalmente quando a finalidade é para a utilização como gás veicular. Esses gases podem ser reduzidos na purificação, no processo de adsorção com carvão ativado. (PETERSSON e WELLINGER, 2009).
- **Amônia:** A existência da amônia se justifica pela presença de nitrogênio na composição do biogás. Assim como o sulfeto de hidrogênio, o fato de a amônia estar presente na mistura pode prejudicar equipamentos e a qualidade do ar. Ao reagir com água, a amônia pode se tornar corrosiva. (KENNEDY *et al.*, 2015).

2.4 BIODIGESTÃO E BIODIGESTORES

2.4.1 Processo de Biodigestão

A biodigestão anaeróbia é um processo metabólico que ocorre na ausência de oxigênio. Nesse processo, os micro-organismos digerem a matéria orgânica e produzem gás carbônico e

metano. A digestão anaeróbia pode se dividir em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022)

Na fase da hidrólise, compostos de alta massa molecular, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, são transformados em substâncias orgânicas mais simples e solúveis (monômeros). Esse processo é realizado por enzimas extracelulares liberadas por bactérias hidrolíticas. A relevância da hidrólise na velocidade de degradação depende das características do substrato. Quando a matéria orgânica é complexa e de difícil degradação, a hidrólise se torna crucial para a velocidade global de degradação, podendo ser considerada a etapa limitante da digestão anaeróbia. A duração dessa fase varia conforme o tipo de substrato, levando apenas algumas horas para carboidratos e alguns dias para proteínas e lipídios. Já a lignocelulose e a lignina são hidrolisadas de forma mais lenta, muitas vezes de maneira incompleta.

Na acidogênese, carboidratos como a glicose são convertidos em piruvato, que é transformado em ácido láctico por *Lactobacillales* e em etanol por leveduras. Os ácidos graxos, por sua vez, são degradados pela *Acetobacter* através da β -oxidação, onde se ligam à coenzima A e liberam acetato em etapas. Os aminoácidos são degradados em pares pelo *Clostridium botulinum* na reação de Stickland, resultando em acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio.

Já na acetogênese, as bactérias acetogênicas formam uma relação de sintrofia com arqueas metanogênicas e bactérias homoacetogênicas, onde ácidos de cadeia longa são convertidos em ácidos com um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), além de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias homoacetogênicas mantêm o equilíbrio na reação que consome hidrogênio e gás carbônico para produzir acetato. Para que a formação de ácidos de cadeia curta ocorra de forma termodinamicamente favorável, é necessário o consumo de hidrogênio pelas arqueas metanogênicas. Essa interação entre diferentes grupos microbianos permite o crescimento de ambos e a produção de acetato a partir de ácidos orgânicos.

Por último, a metanogênese acontece em condições totalmente anaeróbicas. Assim, o carbono presente na biomassa é transformado em dióxido de carbono e metano pela ação das arqueas metanogênicas. As arqueas metanogênicas são classificadas com base em suas rotas metabólicas em dois grupos: acetoclásticas e hidrogenotróficas. As arqueas acetoclásticas, como a *Methanosarcina*, transformam acetato em metano, enquanto as hidrogenotróficas, como a *Methanobacterium* e a *Methanospirillum*, convertem hidrogênio e dióxido de carbono em

metano. Ambas as reações liberam energia na forma de calor. (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022)

2.4.2 Biodigestores

A biodigestão é um processo natural de decomposição da matéria orgânica anaerobicamente, que ocorre na ausência de oxigênio, gerando como resultado o biogás e biofertilizantes. (TABATABAEI, GHANAVATI, 2018). Existem diversos mecanismos para se realizar a biodigestão, mas aquele com maior utilização e mais eficiente é o biodigestor.

Pode-se definir um biodigestor como um reservatório fechado onde são introduzidos diversos tipos de resíduos como alimentos, frutas, cascas, cereais e até dejetos, misturados com água. (VELOSO *et al.*, 2010). A matéria depositada no biodigestor sofre ação de micro-organismos, podendo exigir um longo tempo para que toda a matéria seja decomposta. (ROYA *et al.*, 2011).

Existem vários tipos de biodigestores, mas todos contém um reservatório fechado e uma câmara para o armazenamento do biogás. Os biodigestores possuem tecnologias diferentes para atender as demandas específicas. A escolha do biodigestor ideal vai variar de acordo com o substrato utilizado e da frequência de que esse substrato será obtido. A alimentação desse biodigestor tem fundamental importância. Dessa forma, os biodigestores podem ser classificados quanto ao seu modo de abastecimento da seguinte forma: biodigestor de batelada e biodigestor contínuo. (VELOSO *et al.*, 2010).

2.4.2.1 Biodigestor de Batelada

Biodigestor não-contínuo, que retém a biomassa no reservatório até sua completa digestão. Nesse tipo de biodigestor, ocorre o acúmulo do produto dentro do sistema e apenas é liberado no final do processamento. (LABATUT *et al.*, 2011).

O reservatório fica completamente fechado, abrindo apenas no momento da produção do biogás. Ocorrida a produção, o biodigestor é aberto, limpo e carregado com substrato novamente. A figura 01 apresenta um biodigestor do modelo batelada:

Figura 2.1 – Vista em corte do biodigestor de batelada



Fonte: ORTOLANI; BENINCASA; LUCAS JUNIOR, 1991.

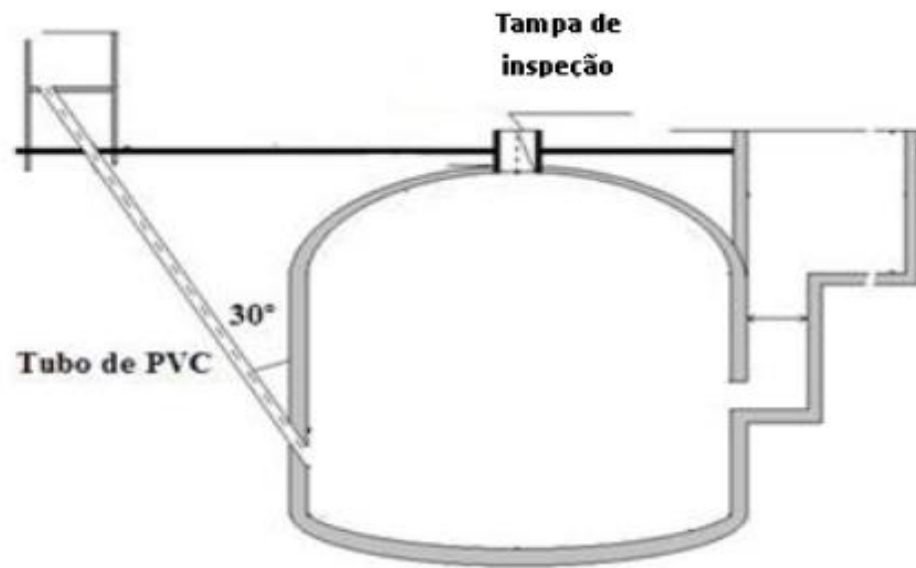
2.4.2.2 Biodigestor Contínuo

Nesse modelo não ocorre a parada do processo, o reservatório é alimentado com o substrato ao mesmo tempo que o adubo é retirado após a biodigestão. O biogás é produzido de forma uniforme e em quantidade um pouco maior que o produzido no biodigestor de batelada, podendo acontecer durante longos períodos, sem que haja a abertura do equipamento. (VELOSO *et al.*, 2010).

