



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

Análise das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto

Autor:

JÚNIOR, Zeferino Alberto Mate

Supervisor:

Doutor Paxis Roque, Eng^o

Maputo, Junho de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

Tema: Análise das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto

Autor: JÚNIOR, Zeferino Alberto Mate

Supervisor: Doutor Paxis Roque, Eng^o

Maputo, Junho de 2022

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Zeferino Alberto Mate Júnior entregou no dia ___/___/2022 as 3 cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____, intitulado: Análise das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto

Maputo, ___ de _____ de 2022

O chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura foi realizado por mim, com base nos recursos que no mesmo se faz referência.

(Zeferino Alberto Mate Júnior)

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho aos meus pais e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que permitiu que fosse possível chegar até aqui. Ao meu pai e à minha mãe meu pai, que sempre estiveram do meu lado me apoiando e me dando forças para que eu realizasse os meus sonhos sem nunca medir esforços. Aos meus irmãos que estiveram ao meu lado durante essa jornada. À faculdade de engenharia, em especial aos professores e colegas que muito contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica nesses anos de faculdade. Ao meu supervisor pelo apoio e suporte na elaboração do presente trabalho, Aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado me dando forças e confiança para que tudo isso fosse possível.

RESUMO

O presente trabalho é referente a avaliação das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto. O presente trabalho será constituído por três etapas, sendo a primeira a construção de um mini biodigestor, a segunda etapa consiste em fazer análise das propriedades do biogás produzido e a última etapa consiste em fazer análise comparativa das propriedades do biogás e o cálculo do poder calorífico do mesmo.

O biodigestor é uma alternativa interessante para as questões ambientais, pois utiliza resíduos que seriam dispensados como lixo para gerar energia, bem como a possibilidade da utilização do lodo como fertilizante, apresenta um índice de poluição baixo e é aplicável em diversas situações pois pode ter uma construção simples e dimensões reduzidas.

Para a execução dos experimentos foram utilizados 5 reatores, operados de forma descontínua tendo sido inserido substrato uma única vez. Ao término dos experimentos, que duraram 17 dias, fez-se a análise do biogás formado por cada substrato, os resultados foram comparados e calculou-se o seu poder calorífico.

Palavras chave: Biogás, digestor anaeróbio, resíduo alimentar, gás metano.

ABSTRACT

The present work refers to the evaluation of the properties of biogas produced through different substrates from the wholesale market of Zimpeto. The present work shall be three stages, the first being the construction of a mini biodigester with easy-to-reach material, the second stage is to analyse the biogas properties and the last stage consists of a comparative analysis of biogas properties and calculating heat power.

Biodigester is an alternative interesting for environmental issues, as it uses products that would be dismissed as wastes to generate energy, as well as the possibility of using the sludge as fertilizer, has a low pollution index is applicable in several situations.

For the execution of the experiments, five reactors operated in a discontinuous manner had been inserted once. At the end of the experiments that lasted 17 days, made whether the biogas analysis formed by each substrate, the results were compared and calculated the calorific power.

Keywords: biogas, anaerobic biodigester, food residue, methane gas.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÕES	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE GRÁFICOS	xii
CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e Delimitação do Tema	1
1.2. Objectivos	2
1.2.1. Objectivo geral	2
1.2.2. Objectivos específicos	2
1.3. Metodologia	2
CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Energia e sua importância	3
2.1.1. Fontes de energia	3
2.2. Problemas decorrentes do uso de combustíveis fósseis	5
2.3. Biomassa	6
2.4. Biogás	8
2.6. Aplicação do biogás	11
2.7. Limpeza do biogás	12
2.8. Biofertilizante	12
2.9. Equivalência e conversão energética do biogás	13
2.10. A diferença entre gás natural e biogás	14
2.11. Formação do biogás	15
2.12. Substratos	18
2.13. Como escolher o substrato para produzir biogás	18
2.14. Impacto do substrato sobre os microrganismos	18
2.15. Matéria seca e conteúdo orgânico	20
2.16. Composição do substrato	20
2.17. Fatores que Influenciam na Digestão Anaeróbia	21
2.17.1. Temperatura	21
2.17.2. Tempo de retenção	22
2.17.3. Alcalinidade e pH	22

2.17.4. Teor de água	22
2.17.5. Inoculação	22
2.17.6. Toxicidade	23
2.18. Biodigestores	24
2.19. Modelos de biodigestores	24
2.19.1. Modelo Indiano	24
2.19.2. Modelo Chinês	25
2.19.3. Modelo Canadense ou de fluxo tubular	26
2.19.4. Biodigestor modelo Marinha Brasileira	27
2.20. Tipos de Biodigestores	28
2.20.1. Batelada	28
2.20.2. Contínuo	28
2.20.2.1. Contínuo vertical	29
2.20.2.2. Contínuo horizontal	29
CAPÍTULO III. EXPERIMENTO	29
3.1. Escolha do tipo de Biodigestor	29
3.2. Dimensionamento e Caracterização do Biodigestor	29
3.3. Construção dos mini biodigestores	31
3.4. Montagem dos mini biodigestores	32
3.5. Substratos utilizados e origem	33
3.6. Operação do Biodigestor	34
3.7. Qualificação do biogás	37
CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39
4.1. Avaliação da produção do biogás	39
4.2. Determinação do poder calorífico do biogás	44
4.2.1. Determinação do poder calorífico inferior do biogás	45
4.2.2. Determinação do poder calorífico superior do biogás	46
CAPÍTULO V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
5.1. Conclusões	49
5.2. Recomendações	49
CAPÍTULO VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIACÖES

H₂ - Hidrogénio

N₂ - Nitrogénio

O₂ - Oxigénio

H₂S - Ácido sulfídrico

NH₃ - Amónia

CO - Monóxido de carbono

PC - Poder calorífico (kJ·m⁻³)

PC_B - Poder calorífico do biogás (kJ·m⁻³)

ρ_{CH₄} - Peso específico do metano (kg·m⁻³)

PC_{CH₄} - Poder calorífico do metano (kJ·kg⁻¹)

PC_{IB} - Poder calorífico inferior do biogás (kJ·m⁻³)

PC_{SB} - Poder calorífico superior do biogás (kJ·m⁻³)

NaCO₃ - Tamponamento

Fi - Fator de Inoculação

MO - Matéria Orgânica

pH - Potencial Hidrogeniônico

PTM - Peso total da mistura (kg)

RSO - Resíduo Sólido Orgânico

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

ST - Sólidos Totais

Sti - Sólidos totais do inoculante

STs - Sólidos totais do substrato

SV - Sólidos Voláteis

SVT - Sólidos Voláteis Totais

TDH - Tempo de Detenção Hidráulico

PVC – Policoreto de vinila

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Ciclo de transformação da biomassa.....7

Figura 2.2 - Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos.....7

Figura 2.3 - Recursos energéticos de Moçambique.....8

Figura 2.4 - Etapas e fases de produção do biogás.....18

Figura 2.5 - Biodigestor indiano.....25

Figura 2.6 - Biodigestor chinês.....26

Figura 2.7 - Biodigestor modelo Canadense.....27

Figura 2.8 - Biodigestor modelo Marinha.....28

Figura 3.1- Mini biodigestores montados em paralelo.....33

Figura 3.2 - Vista em corte do mini biodigestor.....35

Figura 3.3 - Mini biodigestores operando em paralelo alimentados com os substratos.....36

Figura 3.4 - Situação dos biodigestores após 6 dias de operação.36

Figura 3.5 - Situação dos biodigestores após 14 dias de operação.....37

Figura 3.6 - Equipamento usado pra determinar a composição do biogás.....38

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição típica do biogas.....9

Tabela 2.2 - Equivalência Energética entre 1 m³ de biogás e outras fontes de energia.....13

Tabela 2.3 - Comparação entre o gás natural e o biogás.....15

Tabela 3.1 - Material para a montagem do mini biodigestor.....32

Tabela 4.1 - Resultados experimentais.....40

Tabela 4.2 - Resultados do cálculo do poder calorífico inferior do biogás.....42

Tabela 4.3 - Resultados do cálculo do poder calorífico superior do biogás.....47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Composição do substrato.....21

Gráfico 4.1 - Quantidade de biogás produzido por cada tipo de substrato.....41

Gráfico 4.2 - Percentagem de CH₄, CO₂ e O₂ no biogás de cada tipo de substrato.....42

Gráfico 4.3 - Quantidade de CO no biogás de cada tipo de substrato.....43

Gráfico 4.4 - Quantidade de H₂S no biogás de cada tipo de substrato.....44

Gráfico 4.5 - Gráfico demonstrativo do poder calorífico inferior do biogás de cada tipo de substrato.....46

Gráfico 4.6 - Gráfico demonstrativo do poder calorífico superior do biogás de cada tipo de substrato.....47

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e Delimitação do Tema

A luta global tem como foco fazer de tudo para que as futuras matrizes energéticas reflitam ações que diminuam em ritmo crescente a queima do petróleo, gás natural, carvão e combustíveis de origem não renovável, na busca de minimizar a concentração de dióxido de carbono emitido para a atmosfera.

Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em regiões isoladas da rede elétrica. Neste contexto, foi analisada a alternativa da produção de biogás como combustível a partir do uso de biodigestores, considerando a facilidade de obtenção de matéria prima (biomassa) para o processo e a flexibilidade de operar com geração constante ou variável.

A fermentação da biomassa em reatores anaeróbios apresenta uma excelente alternativa, pois além de reduzir a taxa de poluição e contaminação do ciclo produtivo, promove a geração do biogás, utilizado como fonte de energia térmica, mecânica e elétrica, permitindo ainda a utilização do resíduo final como biofertilizante. Ressalta-se a existência de diversas vantagens para o uso de biodigestores, como a redução da carga de matéria orgânica lançada no meio ambiente, controle da proliferação de insetos e emissão de odores ofensivos e desagradáveis, diminuição da emissão de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) na atmosfera através da queima, além do melhor aproveitamento dos dejetos de natureza orgânica (Amaral et al 2004).

É importante que as pessoas estejam sientes dos impactos ambientais causados pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, seu possível agravamento no aquecimento global. Deste modo, propõe-se a destinação e tratamento dos resíduos sólidos orgânicos provenientes diariamente do mercados como matéria-prima no processo de produção de biogás.

O presente trabalho tem como foco verificar a qualidade do biogás gerado pelos diferentes resíduos orgânicos considerados inúteis no mercado grossista de Zimpeto.

Será empregue um mini biodigestor de alimentação descontínua por batelada, que permita a produção e colecta do gás para a posterior análise da sua composição.

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo geral

- Analisar as propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto.

1.2.2. Objectivos específicos:

- Construção de mini biodigestore;
- Determinar a composição do biogás produzido através de diferentes substratos;
- Calcular o poder calorífico do biogás ;
- Fazer análise comparativa dos resultados.

1.3. Metodologia

De modo a se alcançar os objectivos acima mencionados, serão realizadas as seguintes actividades:

- Revisão bibliográfica: que consiste na obtenção de informações em manuais científicos e técnicos, revistas e relatórios sobre biodigestores e digestao anaerobica;
- Realização de experimentos.

CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia e sua importância

Energia é um recurso fundamental para o sustento da vida no planeta. Sua escassez é tida como tema em discussões envolvendo a sociedade atual, a indústria e as lideranças governamentais.

O avanço da sociedade tem sido apontado como principal motivo para o aumento do consumo de recursos naturais, causando sua escassez. Esse fato torna fundamental a busca por formas mais eficientes de extração, aproveitamento, manejo e utilização de tais recursos. A busca por fontes de energias mais eficientes, que causem o mínimo de impacto ao meio ambiente, é o principal objetivo de muitos estudos relacionados à área de energias (Goldenberg et al., 2010).

A população mundial consumiu cerca de 522,3 EJ (Exajoules) de energia, sendo que cerca de 91% provém de recursos não renováveis, e apenas 8,6% são obtidos de fontes renováveis. Nos países desenvolvidos, a participação de energias renováveis na matriz energética não foi superior a 5%, em decorrência do baixo custo e disponibilidade das fontes não renováveis.

2.1.1. Fontes de energia

A matriz energética representa a oferta de energia disponível em cada país, como por exemplo: os combustíveis fósseis e atualmente biomassa como fonte de energias renováveis. A análise das mesmas é de grande importância para o planejamento do setor que tem com objetivo garantir a produção e seu uso adequado, permitindo, inclusive, as projeções futuras.

Fonte de energia é um recurso natural que pode fornecer ao Homem determinado tipo de energia e sua substância transformadora. A natureza, em certas circunstâncias, pode fornecer recursos naturais que dão origem a um determinado tipo de energia, nomeadamente energia mecânica, eléctrica, térmica ou química.

As fontes de energia são um dos elementos importantes e indispensáveis à nossa vida quotidiana e ao desenvolvimento económico, para além de serem extremamente importantes para a melhoria da qualidade de vida (Jorge 2017).

2.1.1.1. Fonte primária

A fonte de energia primária, também conhecida por fonte de energia natural, é uma fonte de energia que existe em forma nata na natureza e pode gerar energia de forma directa, destas destacam-se o carvão mineral, o petróleo e o gás natural, a energia hídrica, solar e eólica, de biomassa, oceânica e geotérmica (Jorge 2017).

2.1.1.2. Fonte secundária

As fontes de energia secundárias são transformadas a partir das fontes de energia primárias, como por exemplo a energia eléctrica, gasolina, gásóleo, alcatrão, carvão mineral, vapor, entre outros (Jorge 2017).

2.1.1.3. Final

Energia Final é a quantidade de energia consumida pelos diversos sectores da economia, para satisfazer as necessidades dos diferentes usos, como calor, força motriz, iluminação, etc. Não inclui nenhuma quantidade de energia que seja utilizada como matéria-prima para produção de outra forma de energia.