Dentre os biodigestores contínuos, os que mais se destacam são o modelo chinês, indiano e o canadense.

- **Modelo Chinês** – Este modelo é construído quase em sua totalidade de alvenaria e fica no subsolo, mais protegidos contra as variações climáticas. A sua estrutura possui uma entrada e saída para o substrato, além de uma válvula por onde é coletado o biogás. (JORGE; OMENA, 2012). A figura a seguir representa o biodigestor do modelo chinês:

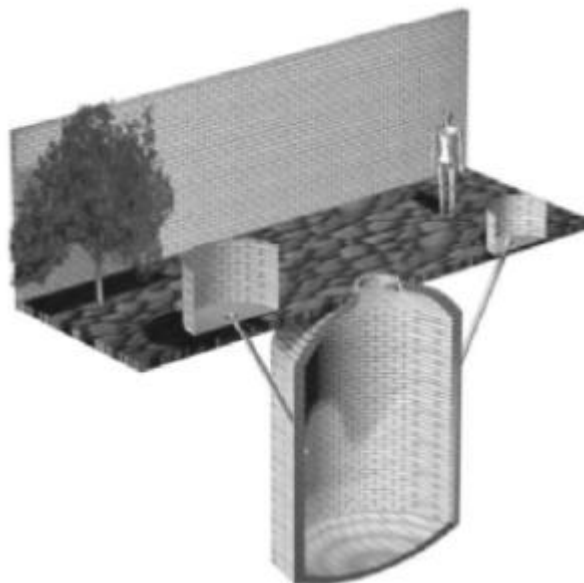
Figura 2.2 – Representação do biodigestor no modelo chinês



Fonte: ORTOLANI; BENINCASA; LUCAS JUNIOR, 1991.

Este biodigestor é operado de forma semicontínua, ou seja, o substrato é adicionado no reator uma vez por dia. Cerca de um quinto do conteúdo presente no biodigestor é utilizado como inóculo no novo ciclo. (AL SEADI *et al.*, 2008). A figura 04 exibe o reator na sua parte interior:

Figura 2.3 – Vista em corte do biodigestor modelo chinês

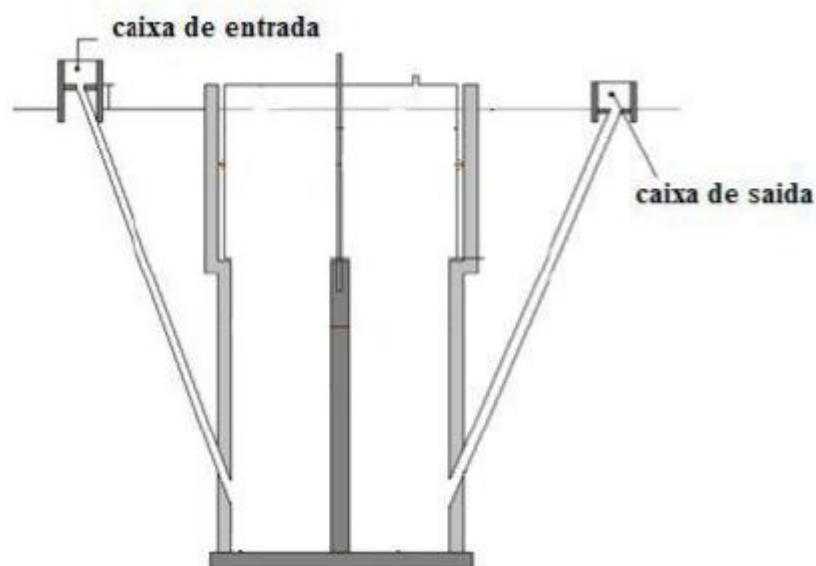


Fonte: ORTOLANI; BENINCASA; LUCAS JUNIOR, 1991.

Esse modelo apresenta algumas dificuldades tanto no seu funcionamento quanto na sua construção. Devido a variação de pressão e aos materiais utilizados na construção que podem apresentar rachaduras, a cúpula de armazenamento do biogás pode apresentar vazamentos. A questão da variação da pressão no gasômetro pode ser resolvida com uma câmara de regulagem. (ANDRADE et al., 2002). Outro problema é durante a sua construção, tanto as paredes externas quanto as internas precisam receber uma boa camada de impermeabilizante, visando não conter nenhuma infiltração. (GASPAR, 2003).

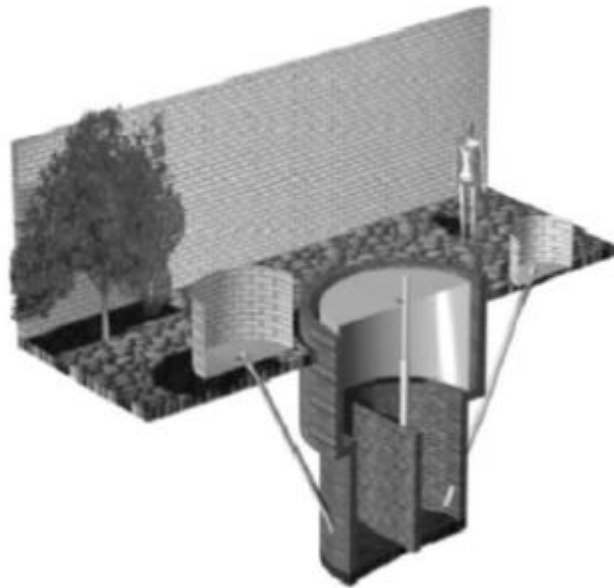
- **Modelo Indiano** – Esse modelo é formado por uma parede central, dividindo o reator em duas câmaras, possibilitando a circulação do material no biodigestor. Além da câmara de digestão, possui um reservatório de gás móvel – campânula flutuante – que pode ficar mergulhada sob a biomassa e com pressão constante. (JORGE; OMENA, 2012). Nas figuras 04 e 05 é possível observar a estrutura de um biodigestor modelo indiano:

Figura 2.4 – Biodigestor do modelo indiano.