As fontes de energia também se podem classificar-se em função da sua reposição ser maior ou menor que o seu consumo em:

- Renováveis;
- Não Renováveis.

2.1.1.4. Renováveis

As fontes de energia renováveis são uma infinita fonte geradora mesmo que sejam utilizadas pelo Homem, possuindo a capacidade de se regenerar naturalmente. Por exemplo a energia solar, hídrica e eólica, de biomassa, oceânica e geotérmica (Jorge 2017).

Ultimamente muitos países buscam obter uma abrangência quanto a matriz energética, pois por meio de pesquisas concluíram que se depender de uma só fonte de energia pode sofrer escassez no abastecimento futuro ou enfrentar crises económicas que venham desestabilizar completamente o setor. Dentre as várias fontes renováveis, a biomassa é considerada uma das mais promissoras em comparação às demais, onde as crescentes explorações dos recursos naturais estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento das nações. Assim, com o tempo, os países que dispuserem de tecnologias para conversão dessas fontes terão capacidade de se tornar auto-sustentáveis em questões energéticas

2.1.1.5. Não Renováveis

As fontes de energia não renováveis, como o combustível petroquímico e nuclear, são formadas no subsolo a partir de restos de animais e plantas que demoraram milhões de anos até se transformarem em combustível. Estes não podem ser recuperados rapidamente e as suas quantidades tornam-se cada vez mais reduzidas com o consumo por parte do homem (Jorge 2017).

O combustível fóssil, fonte de energia não renovável, representa 85% do consumo mundial de energia e esse consumo vem crescendo a cada ano. Essa é uma situação que não pode continuar por muito tempo, devido não apenas à escassez gradativa das reservas de combustíveis fósseis, mas também pelos danos causados ao meio ambiente resultantes do seu uso, destacando-se entre eles, principalmente o aquecimento global.

O consumo excessivo das energias não renováveis tem sido um assunto bastante discutido, principalmente pelo uso exagerado que contribui com o desmatamento, degradação do solo e principalmente com a poluição. Várias conseqüências provocadas por essas fontes são bem conhecidas pela humanidade, bem como as alterações climáticas e o conseqüente aquecimento global do planeta, contribuindo para o efeito estufa que tem como o metano CH₄ e o dióxido de carbono CO₂, seus principais vilões (Goldenberg et al., 2010).

Há algum tempo atrás, num passado não muito remoto, não havia grande preocupação por parte de líderes mundiais com as fontes de energia convencionais, pois estas eram acessíveis e abundantes e também não existia grande preocupação por parte dos mesmos em relação à poluição, visto que há pouco tempo esse fato tem se tornado alarmante.

Em contrapartida houve uma mudança acentuada a partir da década de 1970, onde foi deflagrada a crise do petróleo. Nessa época, nações árabes, principais produtores de petróleo, resolveram usar seus produtos como arma econômica, deixando claro para os exportadores que o aumento do preço não dependia apenas do esgotamento do mesmo, mas também da vontade de seus produtores de vender (Goldenberg et al., 2010).

De acordo com (Lucas Silva 2006), nas décadas de 1970 e 1980 houve um elevado preço da energia internacional decorrente da situação do petróleo na época. Com as incertezas de abastecimento de energia muitos países buscaram estratégias de racionamento e desenvolvimento de fontes alternativas, para garantir as necessidades básicas de consumo. Evidentemente, as grandes guerras foram geradas principalmente na busca de dominar áreas produtoras dessas fontes. Diante disso, qualquer questão energética tornava-se extremamente preocupante e ameaçadora para qualquer governo.

2.2. Problemas decorrentes do uso de combustíveis fósseis

A problemática dos combustíveis fósseis é evidenciada pelos investimentos cada vez mais elevados para extração, e pela exaustão das reservas desses recursos. Nesse contexto, fica clara a importância em buscar e desenvolver energias renováveis, que contribuam para a redução da

dependência imposta pelo petróleo, já que o mesmo impacta o meio ambiente, seja pela sua extração, ou seja pela poluição decorrente do seu uso.

Nos anos 70, quando ocorreu a primeira crise do petróleo, alguns países implementaram um programa que incentivava o uso do etanol como alternativa à gasolina, foi muito promissor no início. Após alguns anos, promoveu uma série de problemas, como elevação da dívida pública, em função dos benefícios concedidos aos produtores de cana-de-açúcar, aumento de latifúndios e a elevação nos preços de alguns alimentos. Em 1990, a queda do valor do barril de petróleo contribuiu para o retorno dos veículos movidos a gasolina. Na década de 1990, em razão da preocupação com a preservação da qualidade do meio ambiente, principalmente com vista para o controle do aquecimento global, a busca por fontes de energia alternativas voltou à tona no mundo inteiro.

2.3. Biomassa

Todas as plantas e animais do sistema ecológico pertencem à biomassa. Além disso, nutrientes, dejetos e bio-resíduos são considerados biomassa. Apesar da biomassa ser rica em carbono a mesma não é considerada um fóssil. O termo biomassa se refere a um vasto campo de materiais, com variadas e infinitas finalidades, podendo ser utilizada como combustível ou até mesmo como matéria prima, pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de 28 vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais, por exemplo, mamona e soja.

A biomassa é um tipo de matéria utilizada na produção de energia a partir de processos como a combustão de material orgânico produzida e acumulada em um ecossistema, porém nem toda a produção primária passa a incrementar a biomassa vegetal do ecossistema. Parte dessa energia acumulada é empregue pelo ecossistema para sua própria manutenção. Suas vantagens são o baixo custo, é renovável, permite o reaproveitamento de resíduos e é menos poluente que outras formas de energias como aquela obtida a partir da utilização de combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral (Jorge 2017).

A queima de biomassa provoca a libertação de dióxido de carbono na atmosfera, mas como este composto havia sido previamente absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, o balanço de emissões de CO₂ é nulo (Jorge 2017).



Figura 2.1 – Ciclo de transformação da biomassa.

Fonte: (21)

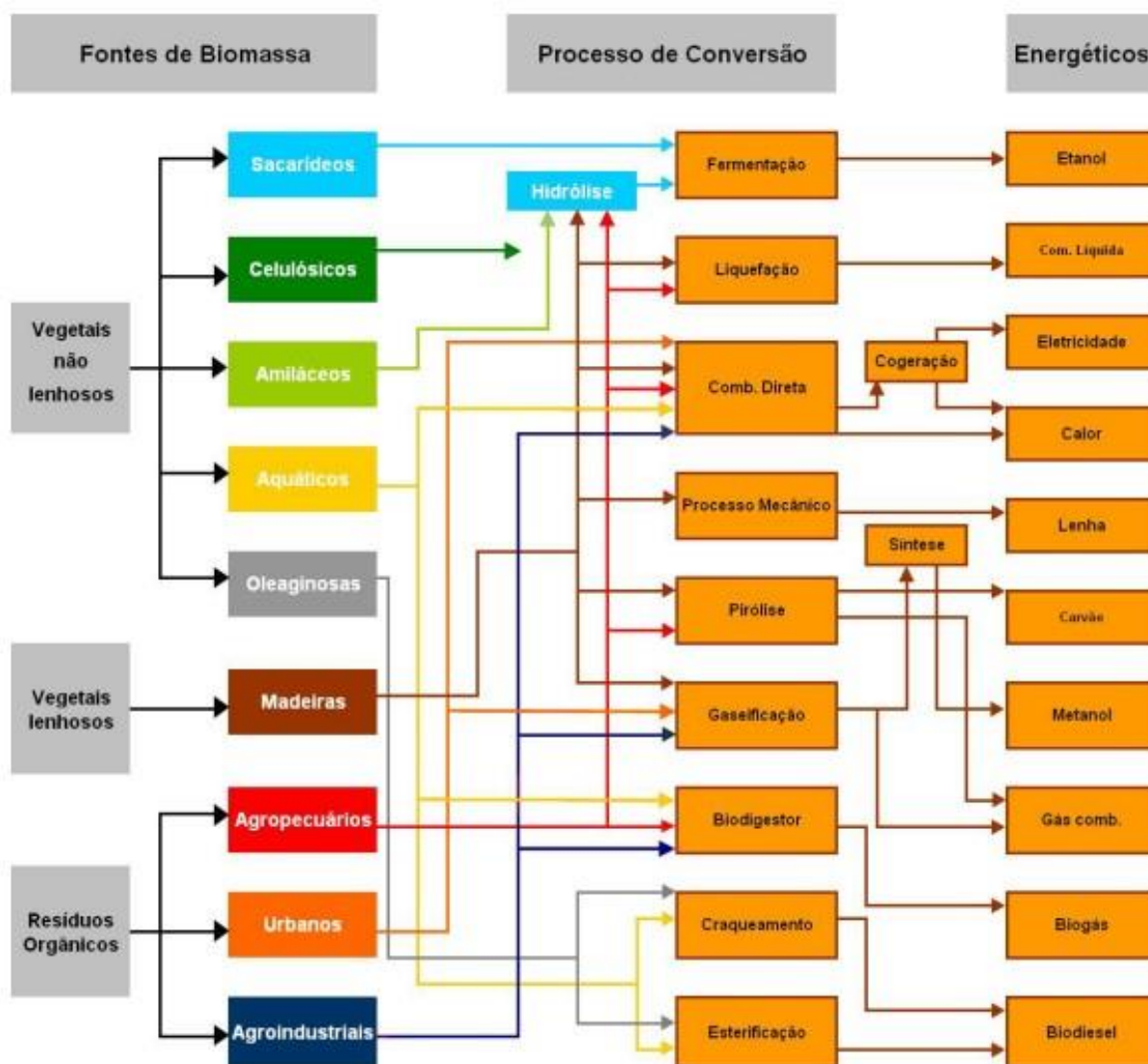


Figura 2.2 - Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos.

Fonte: (3)

Moçambique tem diferentes recursos de biomassa e resíduos sólidos urbanos (RSU) disponíveis para a produção de electricidade. Desde a biomassa florestal com um potencial de 1 GW, com destaque para as províncias da Zambézia, Niassa e Manica, passando pelas açucareiras com um potencial de projectos na ordem dos 0,8 GW, até aos 63 MW em projectos de incineração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). De destacar as explorações florestais em redor de Lichinga, o palmar doente e indústria do arroz em Quelimane, as 4 açucareiras existentes e ainda o novo aterro de Maputo/Matola onde se identificaram 128 MW de potenciais projectos no curto prazo (Atlas de energias renováveis de Moçambique).



Figura 2.3 – Recursos energéticos de Moçambique.

Fonte: (21)

2.4. Biogás

O biogás é um gás resultante da fermentação anaeróbia (em ausência de oxigênio livre do ar) da matéria orgânica. Resíduos vegetais e dejetos de animais, como suínos, aves e bovinos de leite, podem ser tratados com sucesso em biodigestores, produzindo biogás e biofertilizante (subproduto do processo), reduzindo o poder poluente que o despejo na natureza dos resíduos causa ao meio ambiente.

De forma geral, o biogás é composto, principalmente, pelos gases:

O biogás é um gás insolúvel, incolor, de baixa densidade e de modo geral inodoro, desde que não contenha impurezas em quantidade demasiada. É constituído basicamente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e outros gases em baixas concentrações como hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e monóxido de carbono (CO) (Cassini et al 2014).

Os principais componentes do biogás são o gás metano (50% a 90% do biogás) e o gás carbônico. Quanto maior o teor de metano, mais puro é o biogás. O gás sulfídrico, também formado no processo de fermentação, é responsável pelo odor pútrido do gás e pode ocasionar corrosão nos componentes do sistema. A proporção dos gases na mistura se modifica de acordo com o manejo aplicado.

Tabela 2.1 - Composição típica do biogás.

Gás	Símbolo	Concetração de biogás (%)
Metano	CH ₄	50 – 90
Dióxido de carbono	CO ₂	10 – 50
Gás Sulfídrico e outros	H ₂ S, CO, NH ₃ , N ₂ , O ₂	1 – 5

Fonte: (17)

Com forte aplicação no setor agroindustrial, o uso do biogás como matéria prima para a geração de energia elétrica está diretamente ligado à sustentabilidade e tem se mostrado muito interessante, tanto para geração de energia elétrica como alternativa para a disposição de resíduos sólidos e efluentes orgânicos (Lora & Venturini et al., 2012).

Embora a primeira planta destinada para a produção de biogás tenha surgido em meados do século XIX, o biogás já é conhecido e utilizado há muitas décadas. Relatos do pesquisador italiano Alessandro Volta, datados de 1776, evidenciando a descoberta de gás metano incorporado nos “gases dos pântanos”. Esse metano era resultado da decomposição de restos de vegetais em ambientes confinados com ausência de oxigênio.

Sganzerla (1983) cita a cidade de Bombaim como berço do biodigestão, tendo documentos que apontam a instalação de um biodigestor no início do século XIX. Ainda em 1950, um biodigestor de alimentação contínua foi instalado por Patel na Índia. Na década de 60, Fry, um fazendeiro na África do Sul, desenvolveu estudos com biodigestores.

A China implantou os biodigestores buscando utilizar o biofertilizante produzido para suprir a demanda na produção de alimentos, enquanto a Índia buscou suprir o déficit energético no país, surgindo assim 2 modelos diferentes de biodigestores.

O uso de resíduos para geração de biogás traz vários benefícios diretos. Goldemberg & Paletta et al. (2012) consideram como benefícios diretos a diminuição da emissão de gases de efeito estufa

a preservação do solo, mananciais e águas subterrâneas, bem como a redução do volume de resíduos enviados para aterros sanitários ou industriais. Estas características contribuem para redução de impactos locais, regionais e globais. Atrelados os benefícios diretos, também se destacam os benefícios indiretos, como incentivos ao desenvolvimento tecnológico e geração de empregos (Lora & Venturini et al., 2012). Um ponto negativo do biogás é a densidade baixa do metano, que dificulta sua liquefação, fazendo com que ocupe volumes elevados, dificultando o armazenamento e transporte.

2.5. Vantagens e Desvantagens do biogás

Vantagens:

Em termos de tratamento de resíduos:

- E um processo natural para tratar resíduos orgânicos;
- Requer menos espaço que aterros sanitários ou compostagem;
- Diminui o volume de resíduo a ser descartado;

Em termos de energia:

- E uma fonte de energia renovável;
- Produz um combustível de alta qualidade, através deste processo evita-se a libertação de metano para a atmosfera que provoca um aumento do efeito estufa;

Em termos ambientais:

- Reaproveitamento da matéria orgânica;
- Produz como resíduo um biofertilizante, rico em nutrientes e livres de microrganismos patogénicos;
- Reduz significativamente a quantidade emitida para a atmosfera de metano;

Em termos económicos:

- Apesar do elevado custo inicial, numa perspetiva a longo prazo resulta uma grande economia, pois reduz, gastos com eletricidade, esgotos descarte de resíduos, etc.

Desvantagens:

- Caso a biodigestão não esteja a funcionar corretamente, produz-se gás sulfídrico (H₂S), um gás tóxico;

- Escolha mais cuidada do material a utilizar na construção do biodigestor, pois há formação de gases altamente corrosivos durante a formação do gás;
- Custo inicial e possível manutenção de equipamentos podem ser elevados.

2.6. Aplicação do biogás

Devido ao elevado poder calorífico do biogás, muitos aterros sanitários no mundo, além da sua simples queima, vem implantando unidades de geração de energia elétrica.

Existem outras formas de se utilizar o biogás tanto em sistemas de calefação como combustível veicular, necessitando de instalação de uma unidade de beneficiamento para aumentar o teor de metano do biogás.

O biogás tem inúmeras aplicações, podendo ser usado como fonte de energia para aquecimento e movimentação mecânica nas instalações rurais, diminuindo os custos na propriedade e evitando o descarte impróprio de resíduos.

Cada 1 m³ de biogás equivale a 0,66 litros de diesel ou 0,7 litros de gasolina, possuindo um poder calorífico entre 5 000 a 7 000 kcal/m³ de gás. A escolha de um biodigestor adequado é o principal fator para um desenvolvimento e processo apropriados, de modo que haja compatibilidade entre as características da biomassa utilizada e o biodigestor considerado.

O biogás pode ser utilizado de várias maneiras e cada um desses usos exige uma qualidade e um grau de tratamento para o gás. Os possíveis usos em ordem de exigência de qualidade são: combustão direta, aproveitamento térmico, aproveitamento elétrico, injeção na rede de gás e como combustível (José 1981).

Em indústrias que aproveitam o biogás como combustível em caldeiras para obtenção de vapor, cada metro cúbico de biogás utilizado é economizado aproximadamente 0,8L de gasolina, 1,3L de álcool, 1,4 kg de carvão vegetal ou 2,7kg de madeira.

O processo de queima do biogás é prejudicado por substâncias presentes em sua composição, como água e CO₂, pois as mesmas absorvem parte da energia gerada. Para evitar problemas de combustão por essas substâncias ou de corrosão por H₂S ou NH₃, é recomendada a lavagem do biogás (Lora & Venturini et al., 2012).

O biogás é uma fonte de energia alternativa que tem ganhado força nas últimas décadas, por ser uma fonte de energia limpa, de baixo custo e que contribui com a redução do volume de resíduos sólidos encaminhados para aterros. Porém, (Lora & Venturini et al., 2012) salientam, que a utilização do biogás não deve ser tida como a solução para os problemas energéticos de um país,

mas como uma complementação para a matriz atual, que deve ser composta por várias fontes alternativas.

2.6.1. Purificação do biogás

A purificação do biogás consiste na remoção de sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, a partir da dissolução dos gases H_2S e CO_2 por meio de lavagem com água pressurizada.

2.6.2. Produção de calor

Utilizar o biogás para produção de calor é a maneira mais fácil e barata de aproveitá-lo. Nesse caso, o biogás é queimado em uma caldeira, que está ligada a um tanque de armazenamento. Também é possível utilizar o biogás como fonte de energia para cocção e fins domésticos.

2.6.3. Cogeração

Geralmente, as plantas de biogás visam à produção de eletricidade e calor a partir de um motor tipo Otto ou similar. Ao operar um motor de combustão interna, cerca de 30% do biogás são convertidos em eletricidade e os restantes 70% representam o calor.

2.7. Limpeza do biogás

O biogás pode ter seu poder calorífico elevado quando submetido a tratamento limpeza para eliminar as impurezas e remover as substâncias que conferem características corrosivas, como o gás sulfídrico e a água.

Um processo simples, de fácil implantação e barato para remoção total do gás sulfídrico é o emprego de limalhas de ferro em um recipiente para passagem do biogás, pois o gás sulfídrico reage com o óxido de ferro, formando sulfeto. Esta técnica possibilita a remoção total do gás sulfídrico existente no biogás. A aplicação de glicóis sílica gel é uma técnica eficiente para a remoção de umidade presente no biogás, contribuindo para o rendimento calorífico.

2.8. Biofertilizante

Após a realização do processo de digestão, o substrato pode ser retirado do biodigestor na forma de biofertilizante, por ser rico em nutrientes. Conforme (Barichello et al., 2015), o biofertilizante contribui para o desenvolvimento das bactérias presentes no solo, fazendo com que as lavouras apresentem incremento na produtividade. Contudo, cabe ressaltar que o teor de nutrientes contido no biofertilizante é dependente do substrato utilizado no biodigestor (KARLSSON et al., 2014).

O poder de poluição do substrato pode ser reduzido através da digestão anaeróbia. Além de o teor de carbono ser reduzido, também ocorre o aumento no teor de nutrientes, devido à conversão de carbono em CH_4 . O pH do biofertilizante é em torno de 7,5, tornando-o apto para a correção da

acidez do solo. Isto ocorre através da eliminação do alumínio e liberação do fósforo componente dos sais insolúveis de alumínio e ferro, o que dificulta a propagação fungos patogênicos no solo.

A utilização de biofertilizantes enriquece a qualidade do solo, tornando menos dificultosa a penetração das raízes. Além disso, também melhora absorção de umidade do subsolo, tornando o solo mais resistente a períodos de estiagem. Segundo Karlsson, a utilização de biofertilizante tem proporcionado rendimentos muito próximos aos obtidos com aplicação de fertilizantes químicos. Quando disposto o biofertilizante no solo durante a semeadura, se obtém incremento de 20 cm nas plantas.

2.9. Equivalência e conversão energética do biogás

Segundo CCE (2000) citado por MAGALHAES et al. (2005), o metano puro, em condições normais (pressão a 101,325 kPa e temperatura de 0°C), possui poder calorífico equivalente a 35 640 kJ·m⁻³. O biogás, com teor de metano variando entre 50% e 80%, possui poder calorífico inferior PC_I entre (17 880 e 28 440) kJ·m⁻³. Assim, afirmou que a cada 10% de CO₂ na mistura gasosa de biogás corresponde a, aproximadamente, 3 600 kJ·m⁻³ a menos em seu poder calorífico. Para efeito de cálculos, geralmente utiliza-se poder calorífico médio equivalente a 19 800 kJ·m⁻³ de biogás.

O poder calorífico do biogás depende da concentração de metano existente. Normalmente está situado na faixa entre (5 000 e 6 000) kcal/m³. A Tabela a seguir compara a equivalência energética entre 1 m³ de biogás e outras fontes de energia.

Tabela 2.2 - Equivalência Energética entre 1 m³ de biogás e outras fontes de energia

Fonte Energética	Quantidade
Gás de cozinha	0,40 kg
Gasolina	0,61 a 0,70 L
Óleo diesel	0,55 L
Etanol	0,80 L
Carvão Vegetal	0,74 kg
Querosene	0,58 L
Energia Elétrica	1,25 s 1,43 kWh
Lenha	1,60 a 3,50 kg

Fonte: (Autor)

2.10. A diferença entre gás natural e biogás

O gás natural é considerado um combustível fóssil, porque resulta da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, composta por plantas e animais mortos, contidas por milhões de anos no fundo de lagos e mares. Na camada de sedimentos das rochas houve a influência de alta temperatura e pressão, o que deslocou a matéria orgânica para uma camada inferior rochosa, afetando a formação do gás natural por causa da alta pressão e temperatura (Jorge 2017).

A energia que as plantas naturalmente absorvem da luz do sol, é armazenada em forma de carbono, em gás natural. É uma mistura de hidrocarbonetos leves encontrada no subsolo, na qual o metano tem uma participação superior a 70% em volume. A composição do gás natural pode variar bastante dependendo de factores relativos ao campo em que o gás produzido, processo de produção, condicionamento, processamento e transporte.

A maior parte do gás natural foi formado pelo tempo por dois mecanismos: gases biobiogênicos e termogênicos. O gás biogênico é formado a partir de micro-organismos metanogênicos em pântanos ou aterros sanitários. O gás termogênico é formado a partir de material orgânico soterrado em grandes profundidades com grande pressão atmosférica.

Uma alternativa para substituir o gás natural é o biogás. O biogás e o gás natural têm o mesmo processo de formação, por meio da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. A diferença entre eles é que o gás natural não é formado pela circulação do material orgânico presente na superfície terrestre. Com a queima do gás natural, o carbono retorna para seu ciclo na atmosfera e, quando o material orgânico é convertido em biogás, não há liberação adicional de dióxido de carbono, e sim, o aproveitamento do potencial de energia que está armazenado na matéria orgânica.

A matéria orgânica, proveniente da agricultura, tem muito potencial para produção de biogás. Resíduos de atividades agrícolas e os dejetos de suínos, bovinos, aves, ovinos e caprinos são de grande interesse para geração de biogás. É importante que todos os resíduos descartados diariamente nas propriedades sejam reaproveitados pelo processo de digestão anaeróbia para que seja gerado o biogás.

Através da tabela a seguir torna-se possível comparar o gás natural e o biogás no que se diz respeito à descrição, tipo de energia que confere a cada um e as vantagens de se utilizar uma ou outra fonte de energia.

Tabela 2.3 - Comparação entre o gás natural e o biogás.

Combustível	Gás natural	Biogás
Descrição	Mistura gasosa que se encontra, geralmente, junto das jazidas de petróleo	Produzido pela degradação de resíduos orgânicos
Tipo de energia	Fonte de energia não renovável	Fonte de energia renovável e inesgotável
Vantagens	Não libertar fuligens e monóxido de carbono (CO)	Poderá substituir as aplicações do gás natural com as mesmas vantagens de não libertar fuligens e monóxido de carbono (CO) contribuindo para a diminuição dos custos de manutenção e aumentando a vida útil dos equipamentos

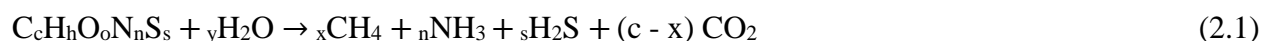
Fonte: (Autor)

2.11. Formação do biogás

O biogás é constituído por uma mistura de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Para que o biogás possa ser produzido a partir de materiais orgânicos, são necessários diferentes grupos de microrganismos, que atuam juntamente com uma série de fatores, como, por exemplo: pH, temperatura e tipo de substrato. Todos esses fatores afetam a composição do biogás produzido. O metano se forma naturalmente o tempo todo, e um fator importante para que haja formação de gás metano a partir de material orgânico é que não tenha presença de oxigênio no ambiente. Como mencionado anteriormente, o biogás se forma a partir de lama de lagos e pântanos e, também, no rúmen de ruminantes. Quanto melhor for a digestão por parte das bactérias produtoras de metano, melhor será a qualidade do biogás produzido. Normalmente é denominado biogás o gás que ainda não passou pelo processo de purificação. Geralmente o biogás bruto é constituído por um terço de metano, um terço de outros gases, como: H_2S , O_2 , NH_3 e um terço de dióxido de carbono. Se o biogás é purificado, ou seja, constituído apenas por metano, pode ser utilizado para geração de energia e como combustível veicular.

A formação do metano ocorre de forma espontânea, quando a biomassa ou matéria orgânica (substrato) composta de carboidratos, lipídeos, proteínas entre outros nutrientes, em ambientes isentos de ar e com umidade, ainda na presença de bactérias, se decompõem formando metano e impurezas.

A formação do biogás a partir da biomassa resulta, em geral, da equação:



O processo de digestão anaeróbio segue quatro fases sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, onde a geração do biogás ocorre na última etapa do processo. Durante o processo de produção, é indispensável que as reações químicas ocorram de forma sinérgica, sendo que as fases 1 - 2 e 3 - 4 possuem uma relação íntima, logo as mesmas são organizadas em dois estágios (I e II), em que os níveis de degradação devem ter o mesmo tamanho (Deublein e Steinhauser 2008).

Hidrólise

Na hidrólise as ligações moleculares complexas como carboidratos, proteínas e gorduras, são quebradas por enzimas em um processo bioquímico, sendo liberadas por um grupo específico de bactérias e dão origem a compostos orgânicos simples (monômeros) como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares como mostrado na equação 2.