Fonte: ORTOLANI; BENINCASA; LUCAS JUNIOR, 1991.

Figura 2.5 – Vista interna do biodigestor modelo indiano

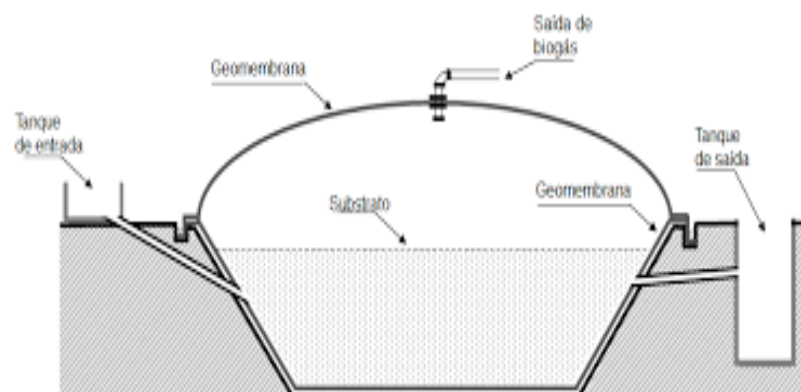


Fonte: ORTOLANI; BENINCASA; LUCAS JUNIOR, 1991.

Um fator que pode encarecer os custos desse biodigestor é a campânula, que geralmente é feita de metal e pelo fato de o biogás possuir um elemento corrosivo como o H_2S em sua composição, acaba tornando os custos de manutenção altos. (GASPAR, 2003).

- **Modelo canadense** – Esse modelo é de fácil instalação e baixo custo de implementação. O biodigestor possui uma entrada para a biomassa, uma câmara de fermentação subterrânea, uma campânula para a produção do biogás e uma válvula de registro para a sua saída, e uma caixa de saída para o efluente. (OLIVEIRA, 2012). A figura 07 apresenta um biodigestor modelo canadense:

Figura 2.6 – Biodigestor modelo canadense.



Fonte: (FALTA COLOCAR)

A utilização desse modelo é indicada para regiões com temperaturas altas e constantes. Porém, em regiões frias ele pode ser utilizado com o auxílio de um sistema de aquecimento. (ANDRADE, 2002).

2.5 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

A utilização do biogás na sua forma não purificada se mostra ineficiente em virtude da presença gases contaminantes, como por exemplo o H_2S , que tem um poder corrosivo elevado. Diante disso, faz-se necessário a purificação do biogás para sua utilização final, a fim de evitar danos aos equipamentos e instalações, aumentando o seu poder calorífico e os teores de biometano. (MIYAWAKI, 2014).

A purificação do biogás permite a sua aplicação de diferentes formas, seja como calor e eletricidade seja como combustível para veículos. Comparado aos combustíveis usais como a gasolina e o diesel, o biogás no estado purificado – biometano – oferece uma redução nos GEE's, além de menores emissões de hidrocarbonetos, nitrogênio e monóxido de carbono na atmosfera, contribuindo de forma direta para o meio ambiente. (ZHAO *et al.*, 2010). O biometano é um combustível limpo para veículos. Nesse sentido, as emissões de óxidos de nitrogênio são reduzidas significativamente, evitando o lançamento de compostos orgânicos cancerígenos. (GARCILASSO *et al.*, 2018).

A limpeza do biogás, também chamado de *cleanup*, consiste na remoção de impurezas. (BORSCHIVER; SILVA, 2014). O processo de purificação é de extrema importância na busca por uma maior qualidade e valor de aquecimento do biogás. Esse processo visa eliminar componentes indesejáveis e prejudiciais, tais como CO_2 , H_2S e vapor de água. (FRAZIER *et al.*, 2011).

Segundo Souza e Schaeffer (2010), o biogás que passa pelo processo de purificação, aumentando a concentração de metano, adquire propriedades similares ao GNV (Gás Natural Veicular), além de ser considerado um gás “verde” e sustentável.

A transformação do biogás em biometano consiste basicamente em duas etapas: a limpeza do biogás de componentes traços e o ajuste do seu poder calorífico. (BORSCHIVER; SILVA, 2014). Esse processo de ajuste consiste na remoção de dióxido de carbono (CO_2). Como resultado desse processo, tem-se o aumento da concentração de metano, o que confere

qualidade e um alto poder calorífico ao biogás para ser utilizado como recurso energético. (GARCILASSO et al, 2018).

2.5.1 Dessulfuração do Biogás

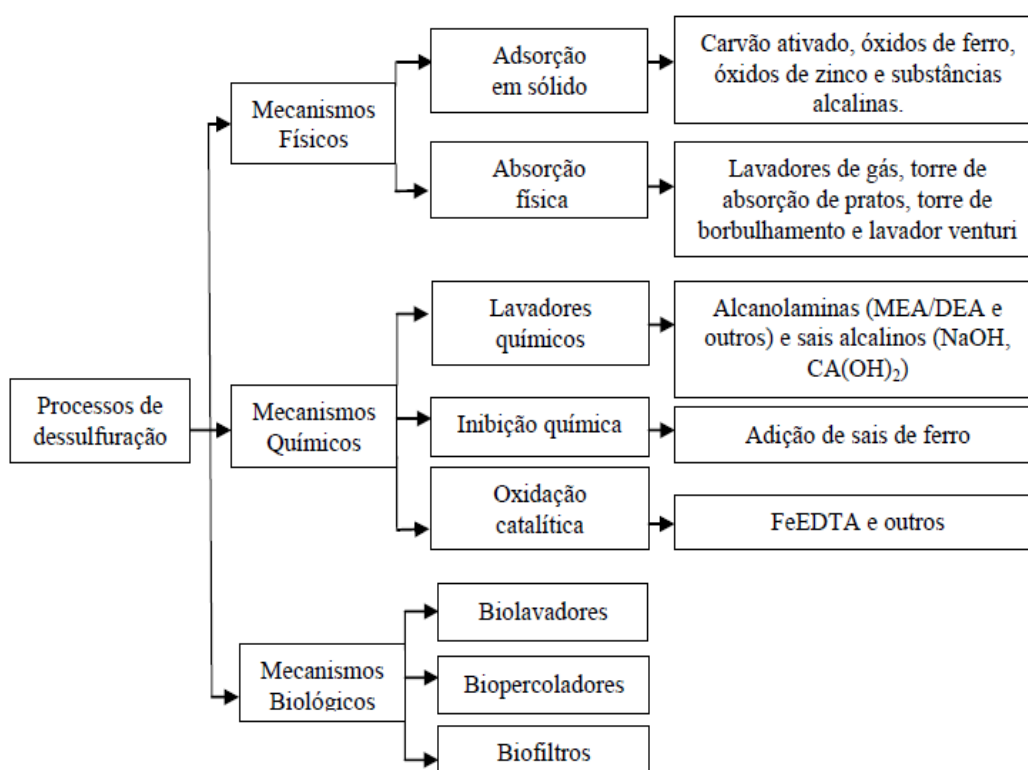
O sulfeto de hidrogênio é o principal inconveniente presente no biogás, devido ao seu alto poder corrosivo. A sua presença, dependendo da sua concentração, pode levar um ser humano a morte em poucos minutos devido a sua alta toxicidade. O seu excesso pode resultar na paralisia do sistema respiratório, causando asfixia. (KUNZ, STEINMETZ, DO AMARAL, 2022).