Esta etapa é muito importante para uma instalação de biogás, pois o material orgânico submetido ao processo de digestão deve ser quebrado em pequenas moléculas para que os microrganismos consigam se alimentar delas. As bactérias disponíveis no biodigestor também segregam enzimas que rompem as moléculas de proteína e as transformam em aminoácidos, hidratos de carbono em açúcares simples, álcoois e graxas em ácidos graxos. A quebra das moléculas do material orgânico faz com que os microrganismos absorvam as pequenas partes do material orgânico e tirem proveito da energia que nelas estão contidas. A rapidez do processo depende do tipo de material e de como este é estruturado (Tommy et al 2014).

Existem diversos tipos de hidrólise que variam em função da matéria orgânica utilizada, como por exemplo, a hidrólise de glicosídeos para a formação de açúcares e de proteínas para aminoácidos. Esse processo é de fundamental importância para a produção de biogás, pois dada a quebra dos polímeros maiores, inicia-se o processo de biodigestão.

Acidogênese

A segunda etapa do processo de digestão é a fermentação ou acidogênese. O que acontece nesta etapa depende do tipo de material orgânico que é adicionado ao processo de digestão anaeróbia, assim como dos microrganismos que estão disponíveis no sistema. A maioria dos microrganismos

que estava ativa na etapa de hidrólise também estará ativa nesta etapa. Os componentes menores derivados da ruptura de moléculas grandes na hidrólise continuam a ser quebrados em moléculas sempre menores. Nesta etapa, ácidos são formados por meio das reações e dividem-se em ácidos orgânicos, álcoois e amoníaco, além de hidrogênio e dióxido de carbono. Exemplos de ácidos orgânicos são o acético, butírico e láctico. Os produtos formados dependem dos microrganismos disponíveis e de fatores ambientais. Os ácidos graxos formados durante a hidrólise não são quebrados durante a fase de fermentação, e sim, na etapa de oxidação anaeróbia, a terceira etapa da digestão (Tommy et al 2014).

Acetogênese

É a etapa que antecede a formação de gás metano. Nesta etapa, as moléculas, rompidas durante as fases de hidrólise e acidogênese, rompem-se em moléculas ainda menores pela oxidação anaeróbia, sendo necessário que haja boa interação entre os microrganismos produtores de metano.

As bactérias acetogênicas convertem o material degradado nas etapas anteriores em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Entretanto, essas bactérias não são resistentes a grandes quantidades de hidrogênio e, por este motivo, faz-se necessário que as bactérias metanogênicas consumam o hidrogênio.

Metanogênese

Nesta última etapa, também conhecida como metanogênese, tem-se a fase de formação de metano, sendo o metano o produto da reação que mais nos interessa. O metano formado pelos microrganismos metanogênicos necessitam, para sua formação, de ácido acético e CO_2 e de mais alguns produtos de menor importância. São subprodutos das três etapas anteriores, sendo na fase metanogênica também formados dióxido de carbono e água. Infelizmente, os microrganismos metanogênicos são mais sensíveis a interferências do que os microrganismos que atuaram em fases anteriores da digestão anaeróbia, pois não pertencem ao mesmo grupo de microrganismos, chamado Archaea.

As bactérias metanogênicas não são resistentes às perturbações de alterações no pH e substâncias tóxicas, as quais podem ser alteradas ao longo do processo. É importante adaptar o processo para que as bactérias metanogênicas possam sentir-se da melhor maneira possível, pois é o gás metano que gera rentabilidade (Tommy et al 2014).

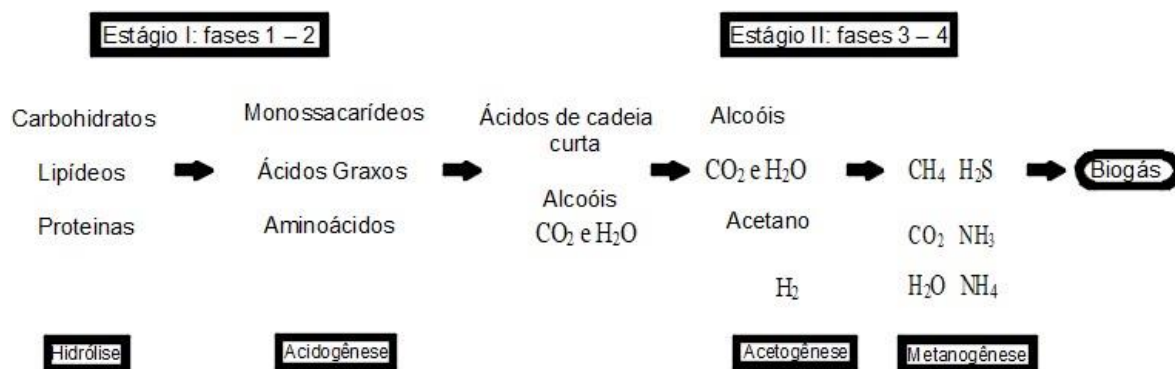


Figura 2.4 - Etapas e fases de produção do biogás.

Fonte: (Autor)

2.12. Substratos

O material fornecido a um processo de biogás e o tipo de substrato a ser utilizado afetam a estabilidade e a eficiência do processo. A composição do substrato é importante para a quantificação e a qualidade do biogás, o que está diretamente ligado à quantidade de nutrientes e contaminantes potenciais (metais, patógenos, contaminantes orgânicos contidos na matéria orgânica). A escolha do material certo influencia no resultado do processo, na maximização da produção de energia e na boa qualidade de biogás.

2.13. Como escolher o substrato para produzir biogás

Diversos materiais orgânicos podem ser decompostos em um biodigestor. Existem alguns materiais que têm mais potencial que outros. Isso porque alguns fatores devem ser levados em consideração, como a quantidade de substrato, a temperatura, o tempo de retenção etc., influenciando o pré-tratamento ao qual o material foi submetido na geração de biogás. Por exemplo, se o material vai ser digerido na presença de outro substrato ou não, pois muitas vezes adiciona-se inóculo para acelerar o processo de decomposição. A presença de substâncias tóxicas e lignina, que não são metabolizadas em um processo de digestão anaeróbia, também são limitantes na produção de biogás.

2.14. Impacto do substrato sobre os microrganismos

A composição do substrato é muito importante para os microrganismos do processo e, portanto, também para a estabilidade e a produção de gás. O substrato deve atender às necessidades nutricionais dos microrganismos, ou seja, contém energia e componentes necessários para os reproduzir. O substrato deve conter vários componentes que são necessários para a atividade dos microrganismos nos processos enzimáticos, tais como oligoelementos e vitaminas. Na produção

de biogás um fator de extrema importância a ser levado em conta é a relação carbono: nitrogênio (C:N). É importante que essa relação não esteja muito baixa e que a proporção de nitrogênio seja inferior a de carbono. O processo pode ser facilmente afetado em razão da inibição das bactérias causada pela liberação de amônia, causando deficiência de nitrogênio no processo. A proporção ideal de carbono e nitrogênio dependerá de cada tipo de substrato, bem como das condições do processo.

Fatores que influenciam a relação C:N - o que é ideal para o processo:

- Se o substrato for afetado por outros fatores, como, por exemplo, baixos níveis de fósforo e oligoelementos, esse fator pode causar um impacto sobre o funcionamento do processo muito maior do que a relação C:N.
- A composição do substrato, ou seja, os componentes que realmente são responsáveis pela relação C:N., compostos de carbono que se degradam lentamente como a celulose, tornam o meio menos ácido se comparado com a maior parte de carbono que é a glicose, a qual se decompõe rapidamente. Há também carbono sob a forma de lignina, e esta não se decompõe durante o processo. Segundo a literatura, a relação C:N ideal em um processo de geração de biogás varia entre 20-30:1 no início do tratamento e entre 10-13:1 ao fim do tratamento.

É muito importante para a quantidade de biogás e também porque a partir da relação há a formação de ácidos graxos, principalmente se a relação C:N for 30:1. 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. O substrato que será tratado em um processo contínuo deverá conter, geralmente, entre 7% e 10% de sólidos totais (ST). O teor de sólidos secos dos lodos tratados em estações de tratamento de águas residuais é em torno de 4% e 6%. Outro fator importante é a disponibilidade de material para os organismos, já que a degradação do substrato deve aumentar o número de microrganismos, os quais podem acelerar o processo de geração de biogás obtendo melhor rendimento.

2.15. Matéria seca e conteúdo orgânico

Grande parte dos materiais orgânicos estão sob forma líquida, por isso, é difícil saber quanto material tem realmente disponível para degradação.

Para isso, é necessário descobrir a quantidade de sólidos que há disponível no substrato a partir da evaporação do líquido, o que proporcionará uma visão melhor da quantidade de matéria seca no substrato.

Para saber a quantidade de matéria orgânica contida no material, o primeiro passo é analisar o teor de matéria seca disponível. O material é seco em estufa à temperatura de 105°C durante 24 horas. Em seguida, é posto em uma mufla a 550°C durante duas horas, para que seja determinado o teor de sólidos voláteis, ou seja, o quanto volátil é a amostra. O cálculo é feito pela quantidade de matéria seca menos a quantidade de cinza restante.

Matéria Seca é o que resta do material orgânico, o quanto de líquido foi evaporado. O resultado geralmente é dado em função do percentual de peso úmido.

Sólidos voláteis é a perda de matéria por combustão, ou seja, expressa o teor de matéria orgânica de um material. É calculado pela diferença entre o material seco e o peso após a queima das cinzas. O resultado geralmente é dado em função do percentual de matéria seca.

2.16. Composição do substrato

A composição dos substratos tem quantidades diferentes de matéria orgânica e, portanto, a energia contida no material difere, ou seja, a quantidade de biogás a ser produzida e o teor de metano presente serão diferentes dependendo do substrato. Os microrganismos atuantes na digestão anaeróbia consomem pequenas quantidades de energia para seu crescimento e o restante de energia contida no substrato é convertida em biogás e metano.

Experiências são realizadas em escala laboratorial por meio de sistema batelada ou contínuo para avaliar o potencial de geração de biogás de distintos substratos. Fazer ensaios laboratoriais é relevante, pois permite avaliar de forma confiável a quantidade de biogás que determinado substrato pode produzir para que posteriormente se pense em instalar uma planta de biogás.

A produção de biogás pode variar durante os testes realizados com o mesmo substrato. Essa variação deve-se ao inóculo, em que estão concentrados os microrganismos que realizam a degradação real do substrato, apresentando capacidades distintas para decompor o material. A temperatura de degradação e o tipo de pré-tratamento utilizado também influenciam na geração de biogás

Resíduos domésticos, por exemplo, nem sempre têm a mesma composição, o que varia conforme o lugar e a época do ano em que o resíduo é coletado. A composição dos resíduos varia dependendo de onde e em que condições são gerados (tipo de solo, clima etc.). Além disso, as condições de armazenamento e Potencial de aproveitamento para fins de reaproveitamento, reciclagem, dos resíduos também liberam gases na atmosfera. Quando o resíduo é disposto de forma inadequada, pode também correr o risco de organismos utilizarem parte da energia disponível no resíduo, diminuindo posteriormente o potencial de biogás.

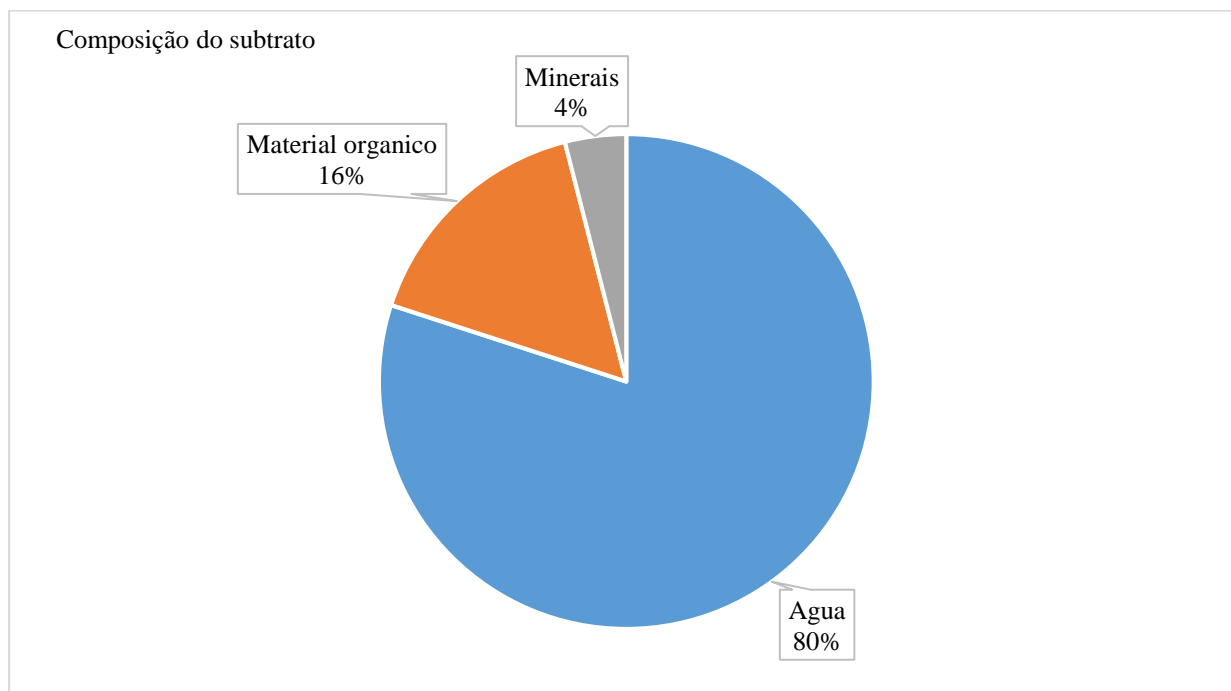


Gráfico 2.1 - Composição do substrato.

Fonte: (Autor)

2.17. Fatores que Influenciam na Digestão Anaeróbia

O processo de formação de biogás pode ser afetado por fatores que estão relacionados com o substrato, com as características do digestor ou com as condições de operação. Mais detalhes sobre esses fatores serão apresentados a seguir.

2.17.1. Temperatura

As bactérias metanogênicas são muito sensíveis a alterações de temperatura. 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. O mais importante é não haver uma variação brusca da temperatura, pois as bactérias não sobreviveriam.

2.17.2. Tempo de retenção

É o tempo em que o material orgânico permanece no interior do biodigestor. O tempo de retenção está relacionado a fatores como a granulometria, temperatura, entre outros. Em geral recomenda-se tempos de retenção de 4 a 60 dias.

2.17.3. Alcalinidade e pH

A acidez ou alcalinidade do meio é indicada pelo pH. A alcalinidade determina a capacidade de uma solução aquosa em neutralizar ácidos sendo que em sistemas anaeróbios tal neutralização decorre da presença de bicarbonatos no meio. Esse parâmetro se faz importante uma vez que as bactérias produzem ácidos, sendo o decaimento do pH impedido pela reação de neutralização desses ácidos com as espécies que conferem alcalinidade ao meio. A ocorrência de tais reações é importante pois as bactérias metanogênicas sobrevivem em faixas estreitas de pH (6,5 a 8,0).

2.17.4. Teor de água

O teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60% a 90% do peso do conteúdo total, sendo os biodigestores que operam com o teor de água próximo a 90% classificados como biodigestores com baixo teor de sólidos totais e aqueles com teor de água próximo à 60%, classificados como biodigestores com alto teor de sólidos totais.

2.17.5. Inoculação

A adição de inóculo se destaca por utilizar parte do material que já passou pelo processo, capaz de fornecer ao novo substrato uma população adicional de 18 microrganismos típicos da biodigestão anaeróbia. Em sistemas de alimentação batelada, o biodigestor é preenchido totalmente em uma única vez com os resíduos orgânicos, com ou sem adição de inóculos. Alguns estudos mostram que com a introdução de inóculos no meio, o desempenho do biodigestor tem sido satisfatório, principalmente devido a aceleração do processo de bioestabilização anaeróbia dos resíduos, já que contribui para a melhora da densidade microbiana.

Devido à sua simplicidade operacional, os sistemas em batelada são mais utilizados em locais onde a disponibilidade de matéria orgânica é dada por períodos longos, por essa razão a produção de biogás não ocorre diariamente (Electo e Rubenildo 2012). Vale ressaltar que o sistema anaeróbio não é verificado imediatamente após a inserção do material no reator. É necessário um tempo de detenção, para que haja um crescimento dos microrganismos presentes e consequente equilíbrio do sistema. O uso de inóculo pode ser importante tanto nos estudos sobre fermentação anaeróbica quanto no ponto de partida de reatores (Souto 2005). Ao término do período de tratamento,

remove-se os resíduos estabilizados e inicia-se um novo ciclo a partir da introdução de uma nova batelada de resíduos.

Uma vez iniciado, o processo em batelada não exige que o substrato seja homogeneizado ou misturado, o que permite a presença de impurezas no substrato sem que o equipamento esteja sujeito a danos. A utilização de inóculo é um processo de tratamento conjunto, por meio da digestão anaeróbia, de diferentes tipos de substratos. Devido à variedade nas características físico-químicas dos substratos, a combinação delas permite o aumento da produção de biogás por volume de digestor ocupado.

Normalmente são usados como inóculos lodo de esgoto digerido, estrume, resíduo digerido e lixiviado.

Para calcular a quantidade de inóculo utiliza-se a equação:

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s} \quad (2.3)$$

Onde:

FI = fator de inóculo;

ST_i = sólidos totais do inóculo;

ST_s = sólidos totais do substrato.

2.17.6. Toxicidade

Toxicidade inclui todas as substâncias que podem afetar o processo de biogás. Muitas vezes, as substâncias que são tóxicas para a formação de metano são as mais vulneráveis.

Deve-se tomar cuidado com o material que entra no digestor para que o mesmo não possua nutrientes em excesso, desinfetantes fortes, bactericidas, combustíveis derivados de petróleo entre outros elementos que possam contaminar o substrato e ser fatal para as bactérias envolvidas no processo biológico de formação do gás. Por esse fato, em abatedouros ou frigoríficos, a água de lavagem de utensílios, de dependências (linha de produção, cozinha e refeitório, banheiros e vestiários) e de lavagem de caminhões não deve ser introduzida no digestor, pois contém elevada carga de detergentes, desinfetantes e derivados de petróleo.

É importante saber que, se o material utilizado para a produção de biogás estiver contaminado, pode ocorrer inibição no processo, ocasionado pelas reações entre os materiais contaminados. Se isso ocorrer, não é possível destinar o material pós-tratamento às áreas agrícolas.

2.18. Biodigestores

Biodigestores consistem em equipamentos herméticos e impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar anaerobicamente, ou seja, sem a presença de ar atmosférico, por um determinado tempo de retenção, no qual ocorre um processo bioquímico denominado biodigestão anaeróbica, que tem como resultado a formação de produtos gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono, além também biofertilizante.

A produção de biogás é proveniente da criação de um meio propício para que as bactérias metanogênicas atuem sobre a matéria orgânica e produzam esse combustível a partir de uma rota biológica definida. Esse ambiente favorável à produção do biogás refere-se às condições químicas e físicas necessárias ao desenvolvimento dessas bactérias dentro do biodigestor, as quais são determinadas em certas faixas de temperatura, pH e relação carbono/nitrogênio (C/N) da biomassa. 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.

2.19. Modelos de biodigestores

No mercado existem diferentes modelos de biodigestores, que podem ser incorporados em projectos de menor e maior dimensão, proporcionando inúmeros benefícios para actividades diárias.

Cada modelo de biodigestor apresenta suas características principais quanto à forma de alimentação, local de fermentação, local de armazenamento e à forma de remoção do substrato.

2.19.1. Modelo Indiano

Tem como característica principal o uso de uma câmpanula flutuante como gasômetro, sendo que a mesma pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação. Existe ainda uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, onde a função desta divisória é fazer com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação de forma homogênea. O biodigestor possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o biogás produzido não é

consumido, o gasômetro desloca-se verticalmente, aumentando o volume deste, mantendo dessa forma a pressão constante em seu interior.

Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil execução, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, e também à distância da propriedade pode dificultar o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor (Pereira 1999).

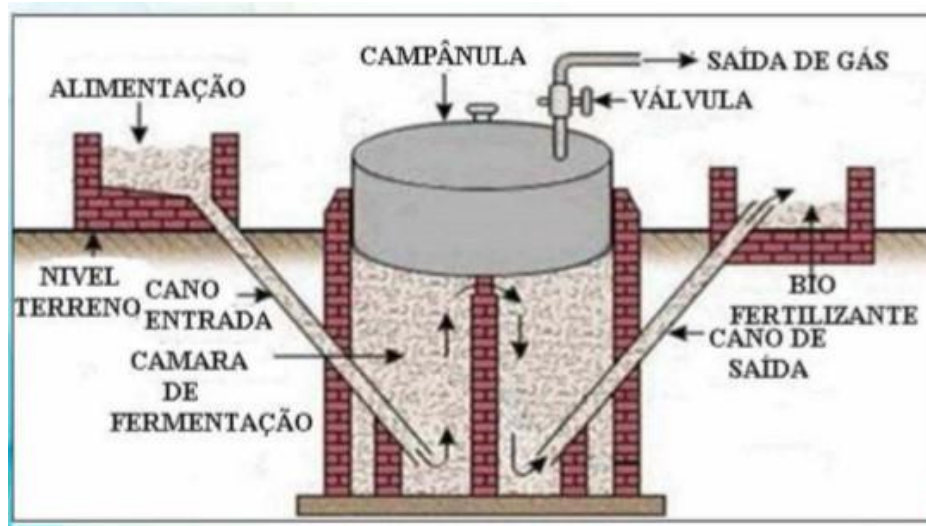


Figura 2.5 - Biodigestor indiano.

Fonte: (11)

2.19.2. Modelo Chinês

O biodigestor modelo Chinês é geralmente constituído por: caixa de carga, tubo de carga, câmara de biodigestão cilíndrica com fundo esférico, gasômetro em formato esférico, galeria de descarga e caixa de descarga. Este modelo é confeccionado sob a forma de uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria (tijolo ou blocos), com teto impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona com pressão hidráulica, onde o aumento de pressão em seu interior resulta no acúmulo do biogás na câmara de fermentação, induzindo-o para a caixa de saída. O biodigestor é constituído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro com chapa de aço, obtendo uma redução de custos, porém podem ocorrer problemas com vazamento do biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada. Neste tipo de biodigestor uma parte do biogás produzido na caixa de saída é liberada na atmosfera, reduzindo em parte a pressão interna do gás e devido a isso, o mesmo não é indicado para instalações de grande porte (Pereira 1999).

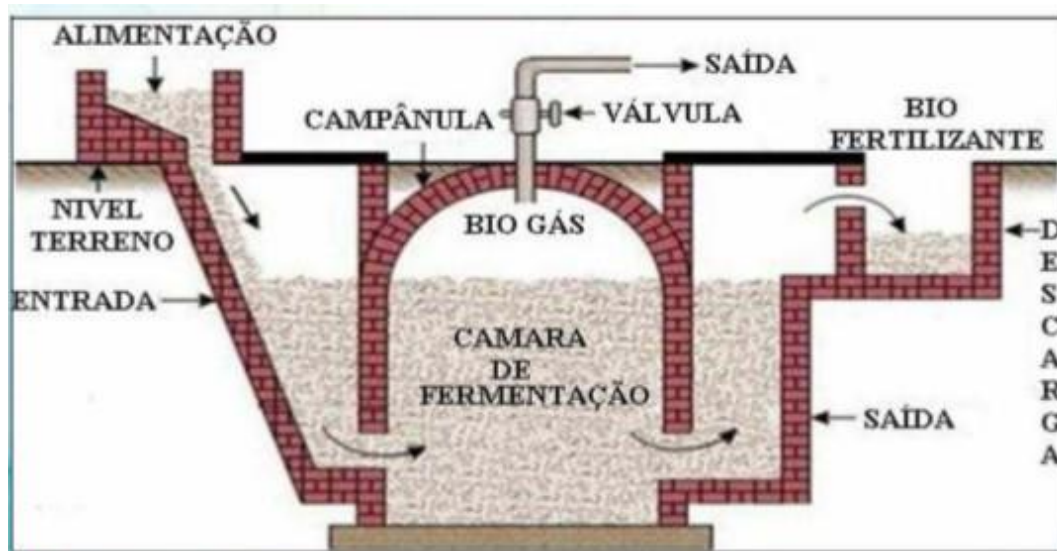


Figura 2.6 - Biodigestor chinês.

Fonte: (8)

2.19.3. Modelo Canadense ou de fluxo tubular

O biodigestor canadense é um tanque cavado no solo revestido internamente e recoberto com manta de PVC impermeável. Possui tubo de entrada para substrato e de saída para biogás e biofertilizante (Oliver et al 2014).

Este modelo de biodigestor é mais recente e apresenta uma tecnologia bem mais moderna e avançada, e menos complexa. Segundo (Deublein e Steinhauser 2008) é um modelo tipo horizontal, apresentando uma caixa de carga em alvenaria e com a largura maior que a profundidade, possuindo, portanto, uma área maior de exposição ao sol, o que possibilita grande produção de biogás, evitando o entupimento. Durante a produção de biogás, a cúpula do biodigestor infla porque é feita de material plástico maleável (PVC), podendo ser retirada.

O biodigestor de fluxo tubular é amplamente difundido em propriedades rurais e é, hoje, a tecnologia mais utilizada dentre as demais. Neste tipo de biodigestor, o biogás pode ser enviado para um gasômetro separado, permitindo maior controle. Embora o biodigestor descrito apresente a vantagem de ser de fácil construção, possui menor durabilidade como no caso da lona de plástica perfurar e deixar escapar gás.

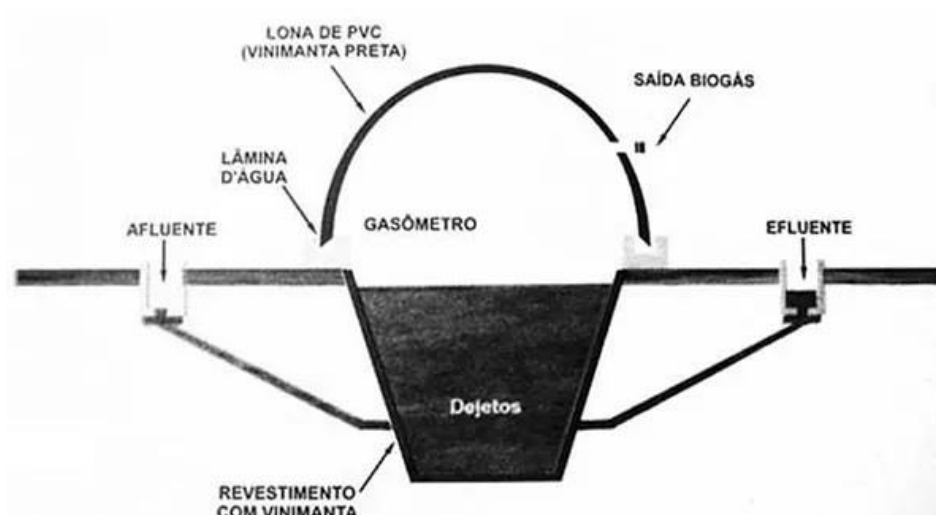


Figura 2.7 - Biodigestor modelo Canadense.