Além desses problemas já citados, o H_2S é um precursor da poluição atmosférica, contribuindo para um fenômeno natural chamado “chuva ácida”, outro fator relevante que mostra a imprescindibilidade da purificação e eliminação do sulfeto de hidrogênio. (BRANCHER, 2012). A sua combinação com o CO_2 e o vapor de água se mostra uma mistura altamente corrosiva, o que pode provocar alterações indesejáveis, além de prejudicar o biodigestor em que está sendo utilizado, geralmente metálicos, e tornando-o impróprio para o seu uso. (PORTO *et al.*, 2015).

A dessulfuração do biogás consiste na remoção/redução do sulfeto de hidrogênio na composição. As tecnologias utilizadas para a realização desse processo dependem da qualidade e quantidade do biogás que se deseja purificar, o tipo de substrato utilizado na produção e sua utilização final. (MIYAWAKI, 2014). Atualmente, a literatura apresenta diversos métodos para a realização da remoção de H_2S e CO_2 , apesar de os processos para a dessulfuração do biogás se mostram mais eficientes e com um menor impacto ambiental. (DEUBLEIN, STEINHAUSER, 2010).

A remoção do sulfeto de hidrogênio pode ser feita através de processos físicos, químicos ou biológicos, podendo ser realizando dentro ou fora do biodigestor. (AL SEADI et al., 2008). A figura a seguir mostra os diferentes tipos de processos:

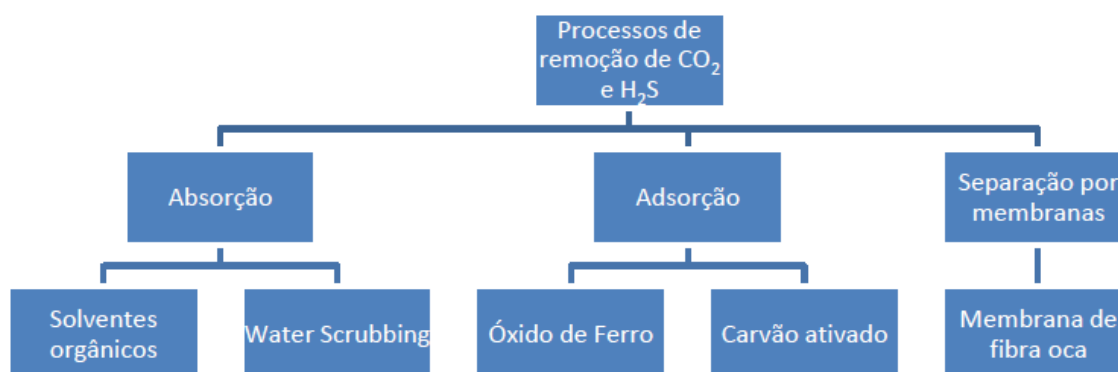
Figura 2.7 – Processos de dessulfuração do biogás.



Fonte: COLTURATO, 2015.

Dentre todos esses processos, destacam-se os mecanismos físicos para a remoção tanto do H_2S quanto do CO_2 . Segundo Godoy Júnior e Santos, além da absorção física e adsorção em sólido, a separação por membrana é mais um mecanismo físico que também pode ser utilizado nesse processo.

Figura 2.8 – Principais mecanismos físicos na dessulfuração.



Fonte: Godoy Junior, 2015.

- **Absorção Física:**

Nesse processo utiliza-se água para a remoção de H_2S e CO_2 , já que esses gases são mais solúveis que o metano (CH_4). É realizada uma limpeza contracorrente, ou seja, o biogás pressurizado é alimentado na parte inferior de uma coluna compactada enquanto a água é adicionada na parte superior da coluna. Dessa forma, o líquido retém a grande quantidade de sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, aumentando a concentração de metano. Além disso, existe a possibilidade de realizar uma remoção seletiva de H_2S , já que ele é mais solúvel que o CO_2 . (BORSCHIVER; SILVA, 2014; ZHAO *et al.*, 2010).

Outro método utilizado no processo de absorção é *water scrubbing* (lavagem com água), um método simples e econômico no qual utiliza-se água pressurizada como absorvente. Com isso, o sulfeto de hidrogênio e o dióxido de carbono são dissolvidos na água e descartados posteriormente. (MIYAWAKI, 2014).

Um absorvente também bastante utilizado no processo de lavagem são os solventes orgânicos, destacando-se o polietileno glicol, opção mais utilizada atualmente. (ICLEI, 2009). O dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio têm como vantagem ter uma maior solubilidade que o metano em solventes do que em água, resultando em um baixo consumo de solvente. (ZHAO *et al.*, 2010).

- **Adsorção em Sólido:**

Consiste em um processo frequentemente empregado para a remoção de H_2S do biogás. Essa técnica pode ser entendida como a adesão de componentes, que ocorre a seleção de gases no contato do sulfeto de hidrogênio com a superfície do absorvente. Isso acontece devido as forças existentes entre o H_2S e a superfície do absorvente. (SHIMEKIT; MUKHTAR, 2012). Ou seja, ocorre uma separação de gases, sob pressão, presentes na mistura, levando em consideração as características moleculares e a afinidade para o material selecionado para ser absorvente. A principal vantagem da adsorção em sólido é a simplicidade da operação. (ZHAO *et al.*, 2010).

Os gases, quando estão sob pressão, tendem a serem atraídos para uma superfície sólida e adsorvidos. A quantidade de gás adsorvido é diretamente proporcional a pressão realizada, ou seja, quanto maior pressão, maior a quantidade de gás adsorvido. Todo esse processo funciona com a temperatura ambiente. (ZHAO *et al.*, 2010).

- **Separação por membrana:**

Essa técnica consiste no transporte do biogás por meio de uma membrana, na qual alguns componentes da mistura ficam retidos. O transporte de cada componente acontece por meio de diferença de pressão e existe uma dependência do componente em relação à permeabilidade do material utilizado na membrana. (GODOY JUNIOR, 2015)

Dessa maneira, o desempenho da membrana depende de duas características essenciais: a permeabilidade de determinado gás através da membrana e a seletividade que dirá a preferência em relação a passagem ou retenção de determinado componente. (GODOY JUNIOR, 2015).