Fonte: (29)

2.19.4. Biodigestor modelo Marinha Brasileira

O biodigestor desenvolvido pela Marinha do Brasil apresenta uma base quadrangular, com paredes de alvenaria revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona preta também impermeável. É um modelo mais raso e longo, o que lhe garante uma maior produtividade de gás por massa fermentada. Sua utilização encontra maior barreira no que diz respeito ao espaço físico disponível para a instalação. Por ter uma profundidade pequena, necessita de uma grande área superficial para que consiga armazenar uma grande quantidade de resíduo (Sousa 1995).

Esse modelo, como o apresentado na figura 8 é o mais indicado para projetos industriais e agro-industriais por ser versátil ao uso de diferentes resíduos orgânicos e ser capaz de armazenar grande quantidade de resíduo passível de sofrer fermentação anaeróbia, produzindo assim grande quantidade de biogás e estabilizando os dejetos que podem ser utilizados como biofertilizante.

Atualmente, esse modelo de biodigestor é mais difundido no Brasil devido ao aperfeiçoamento da manta impermeável que passou a ser confeccionada em Policloreto de Vinila (PVC), o que confere um menor custo e maior facilidade de instalação quando comparado com os modelos antigos (modelo Indiano e Chinês), além de apresentar maior resistência à corrosão provocada pela água e pelo ácido sulfídrico presentes na mistura gasosa. Outra vantagem é que o mesmo pode ser utilizado tanto em pequenos como em grandes projetos agro-industriais.

Em comparação ao modelo Indiano, o modelo da Marinha apresenta a vantagem de poder receber grande quantidade de resíduos. Em comparação com o modelo Chinês, a vantagem está no fato de aquele sofrer rachaduras na sua estrutura devido à composição do solo brasileiro que sofre muita

acomodação, o que muitas vezes provoca perda de gás e exige monitoramento e manutenção constantes.

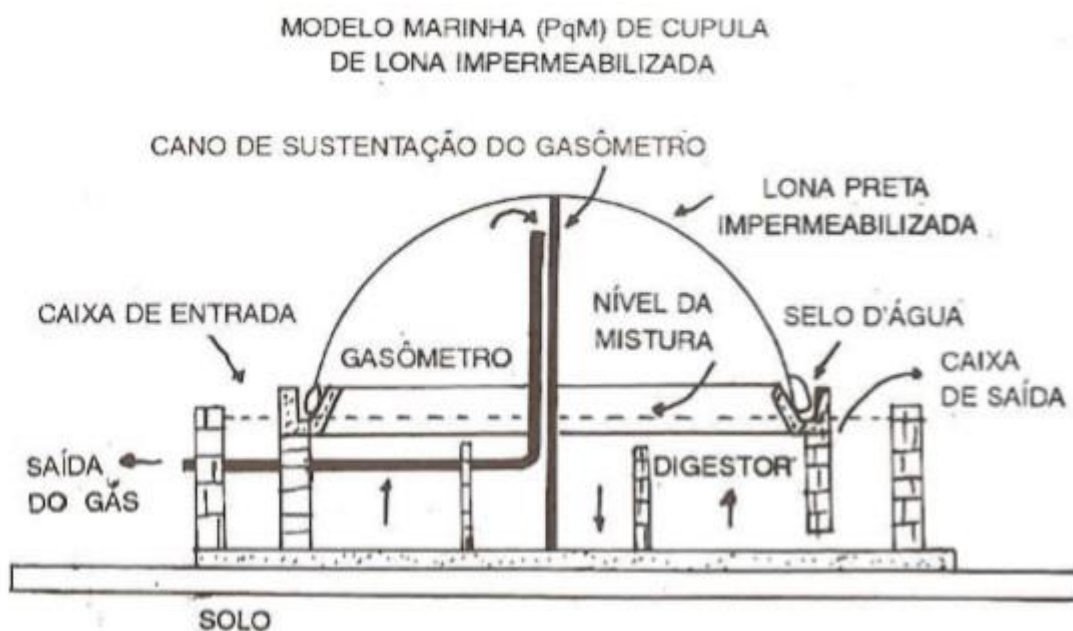


Figura 2.8 - Biodigestor modelo Marinha.

Fonte (24)

2.20. Tipos de Biodigestores

Alguns biodigestores apresentam fácil manutenção e características construtivas mais simples em relação a outros. Tendo em conta a produção da biomassa ou matéria-prima, alguns biodigestores são indicados para locais onde a produção de matéria-prima não seja contínua, como é o caso de locais onde o substrato para alimentar o biodigestor é obtido apenas quando se faz a limpeza.

Quanto à forma de alimentação os biodigestores classificam-se em:

2.20.1. Batelada

Nesse sistema a matéria-prima é colocada no biorreator fechado, totalmente sem ar, para que seja realizada a fermentação anaeróbica. O gás produzido é armazenado no próprio recipiente que serve de digestor ou em um gasômetro acoplado a ele. Terminando a produção de biogás, o digestor é aberto, retirando finalmente seus resíduos. Após a sua limpeza, é colocada nova quantidade de substrato, reiniciando o processo (José 1981).

2.20.2. Contínuo

Nos biodigestores contínuos a matéria-prima é colocada continuamente e quase sempre diretamente, utilizando matéria-prima que possua decomposição relativamente fácil e que tenha

boa disponibilidade por perto, sendo que a falta da mesma provoca parada no sistema. Sendo assim, a produção de biogás e biofertilizantes ocorrem de forma contínua. Existem vários modelos de digestores contínuos, dependendo do seu formato, mas de modo geral se dividem de acordo com seu posicionamento sobre o solo: vertical ou horizontal. Os biodigestores Chinês, Indiano e Canadense são do tipo contínuo, assim como muitos reatores caseiros (José 1981).

2.20.2.1. Contínuo vertical

O digestor contínuo vertical é um tanque cilíndrico, feito em alvenaria (tijolo, concreto ou outros materiais disponíveis), quase sempre com a maior parte submersa no solo. Nele a matéria-prima é colocada na parte de baixo com saída do gás na parte de cima do biodigestor. É necessário cuidado extremo com esses biodigestores, pois em locais onde lençóis freáticos são superficiais pode ocorrer contaminação dos mesmos (José 1981).

2.20.2.2. Contínuo horizontal

Os digestores contínuos horizontais podem ter qualquer formato, desde que a altura seja menor que comprimento e a largura, podendo ou não ser enterrada no solo. A matéria prima é colocada periodicamente em um dos lados do digestor. Este tipo de biodigestor, por ser construído de forma horizontal e não precisar de tanta profundidade pode ser instalado em regiões de incidência de lençóis freáticos (José 1981).

CAPÍTULO III. EXPERIMENTO

3.1. Escolha do tipo de Biodigestor

A escolha do tipo do biodigestor depende basicamente das condições do local onde será implantado, tipo de substrato, experiência do construtor e principalmente relação custo benefício. Contudo, qualquer digestor construído, se for corretamente instalado e operado, produzirá biogás e biofertilizante.

Para o presente trabalho irá se construir o biodigestor de batelada, pois é indicado para pequenas produções de biogás, e é abastecido uma única vez, fermentando por um período conveniente, sendo o material descarregado posteriormente utilizado como biofertilizante. Esse tipo de biodigestor, por ser extremamente simples, pode ser construído utilizando materiais simples e de acesso fácil.

3.2. Dimensionamento e Caracterização do Biodigestor

Esta etapa consiste no dimensionamento teórico do biodigestor. Geralmente o peso total da mistura que alimenta o biodigestor é representado pela soma dos resíduos sólidos, do inoculante, do NaCO_3

(tamponamento) e do teor de umidade da mistura. Segundo (Camila 2016), pode-se apurar os seguintes parâmetros para o cálculo: Inoculante (SI) – FI (fator de inoculação) = 0,2; Tamponamento (NaCO₃) = 0,06 kg/kg de inoculante; Teor de Umidade (T.U) = 0,58 L/kg de inoculante.

- Inoculante (SI) - FI (fator de inoculação) = 0,2
- Tamponamento - NaCO₃ = 0,06 kg/kg de inoculante
- Teor de Umidade (T.U) = 0,58 L/kg de inoculante

Para um RSO_{médio} = 1 kg de substrato com os parâmetros citados acima, pode-se obter os seguintes valores dos elementos constituintes da mistura.

$$\text{Inoculante (SI)} = 1 \times 0,2 / 0,8 = 0,25 \text{ kg}$$

Para o cálculo foi utilizada a equação

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s}$$

Onde:

FI = fator de inoculação;

ST_i = Inoculante;

ST_s = Massa total de sólidos.

NaCO₃ (carbonato de cálcio)

$$\text{Tamponamento} = 0,06 \times \text{SI} \tag{3.1}$$

Onde:

0,06 kg/kg = fator de relação com o inoculante;

SI = Inoculante (kg) Tamponamento = 0,06x 0,25 = 0,015 kg.

H₂O (água)

$$\text{H}_2\text{O} = 0,58 \text{ L/kg} \times \text{SI}$$

Onde:

0,58 L/kg = fator que relaciona o percentual de H₂O com o teor de umidade encontrado na matéria orgânica.

A massa total da Mistura é calculado por:

$$PTM = ST_s \text{ (kg)} + ST_i \text{ (kg)} + NaCO_3 \text{ (kg)} + H_2O \text{ (L)} \quad (3.2)$$

$$PTM = 1 + 0,25 + 0,015 + 0,145 = 1,195 \text{ kg}$$

Porém para o seguinte trabalho opta-se por não se adicionar o inoculante na mistura, porque o objectivo é de analisar as propriedades do biogás produzido por cada tipo de substrato, o inóculo é um forte catalisador e pode acabar tendo certa influência no biogás obtido agindo desta forma como impureza uma vez que o objectivo principal é avaliar a quantidade e qualidade de metano formado por cada substrato sem influência de catalizadores. Assim, os elementos constituintes da mistura serão basicamente resíduos sólidos e água.

3.3. Construção dos mini biodigestores

Para a construção dos mini biodigestores procurou-se utilizar materiais de fácil acesso que podem ser encontrados em qualquer comunidade. Os custos são normais e a montagem é simples. Desta forma qualquer escola ou pessoa tem condições para construir e operar este tipo de biodigestor.

A maioria dos componentes foram achados em lixeiras locais como é o caso de garrafas plásticas e as respectivas tampas, os pequenos tubos metálicos foram extraídos duma antena de captação de sinal para televisão, os grampos de madeira e a pasta adesiva foram comprados no mercado do Zimpeto, porém o componente que foi dificilmente encontrado foi a conduta de silicone pois apresenta um diâmetro muito pequeno e não é comercializada em pequenas ferragens.

Optou-se por usar-se grampos de madeira, porque não foi possível encontrar válvulas de pequena dimensão que pudessem ajustar-se à conduta de silicone.

Cada mini biodigestor é composto por três garrafas sendo duas de 1L de volume e outro de 0,5L, as três garrafas encontram-se conectadas através de condutas de silicone. Uma das garrafas de 1L funciona como reactor (que é preenchida pelo substrato), e encontra-se conectada à segunda garrafa de 1L que serve como gasómetro, esta por sua vez contem uma certa quantidade de água e encontra-se conectada à garrafa de 0,5L.

Materiais utilizados

Tabela 3.1 - Material para a montagem do mini biodigestor.

Componete	Medida	Quantidade
Garrafa de refrigerante	1L	10
Garrafa de água	0,5L	5
Grampus (pegas)	-----	5
Conduta de silicone	Ø8mm x 5m	1
Arrame	4m	2
Alicate	-----	1
Pasta adesiva	20g	10
Conduas de alumínio	Ø8 x 200mm	10
Isopor	60x70x30	1

Fonte: (Autor)

3.4. Montagem dos mini biodigestores

O primeiro passo foi a lavagem das garrafas e outros equipamentos, pois elas apresentavam pueira e gorduras. Depois do processo de limpeza, o próximo passo foi fazer furos nas tampas das garrafas e nas laterais das que serviram de gasómetros, após isso conectou-se as condutas de silicone às condutas de alumínio (as condutas de alumínio serviam de reforço pois as condutas de silicone são muito flexíveis, desta forma não teriam consistência quando coladas directamente nas tapas das garrafas). Em seguida conectou-se todas as garrafas através das condutas fixadas por meio de uma pasta adesiva.

Para a realização do experimento, foram utilizados 5 reatores de garrafas plásticas transparentes com volume total de 1L e útil de 920 mL. Dos 5 reatores, 1 é utilizado para avaliação do potencial de geração de biogás do substrato de pimento, 1 para o substrato de repolho, 1 para o substrato de cebola, 1 para o substrato de tomate e 1 para o substrato de cenoura.

Cada reactor era conectado à uma garrafa de 1L que continha água e por sua vez, esta era conectada à uma outra garrafa de 500 mL para onde a água fluia quando sofresse pressão do biogás vindo do reactor.

Foram montados 5 mini biodigestores em paralelo, com intuito de alimentá-los em simultâneo e postos a operar sob mesmas condições.

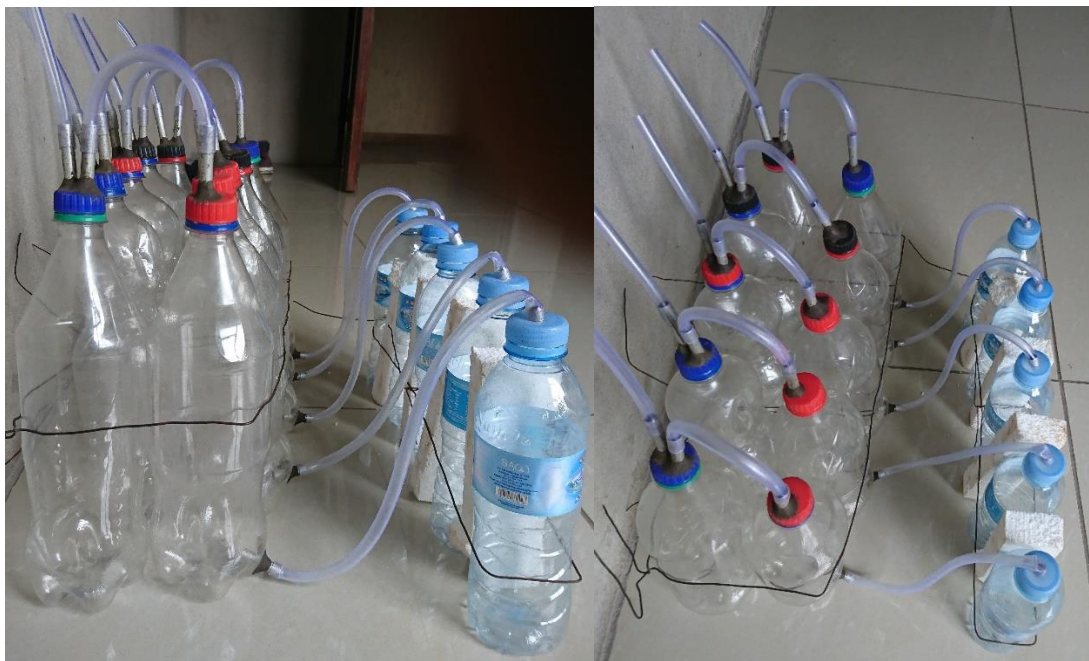


Figura 3.1 – Mini biodigestores montados em paralelo.

Fonte: (Autor)

3.5. Substratos utilizados e origem

Para a realização deste trabalho, foram utilizados como substratos os resíduos orgânicos provenientes do mercado grossista do zimpeto, porém podiam ter sido obtidos em qualquer local de comercialização de verduras. Pois só eram necessárias pequenas quantidades de cada tipo de substrato.

O mercado grossista do Zimpeto é um dos locais de comércio que mais produz resíduos orgânicos a nível da cidade de Maputo, desta maneira esperera-se que futuro possa surgir um projecto de implementação de um biodigestor num local de interesse público, como é o caso do hospital que localiza-se nas proximidades do mercado, de modo a reaproveitar-se a quantidade de substratos que são descartados sem nenhum benefício.

Os substratos selecionados para a realização dos experimentos foram os seguintes:

- Pimento;
- Repolho;
- Cebola;
- Tomate;
- Cenoura.

3.6. Operação do Biodigestor

Os experimentos foram realizados no período de 12/01/22 a 28/02/22, totalizando 17 dias.

O objectivo do presente trabalho é avaliar de forma quantitativa e qualitativa o biogás produzido, com maior foco na concentração do metano. Nas páginas que se seguem, descreve-se o comportamento de cada um dos mini biodigestores no que diz respeito à produção de biogás.

No momento inicial dos experimentos, cada reator foi alimentado com uma certa quantidade de substrato escolhido e foi adicionado o volume de 600 mL de água. A carga orgânica aplicada foi de 400g de cada tipo de substrato.

O substrato foi triturado de modo a apresentar uma granulação fina, para facilitar no processo de fermentação e pudesse ser facilmente introduzido e removido do reator. A mistura do substrato triturado e água foi feita antes de introduzir-se o substrato no interior do reator.

Cada mini biodigestor é composto por:

- Canal de injeção e remoção do substrato – é o canal por onde se insere e remove-se o substrato, este canal é único, mas desempenha as duas funções;
- Câmara de fermentação – região na qual ocorre todo o processo microbiológico;
- Conduta de análise do biogás – local que permite o escoamento do gás até ao aparelho de avaliação das propriedades do biogás;
- Válvula – é um grampo que inibe a saída do biogás para o exterior do biodigestor;
- Conduta de migração do biogás – que permite a migração do biogás da câmara de fermentação ao gasómetro;
- Gasómetro – local de armazenamento do biogás produzido;
- Conduta de migração da água – que permite a migração da água do gasómetro até ao reservatório da água, permitindo que o gasómetro tenha espaço suficiente para armazenar biogás, pois o biogás quanto mais é produzido exerce determinada pressão sobre a água, tentando ganhar espaço no gasómetro;
- Reservatório de água – este local serve apenas para armazenar a água que vem do gasómetro, sendo que a quantidade de água que migra para este reservatório oferece uma estimativa do volume do biogás produzido em cada mini biodigestor.

A seguir está apresentada uma imagem em corte que ilustra com maior clareza a composição de cada mini biodigestor.

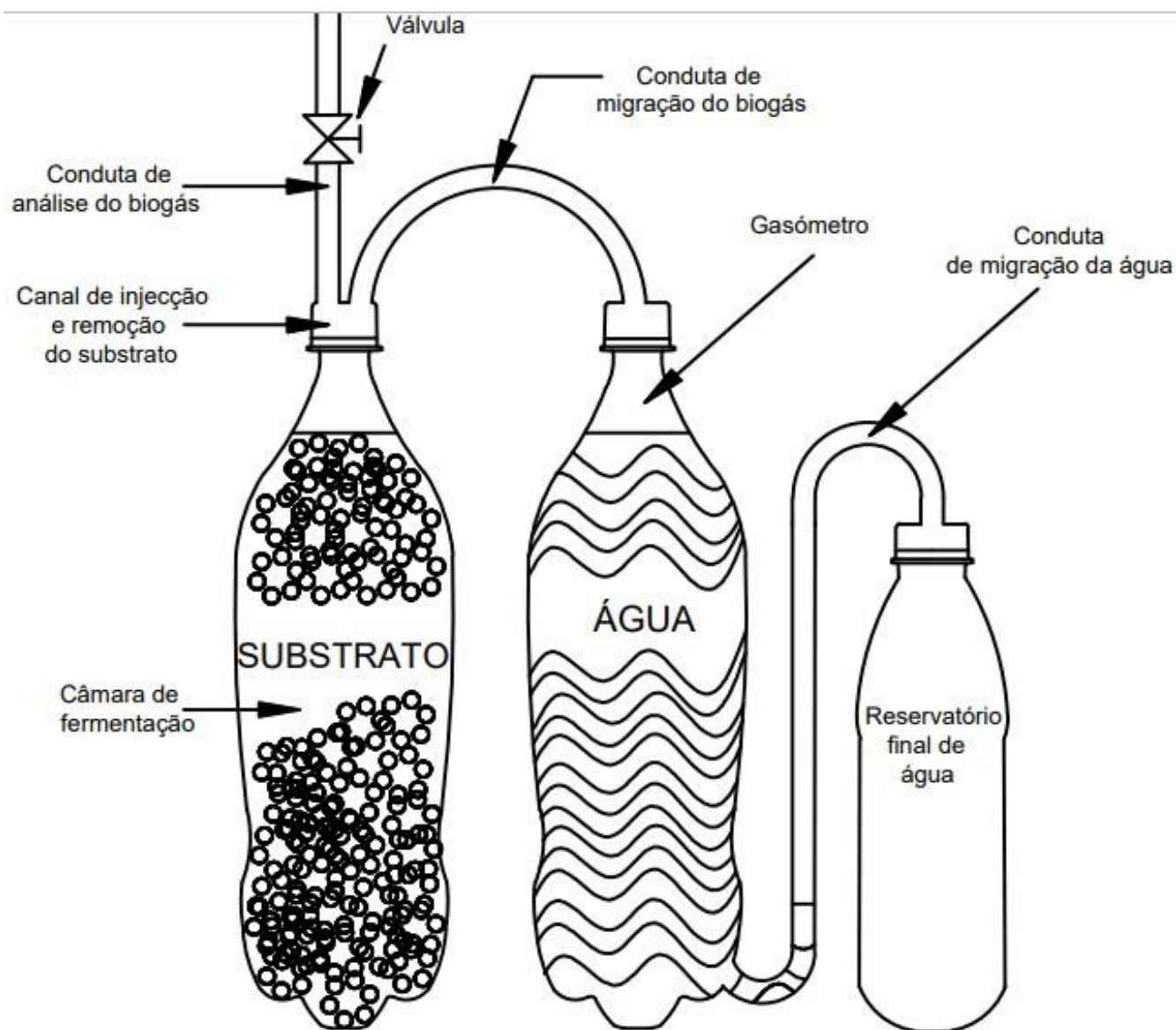


Figura 3.2 - Vista em corte do mini biodigestor.

Fonte: (Autor)

De um modo geral o substrato é introduzido na câmara de fermentação através do canal de injeção, em seguida fecha-se o reactor, à medida que o tempo passa inicia o processo de produção de biogás. O biogás produzido tem a liberdade de fluir para a conduta de análise e para o gasómetro, onde o biogás exerce pressão na água contida no gasómetro e esta migra para o reservatório que encontra-se conectado ao gasómetro através de uma conduta.

Para realizar-se a análise do biogás conecta-se a conduta de análise do mini biodigestor à conduta do equipamento utilizado para analisar o biogás.



Figura 3.3 – Mini biodigestores operando em paralelo alimentados com os substratos.

Fonte: (Autor)

O acompanhamento era realizado em cada 3 dias numa fase inicial, depois de 6 dias verificou-se uma redução do volume de todos os substratos em todos os reactores, verificou-se também a redução do volume de água em alguns gasómetros principalmente nos resctores de cenoura, repolho e cebola, respectivamente.



Figura 3.4 - Situação dos biodigestores após 6 dias de operação.

Fonte: (Autor)

Após 14 dias verificou-se que o volume dos substratos em todos os reactores permaneceu constante, porém verificou-se que o volume de água deslocado em quase todos os gasómetros aumentou excepto no substrato tomate, pois apresentou-se com o volume de água no gasómetro quase inalterado. Contudo pode verificar-se que há formação de gás. E essa situação se manteve até o dia da recolha dos resultados.



Figura 3.5 - Situação dos biodigestores após 14 dias de operação.

Fonte: (Autor)

3.7. Qualificação do biogás

Para a determinação do percentual de CH_4 , CO_2 , H_2S , CO , CO_2 foi usado um equipamento específico denominado BIOGAS 5000 da Geotech, mostrado na figura que se segue.

Este dispositivo é fácil de utilizar, calibrar e configurar. Permite a coleta consistente de dados por análise aprimorada e informação precisa, auxiliando, ao mesmo tempo, a verificar se o processo do digestor está funcionando de forma eficiente.

REDAÇÃO DO TL



Figura 3.6 - Equipamento usado pra determinar a composição do biogás.

Fonte: (32)

Aplicação

- Monitoramento de gás de digestor de fazenda;
- Monitoramento de biogás no processamento de alimentos;
- Monitoramento da água residual;
- Recuperação de Metano.

O método de medição consiste em conectar a conduta de saída do reator ao aparelho e remover o grampo que serve de válvula de conexão do biogás, o aparelho realiza a leitura do percentual de CH₄ e dos demais componentes contidos na biogás e mostra no visor o máximo percentual obtido para cada componente da amostra em avaliação.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Avaliação da produção do biogás

A avaliação da produção do biogás é feita através de alguns parâmetros, como por exemplo:

- Volume de gás produzido e sua composição:
- Reflete a condição do processo. Ambos indicam o equilíbrio do processo entre as várias populações de microorganismos;
- O poder calorífico (PC) de um gás combustível: O poder calorífico representa a quantidade de energia por unidade de volume liberada na queima de um determinado combustível e pode ser definido como sendo a quantidade de energia interna contida no mesmo. Há dois tipos de poder calorífico: superior e inferior. O poder calorífico superior, PC_s , pode ser definido como sendo a quantidade de calor produzido por 1 kg de combustível, quando este entra em combustão, com excesso de ar, e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água neles seja condensado. E o poder calorífico inferior PC_i , pode ser definido como sendo a quantidade de calor que pode produzir 1 kg de combustível, quando este entra em combustão, com excesso de ar, e gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água.

Para a medição do volume do biogás produzido basea-se no princípio do deslocamento de fluídos. O reator está ligado em uma garrafa que contém água (servindo como gasómetro), e à medida que o gás se acumula no gasómetro desloca o fluído contido no mesmo, para uma garrafa menor conectada ao gasómetro, que serve como reservatório do fluído deslocado. Em função do volume do fluído deslocado irá saber-se a quantidade do volume do biogás produzido.

Ao final do experimento foram realizadas análises para determinação da quantidade de metano, dióxido de carbono, oxigénio, monóxido de carbono e gás sulfídrico.

O resultados foram extraídos 17 dias após a montagem dos biodigestores, no decorrer do tempo constatou-se que uma semana após a montagem dos biodigestores já havia produção do metano, no 12º dia ao 17º dia a produção do biogás alcançou o pico em todos os biodigestores.

Os resultados obtidos depois de realizadas leituras do volume e composição do biogás estão mostrados na tabela que se segue.

Tabela 4.1 - Resultados experimentais.

Substrato	Volume (mL)	Metano CH ₄ (%)	Dióxido de carbono CO ₂ (%)	Oxigénio O ₂ (%)	Monóxido de carbono CO (ppm)	Gas Sulfídrico H ₂ S (ppm)
Pimento	118	49,7	49,9	0,2	0,3	67
Repolho	195	52,1	47,7	0,1	0,5	84
Cebola	140	50,2	48,3	0,3	0,2	73
Tomate	41	11,7	85,8	0,6	0,1	87
Cenoura	198	53,2	46,5	0,2	0,1	92

Fonte: (Autor)

Constatou-se, que dos 5 mini biodigestores em operação apenas 1 é que entrou em colapso, sendo o biodigestor alimentado com o substrato tomate, mas os outros 4 apresentaram um funcionamento satisfatório. Não se sabe exactamente o factor que fez com que o biodigestor alimentado com o substrato tomate entrasse em colapso, pois o funcionamento óptimo de um biodigestor depende de vários factores, porém acredita-se que tenha havido vazamento de biogás ao longo do processo, ou material não biodegradado pelo sistema no biodigestor.