2.4.1.1 Adsorção com Carvão Ativado

O processo de adsorção pode ser realizado utilizando alguns tipos de adsorventes, como o carvão ativado, limalha de ferro, sílica em gel, “palhas de aço” e óxidos de ferro e zinco. (GARCILASSO et al, 2018). Dentre esses, o material mais utilizado como adsorvente é o carvão ativado. Ele adsorve o sulfeto de hidrogênio e o dióxido de carbono, elevando o teor de metano no biogás. (BORSCHIVER; SILVA, 2014).

A eficiência desse processo está ligada diretamente a área superficial do adsorvente. Existe uma atração entre duas moléculas, o adsorvente (carvão ativado) e o adsorbato (os elementos que serão retidos, no caso H_2S e CO_2), impurezas que serão eliminadas de forma seletiva. (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

Para aumentar a seletividade do processo e torná-lo mais efetivo quanto a retenção das partículas, adiciona-se juntamente ao carvão ativado soluções alcalinas ou óxidos, tais como: hidróxido de sódio, carbonato de sódio, hidróxido e iodeto de potássio, e óxidos metálicos. (COLTURATO, 2015).

O biogás tem sua passagem feita por um filtro, no qual ocorre uma interação química entre a partícula que se deseja remover e o adsorvente. Sua principal característica é a área da superfície específica. Quanto maior for a área de superfície, maior será a capacidade de retenção dos compostos indesejáveis. (ZHAO et al., 2010).

Embora esses gases sejam indesejáveis na composição do biogás, eles possuem uma importância em outras áreas. O H_2S pode ser utilizado na separação seletiva e precipitação de metais pesados encontrados em efluentes industriais. Além disso, pode ser aplicado em análises químicas, fábricas de refino e destilação, entre outros. (JOHNSON; HALLBERG, 2005). Por outro lado, o CO_2 pode ser aproveitado na indústria de alimentos e bebidas efervescentes,

fabricação de extintores, utilizado em refrigeração e no processamento de gás natural. (MERSCHMANN, 2014).

2.5.2 Método de remoção de água

Um método utilizado para remoção de água é o processo de adsorção. Nesse método, as colunas de adsorção devem operar em pressões que variam entre 6 e 10 bar, enquanto a regeneração do leito deve ocorrer sob pressões reduzidas e temperaturas entre 120°C e 150°C. O planejamento do sistema de secagem por adsorção deve considerar a utilização de duas colunas: uma destinada à adsorção e a outra à regeneração. Utiliza-se na adsorção: carvão ativado, zeólitas, sílica em gel, óxidos de alumínio e peneiras moleculares. (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022)

Outro método bastante utilizado e validado pelos estudos é o processo de condensação. Esse processo envolve submeter o biogás úmido à uma compressão, seguido de um resfriamento e, a partir disso, separá-lo em uma fração condensada e em biogás com menor umidade. Esse método pode ser utilizado como pré-tratamento em todos os sistemas de produção de biogás, permitindo uma redução da umidade em até 0,15% do volume inicial. (GARCILASSO et al., 2018).

2.5.3 Método de remoção de gás carbônico

Depois do metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2) é o componente com a maior taxa de concentração no biogás. Dessa forma, faz-se necessário a purificação do biogás para a sua remoção.

Um método utilizado para remoção do CO_2 é o processo de absorção. Esse processo é realizado numa faixa de pressão que varia entre 4 a 10 bar e tem como base a diferença de solubilidade entre um composto na fase gasosa e na fase líquida. Após realizar a purificação, o biometano tratado é liberado pelo topo da coluna e o líquido com impurezas é expelido pela parte inferior, sendo direcionado para a coluna de *stripping*. Nesta coluna, as impurezas são desabsorvidas e liberadas na atmosfera, já que ela opera em condições de baixa pressão e alta temperatura. Após esse processo, o fluido retorna à coluna de absorção. (GARCILASSO et al., 2018)

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo está descrito a metodologia e todo o processo realizado na elaboração do experimento prático, além de cada instrumento utilizado durante os testes experimentais. A metodologia experimental tem como finalidade detalhar o processo para a produção do biogás, bem como identificar os equipamentos utilizados.

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.2.1 Confecção de protótipo de biodigestor

O presente trabalho foi realizado na RECOGÁS – N/NE (Rede Cooperativa Norte-Nordeste do Gás Natural), situada na Universidade Federal da Paraíba, Campus 1 em João Pessoa. O estudo do biogás tem sido intensificado pela RECOGÁS. Por ser um combustível renovável e ter diversas aplicações, os últimos anos foram concentrados em pesquisas e testes na busca de intensificar os conhecimentos na área. Com o auxílio de estudantes de graduação, mestrado e doutorado, foram desenvolvidos alguns protótipos de biodigestores com ênfase na produção do biogás. Isso tornou possível a realização de testes a fim de verificar a sua viabilidade.

Para a realização do experimento, foram confeccionados dois biodigestores de pequeno porte utilizando duas bombonas (200 litros e 100 litros), conforme imagens abaixo. Com a posse das bombonas, foram feitos três furos: um para a alimentação do biodigestor, outro para a coleta do biogás e mais um para a saída da matéria orgânica diluída.

Figura 3.1 – Primeiro biodigestor (200L)



Fonte: Autor

Figura 3.2 – Segundo biodigestor (100L)



Fonte: Autor

Um dos desafios na construção de um biodigestor é a sua vedação, para que não ocorra escape de gás e nem a entrada de ar. Para isso, os dois tubos para a alimentação tiveram um cuidado maior por terem diâmetros maiores. Na bombona de 200 litros, utilizou-se fibra de vidro em todo o diâmetro do tudo. Já na bombona de 100 litros, foi utilizado uma borracha para a vedação. Com um auxílio de um compressor, realizou-se um vácuo em ambas as câmaras de ar, a fim de evitar a presença de ar no armazenamento do biogás.

Na saída do biogás, foram colocados um registro esfera de metal e um regulador de pressão nas bombonas de 200L e 100L, respectivamente. Uma mangueira foi colocada ligando o biodigestor a uma câmara de ar, onde é realizado a coleta do gás produzido. Já para saída do substrato, utilizou-se um cano de diâmetro menor que o de alimentação, além do uso de um registro para controlar o descarte.

À princípio, constatou-se um vazamento na conexão entra a mangueira e a entrada da câmara de ar do biodigestor de 200L, após alguns dias de produção e a câmara continuava vazia. A partir da constatação, foi realizado reparo e vedação dando continuidade à produção.

Além disso, foi confeccionado um filtro purificador, como mostrado na figura abaixo, com a finalidade da eliminação dos gases prejudiciais, que reduzem o poder calorífico do gás. Dessa forma, obtém-se o biometano, na concentração ideal para a sua utilização.

Figura 3.3 – Filtro purificador



Fonte: Autor

3.2.2 Alimentação do Biodigestor

O biodigestor de 100L era alimentado diariamente com uma mistura de água e esterco bovino, em quantidades proporcionais. A proporção é 1:2, ou seja, uma medida de material para duas medidas de água. Para iniciar a produção, foi necessário que a primeira alimentação fosse numa quantidade suficiente para atingir o nível ideal de funcionamento, evitando entrada de ar. Neste caso, a alimentação foi 2,77 kg de esterco bovino para 20 litros de água. A partir disso, o biodigestor foi alimentado diariamente na proporção de 0,277 kg para 2 litros de água. O abastecimento do biodigestor foi realizado em um período de 30 dias, tendo ciência que o pico de produção do biogás é por volta do dia 20. Vale ressaltar que todo o esterco bovino utilizado para a produção não teve custos, ele foi disponibilizado por um estudante do mesmo laboratório que participa de pesquisas sobre o mesmo tema. As figuras a seguir, mostram o esterco bovino utilizado para alimentar o biodigestor em uma batelada:

Figura 3.4 – Esterco bovino coletado para utilização



Fonte: Autor

Figura 3.5 – Massa de esterco para primeiro abastecimento



Fonte: Autor

3.2.3 Pressão de produção

Para ter um maior controle do processo, faz-se necessário o conhecimento da pressão de trabalho na produção de biogás. Com o auxílio de um aparelho para aferição de pressão (figura 3.6), foi possível ter o conhecimento da pressão interna na câmara de ar onde o biogás era estocado.

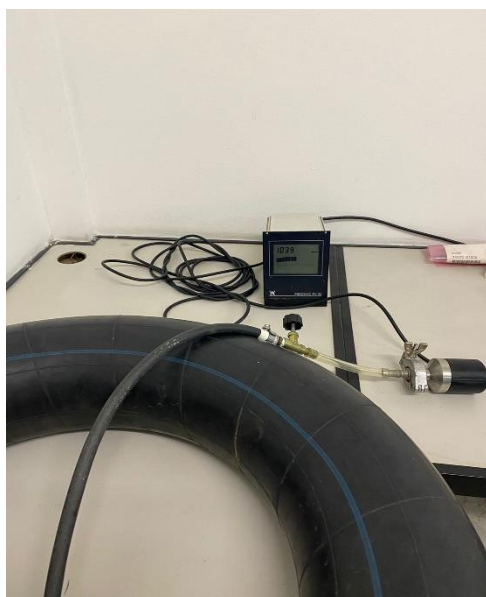
Figura 3.6 – Aparelho para aferição de pressão



Fonte: Autor

Com ele, possibilitou-se verificar a diferença de pressão entre o ambiente e a câmara de ar. Conforme a figura 3.6 mostra, a pressão atmosférica no momento era de 1018 mbar. Ao verificar a pressão no interior da câmara, foi encontrado o resultado mostrado na figura a seguir:

Figura 3.7 – Pressão interna da câmara de ar



Fonte: Autor

De acordo com a figura 3.7, a pressão do biogás no interior da câmara era de 1039 mbar. A partir disso, entende-se que a variação de pressão é mínima, ou seja, a pressão de trabalho é apenas 21 mbar acima da pressão atmosférica. Nesse caso, o nível de compressibilidade dentro da câmara é mínimo, praticamente se equivalendo a pressão atmosférica.

3.2.4 Materiais utilizados

Para a confecção dos biodigestores, foram utilizados os seguintes materiais, descritos nas tabelas 3.1 e 3.2, assim como os seus custos:

Tabela 3.1 – Materiais utilizados na confecção do biodigestor de 100L

Material	Quantidade	Valor (R\$)
Bombona plástica de 100L	01	84,00
Câmara de ar de trator	01	81,19
Tubo de esgoto de 100 mm	01	29,80

Cap de 100 mm	01	11,90
Tudo de esgoto de 50 mm	01	47,90
Registro esfera soldável 50 mm	01	26,80
Curva soldável 90° 50 mm	01	10,90
Adaptador flange soldável 50 mm	01	29,90
Mangueira cristal transparente 1/2" x 3 m	01	10,50
Conexão de latão bico mangueira 20mm x 1/2"	01	19,90
Regulador de pressão	01	49,90
	Total	R\$402,69

Fonte: Autor

Tabela 3.2 – Materiais utilizados na confecção do biodigestor de 200L

Material	Quantidade	Valor (R\$)
Bombona plástica de 200L	1	150,00
Câmara de ar de trator	1	81,19
Tubo de esgoto de 3000 x 100 mm	1	49,99
Cap de 100 mm	1	11,90
Registro esfera soldável 50 mm	1	26,80
Adaptador flange soldável 50 mm	1	29,90
Curva soldável 90° 50 mm	1	10,90
Adaptador Flange soldável 20mm x 1/2"	1	29,90
Conexão de latão bico mangueira 20mm x 1/2"	1	19,90
Mangueira preta de borracha sintética 1/2" x 3m	1	18,81
	Total	R\$429,29

Fonte: Autor

Já para a confecção do filtro purificador, foram utilizados os materiais descritos na tabela abaixo:

Tabela 3.3 – Materiais para confecção do filtro

Material	Quantidade	Valor (R\$)
Tubo PVC soldável 2000 x 40 mm	01	25,90
Tubo PVC soldável 1000 x 20 mm	01	3,60
Cap de tubo soldável 40 mm	06	24,00
Mangueira cristal transparente 1/2" x 3 m	01	10,50
Luva de união 40 mm	03	84,00
Luva de união 20 mm	02	18,00
Regulador de pressão	01	49,90
Manômetro	01	00,00
	Total	R\$215,90

Fonte: Autor

O manômetro, citado acima na tabela 3.2, não entrou no cálculo para confecção, ele foi usado apenas para realização de testes de pressão.

3.2.5 Condições de trabalho

Todo o processo realizado na produção do biogás foi realizado em condições de temperatura e pressão ambiente. Vale ressaltar a importância desses parâmetros no processo, pois qualquer oscilação na temperatura do local em que se encontra o biodigestor já afeta a produção do biogás. Dessa forma, a orientação era de não ligar o ar-condicionado, situado no local, durante o processo de produção.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VOLUME DE PRODUÇÃO

Para o armazenamento do biogás, uma câmara de ar foi utilizada durante todo o processo. À medida que o biogás era produzido, a câmara era abastecida para ser coletado para eventuais testes. A figura a seguir representa a câmara utilizada no presente trabalho.

Figura 4.1 – Câmara de ar para armazenamento do biogás



Fonte: Autor

Conforme mostra a figura 4.1, a câmara de ar se assemelha à forma geométrica de um toro, um sólido de revolução. Segundo Hamilton Luiz Guidorizzi, podemos calcular o volume de um toróide a partir da seguinte fórmula matemática:

$$\text{Volume do Toro: } V = 2.b.\pi (\pi.a^2)$$

Onde:

a – Raio menor;

b – Raio em relação ao eixo de rotação;

Primeiramente, foi necessário encontrar os valores dos raios “a” e “b”, chegando aos valores:

$$0,0705 < \mathbf{a} < 0,0724 \text{ m}$$

$$0,2725 < \mathbf{b} < 0,2744 \text{ m}$$

Em posse desses valores, foi possível calcular o volume do toro:

$$\mathbf{V_{toro}} = 2.b.\pi (\pi.a^2)$$

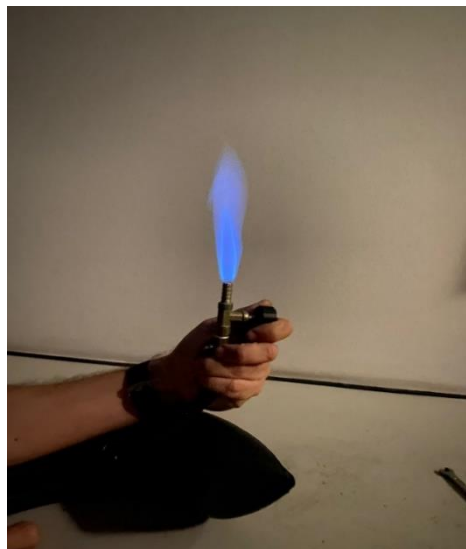
$$0,026735 < \mathbf{V_{toro}} < 0,028392 \text{ m}^3$$

Após realização desses cálculos, pode-se quantificar o volume de produção diário do biogás, coletado pelo biodigestor de 100L confeccionado.

4.2 TESTE DE CHAMA

Com os biodigestores confeccionados e em seu pleno uso, foi coletado uma quantidade significativa de biogás em câmaras de ar. A partir disso, realizou-se o teste de chama, ou seja, um teste prático para verificar a presença do biogás, principalmente em termos de concentração de metano. Diante disso, os testes tiveram como resultado as chamas mostradas nas imagens abaixo:

Figura 4.2 – Chama resultante da queima do biogás.



Fonte: Autor

Figura 4.3 – Chama resultante da queima do biogás.

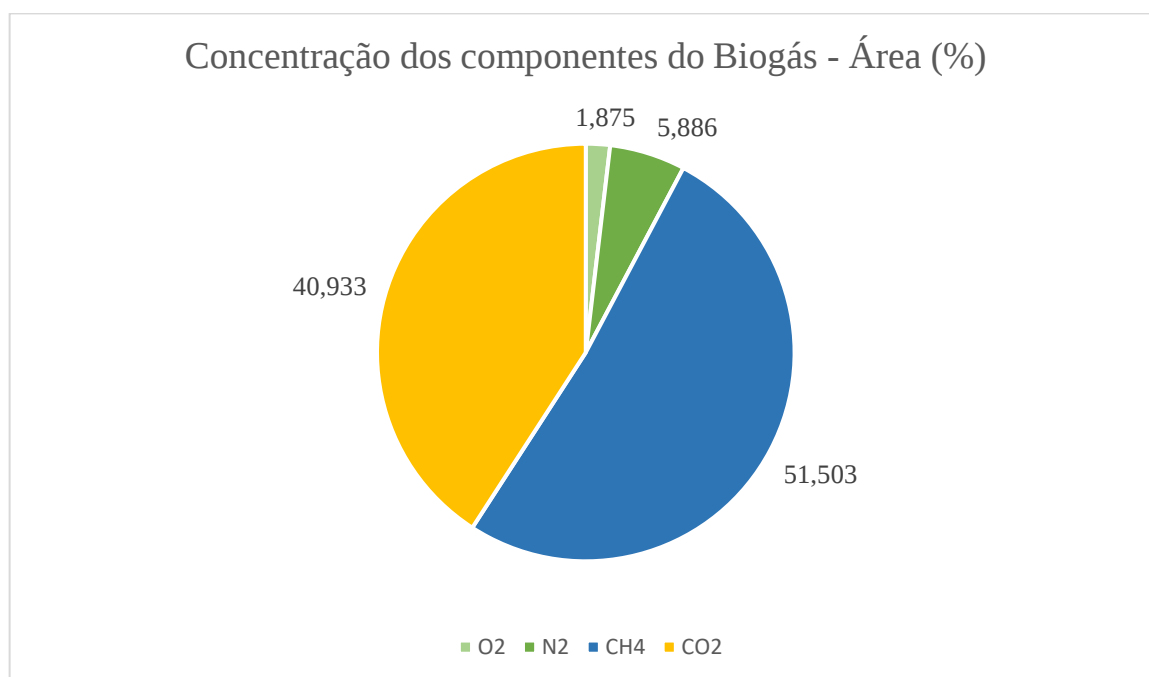


Fonte: Autor

O resultado do teste mostra as chamas com uma coloração forte azul, o que significa a presença de uma quantidade considerável de metano (CH_4) no biogás produzido.

4.3 ANÁLISE CROMATOGRÁFICA

Após ser realizado o teste de chama, o passo seguinte é realizar uma análise mais quantitativa. A análise cromatográfica consiste em identificar e analisar os componentes presentes na mistura gasosa. A partir dela, podemos verificar as concentrações de cada componente presente no biogás coletado na câmara de ar para amostra. A cromatografia foi realizada com a parceria do Prof. Dr. Leopoldo, no laboratório de Reatores Químicos, que pertence ao Departamento de Engenharia Química da UFPB. O gráfico a seguir ilustra o resultado obtido através da análise realizada:

Figura 4.4 – Resultado da análise cromatográfica

Fonte: Autor.

De acordo com o resultado obtido, confirma-se a maior presença de metano (51,503%) em relação ao total produzido. Isso corrobora com o resultado do teste de chama, um teste preliminar e que dá indícios de acordo com a coloração da chama, que apresentou uma chama predominantemente azulada, o que indica uma alta presença de CH₄. Vale ressaltar que os testes foram realizados com o biogás “sujo”, ou seja, sem ter passado pelo processo de purificação para eliminação dos gases prejudiciais.

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de todos os estudos realizados sobre o tema e cada experimento feito, através de testes e uma análise de cada resultado, evidencia-se que a utilização dessa tecnologia para produção de biometano tem um potencial para ser difundido. É notável a viabilidade tanto da confecção do biodigestor de pequeno porte, quanto a produção do biogás e biometano (após processo de purificação).

O presente trabalho consistiu na confecção de dois protótipos de biodigestores, utilizando bombonas plásticas de 200L e 100L. No início dos testes, o biodigestor de 200L apresentou um problema de vazamento na entrada da câmara de ar, que rapidamente foi corrigido quando foi notado. Apesar disso, todos os dois biodigestores atingiram o resultado esperado, ou seja, a produção do biogás. Durante todo o período de alimentação, biogás foi produzido preenchendo as câmaras de ar para testes futuros.

Após o levantamento dos custos para a confecção dos protótipos, o biodigestor de 100L se mostrou mais viável para utilização como protótipo. Além dele possuir uma pequena economia no custo de confecção, possui um diferencial que ratifica sua viabilidade. Ele possui uma tampa removível que, além de garantir uma excelente vedação, facilita o manuseio do material na parte interior, colaborando para a retirada de todo o material e limpeza do biodigestor após sua utilização.

Além disso, realizou-se um teste de chama, que funcionou como uma análise preliminar para verificação do biogás produzido em cada biodigestor. Apesar do teste ter sido com o biogás “sujo”, ou seja, sem ter passado pelo processo de purificação, foi perceptível a concentração de metano (CH_4) devido a chama com tom azulado. A partir desse teste, o biogás foi coletado para realizar uma análise cromatográfica, onde foi possível verificar a concentração de cada componente do biogás. A análise corroborou com o teste de chama, verificando uma presença majoritária de metano.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Replicar a ideia desses protótipos em biodigestores de grande porte;
- Realizar um estudo para verificar o volume de produção necessário para abastecer uma residência;
- Aplicar um método de purificação para produção de biometano;
- Realizar uma análise exergoambiental para verificar possíveis impactos ambientais na produção de biometano;
- Realizar uma análise exergoeconômica com a finalidade de avaliar os custos na confecção dos protótipos de biodigestores;

REFERÊNCIAS

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/ABRELPE%20%20Panorama2012.pdf>
- ABISOLO - Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal. 2016. Disponível em: . Acesso em: 5 fev. 2018
- AMIDPOUR, M.; MANESH, M. H. K. Cogeneration and polygeneration systems. Academic Press. Londres. 2021.
- BIELLO, David. Qual a relação entre mudanças climáticas e tornados? Scientific American Brasil, 2018. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/noticias/qual_a_relacao_entre_mudancas_climaticas_e_tornados_.html. Acesso Jul. 2018.
- BORSCHIVER, S.; SILVA, A.L.R. Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA – COBEQ, 20, 2014, Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis, SC: 2014. 9 p.
- BRANCHER, M. Avaliação da degradação fotocatalítica de H₂S em um reator anular. 2012. 116 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- BRANCO, M. S. R. C. Avaliação do impacto da presença de siloxanos em sistemas de aproveitamento de biogás. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente, Perfil Engenharia Sanitária)-Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.
- CENDOFANTI, A. C. Minimização de resíduos de um processo de carvão ativado e de goma resina. 2005. 112 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- COLTURATO, L. F. D. B. Dessulfuração de Biogás da Metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S. 2015. 224 p. Tese, Doutorado em

Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte. 2015.

COONEY, C. L.; WISE, D. L. Thermophilic Anaerobic Digestion of Solid Waste for Fuel Gas Production. *Biotechnology and Bioengineering*, v. XVII, p. 1119-1135. 1975.

FRAZIER, R. S.; HAMILTON, D.; NDEGWA, P. M. Anaerobic Digestion: Biogas Utilization and Cleanup. Oklahoma Cooperative Extension Service. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources. 2011. 4 p. Disponível em: <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-7877/BAE-1752web.pdf>
Acesso em: 18 Maio. 2022.

GASPAR, R. M.B. L. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR. 2003. 119 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2003.

GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. Nunes; SANTOS, M. M. dos; JOPPERT, C. L. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo. 2018.

GODOY JUNIOR, E. Estado da arte dos sistemas de dessulfurização, desumidificação e descarbonatação do biogás: panorama nacional e internacional. SANergya: 2015.

HAHN, H. & HOFFSTEDE, U. Assessment report on operational experience. Biogasmax – Integrated Project n° 019795. Nov. 2010.

HORIKAWA, M. S.; ROSSI, F.; GIMENES, M. L.; COSTA, C. M. M.; DA SILVA, M. G. C. Chemical absorption of H₂S for biogas purification. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. v. 21 n. 03. Jul/Sep, p. 415 – 422. 2004.

ICLEI. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil. São Paulo. 2009.

JØRGENSEN, P. J. Biogas– green energy. Plan Energi and Researcher for a Day. Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University. 2009. 36 p.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*. V. 338. 2005. p 3– 14.

KOHL, A.; NEILSEN, R. Gas Purification, 5th edition, Gulf Professional Publishing, Houston, Texas. 1997.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Sbera e Embrapa. Concórdia. 2022.

LABATUT, R. A.; ANGENENT, L. T.; SCOTT, N. R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates biological and environmental Engineering. Bioresource Technology, v. 102. p. 2255–2264. 2011.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; DUNLAP, P. V.; CLARK, D. P.; MAGALHÃES, E. A.; SOUZA, S. N. M.; AFONSO, A. D. L.; SILVA, J. N. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO₂. 2006. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v. 14, n. 4, p. 226-237, Out./Dez. 2006.

MERSCHMANN, P. R. C. Análise do potencial técnico e de mercado de uso industrial de CO₂ de destilarias de etanol do Centro-Sul do Brasil. 2014. 281 p. Tese, Doutorado em Ciências e Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro. 2014.

MIYAWAKI, B. Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais. 2014. 137 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

MOURA, J. Estudos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor. 2012.

OLIVEIRA, M. M. de. Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.

ORTOLANI, A.F.; BENINCASA, M.; LUCAS JUNIOR, J. Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 03 p.

PETERSSON, A.; WELLINGER, A. Biogas upgrading Technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy. Task 37: Energy from biogas and landfill gas. Out. 2009. 20 p. 2009.

POLPRASERT, Chongrak. Organic Waste Recycling: Technology and Management. 3rd Edition. London: IWA Publishing, 2007.

ROYA, B.; FREITAS, E.; BARROS, E.; ANDRADE, F.; PRAGANA, M.; SILVA, D. J. A. Biogás – uma energia limpa. Revista Eletrônica Novo Enfoque, n. 13, p. 142 – 149. 2011.

RUTHVEN, D. M. Principles of adsorption and adsorption process. United States of America: Wiley. Interscience Publication, p. 1 – 13, 221 – 270. 1984.