Cada um dos mini biodigestores apresentava um comportamento individual, no que diz respeito a quantidade de biogás produzido com o decorrer da experiência, sendo que em alguns reactores o volume de biogás atingiu o seu pico antes do tempo estimado, uma vez que cada reactor tinha um processo microbiológico independente.

A maior produção de biogás registrada ocorreu no substrato cenoura, alcançando um volume de 198 mL, este substrato foi o primeiro a demonstrar evidencias de formação de biogás e sendo o primeiro a atingir o pico de produção. Em segundo lugar encontra-se o substrato repolho, tendo formado 195 mL de biogás, em terceiro lugar encontra-se o substrato cebola tendo produzido 140 mL de biogás, em quarto lugar encontra-se o substrato pimento com uma produção de 118 mL e por fim encontra-se o substrato tomate sendo este o substrato que fracassou sendo que produziu um volume insignificante de 41 mL de biogás.

O gráfico a seguir mostra o volume do biogás produzido em cada mini biodigestor.

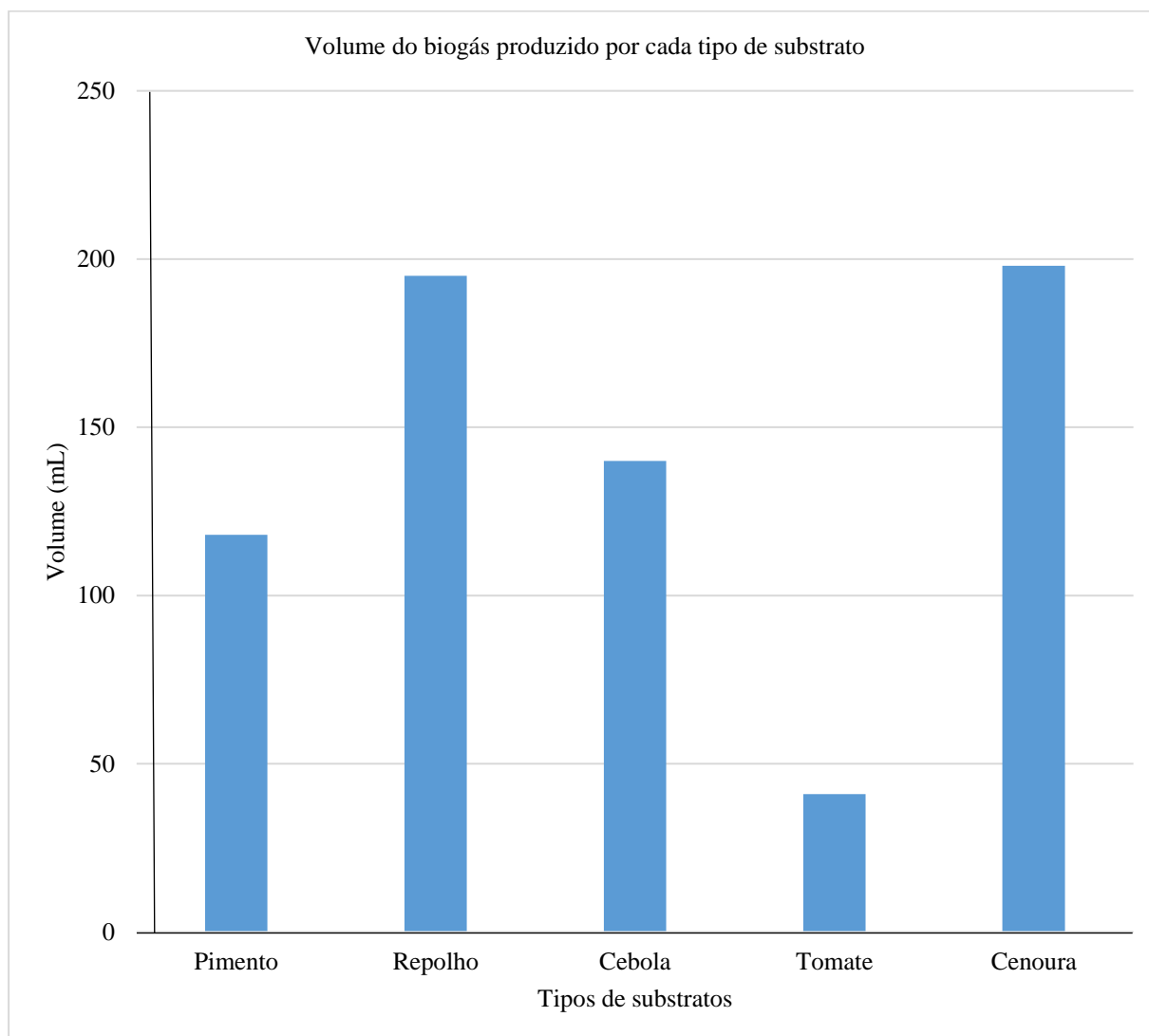


Gráfico 4.1 – Quantidade de biogás produzido por cada tipo de substrato.

Fonte: (Autor)

O biodigestor alimentado com o substrato cenoura demonstrou-se mais eficaz, tendo produzido 53,2 % de metano, este biodigestor foi o primeiro a mostrar evidências de produção de gás, seguido do biodigestor alimentado com o substrato repolho com uma percentagem de metano igual a 52,1 %, em terceiro lugar encontra-se o biodigestor alimentado com o substrato cebola tendo produzido 50,2 % de metano, em quarto lugar encontra-se o biodigestor alimentado com o substrato pimento com uma percentagem de metano igual a 49,7 % e por fim temos o biodigestor alimentado com o substrato tomate com a menor produção de metano igual a 11,7 %. O gráfico que se segue mostra a quantidade de CH_4 , CO_2 e O_2 no biogás.

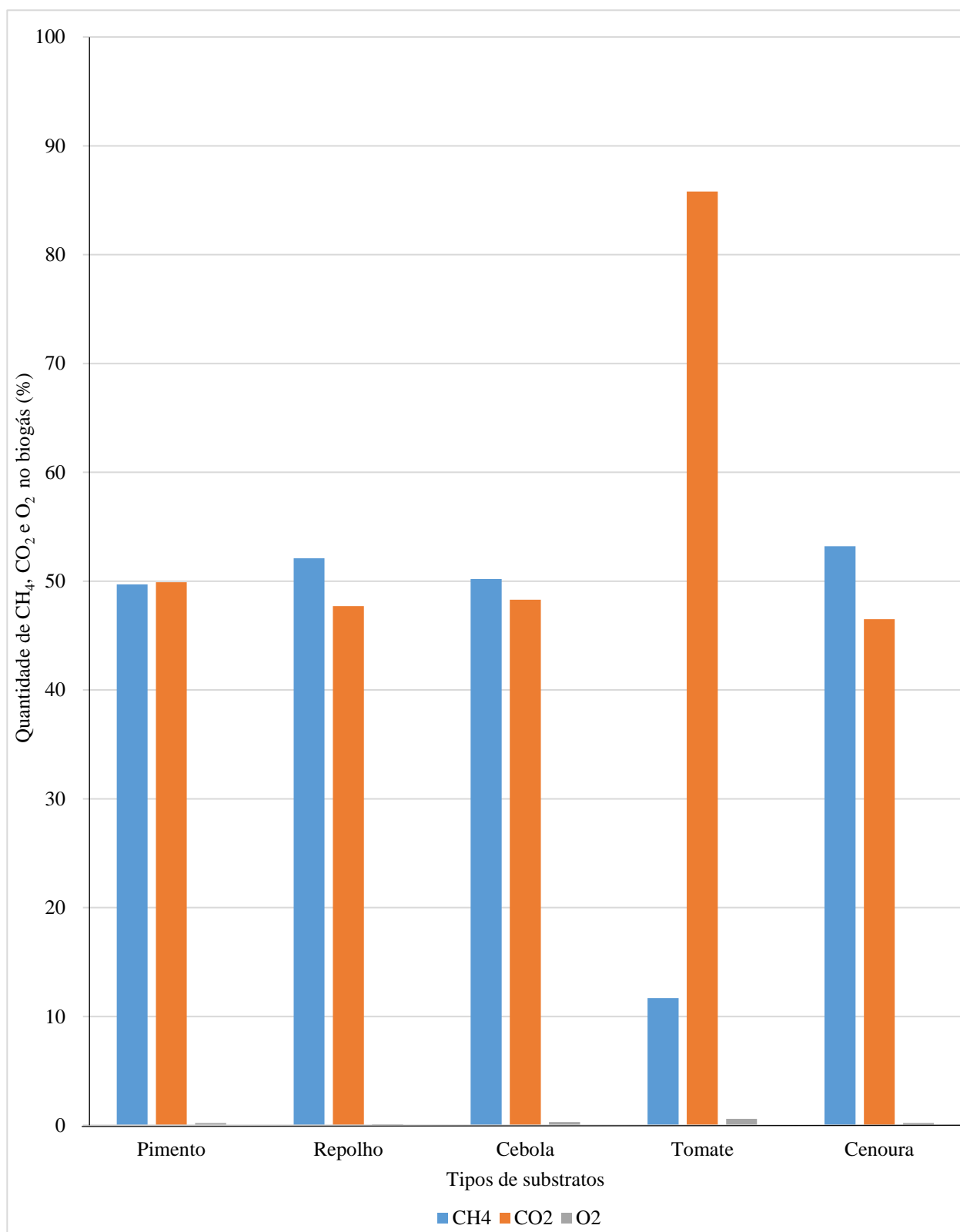


Gráfico 4.2 – Percentagem de CH₄, CO₂ e O₂ no biogás de cada tipo de substrato.

Fonte: (Autor)

A quantidade de monóxido de carbono produzido em todos os mini biodigestores é baixa, isto é satisfatório pois trata-se de um produto nocivo à saúde humana.

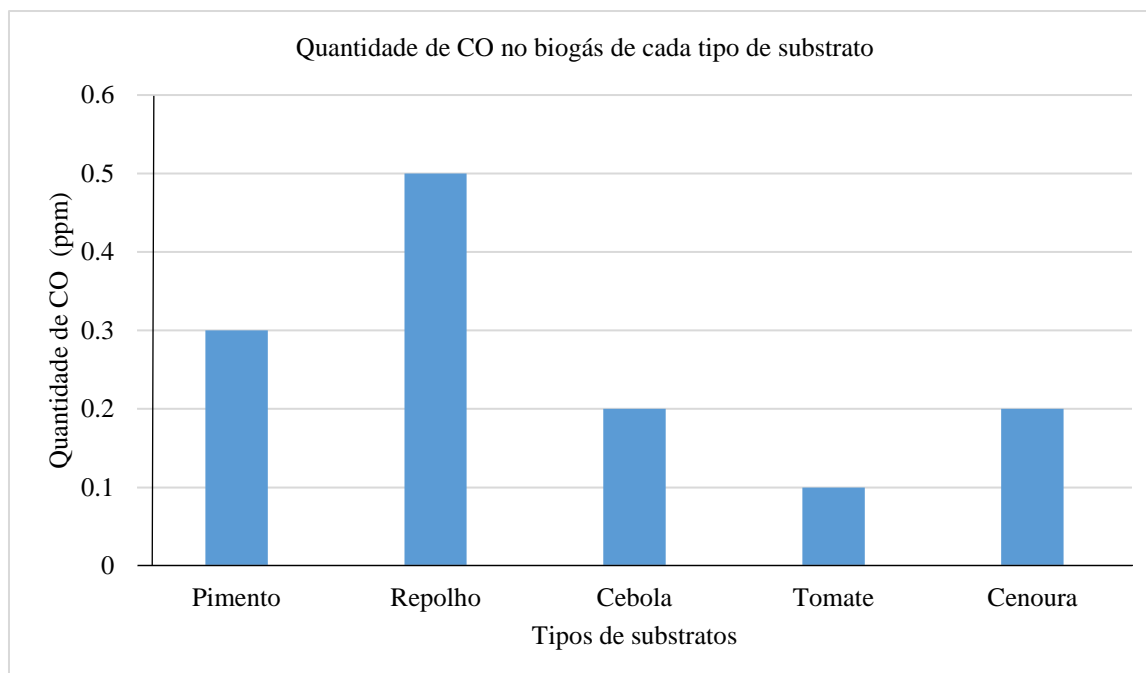


Gráfico 4.3 – Quantidade de CO no biogás de cada tipo substrato.

Fonte: (Autor)

O biogás produzido em todos os biodigestores possui baixas quantidades de H_2S principalmente no substrato pimento e cebola com valores abaixo de 80 ppm.

Quanto menor for a quantidade de H_2S melhor é a qualidade do biogás pois, a presença deste componente gera certos problemas dentre os quais podemos destacar aqueles relacionados à:

- Segurança, pois um vazamento pode resultar em mortes;
- Natureza corrosiva do ácido sulfídrico o que faz aumentar a necessidade de manutenção de caldeiras e máquinas e conseqüente diminuição considerável de sua vida útil dos mesmos, pois o ácido sulfídrico também pode acidificar o óleo lubrificante dos equipamentos, necessitando de trocas com mais freqüência;
- Emissão de óxidos de enxofre pela queima de H_2S .

A geração de H_2S é inevitável em qualquer tecnologia de biodigestor. O que muda é somente a maneira como as empresas ou proprietários dos biodigestores tratam o assunto.

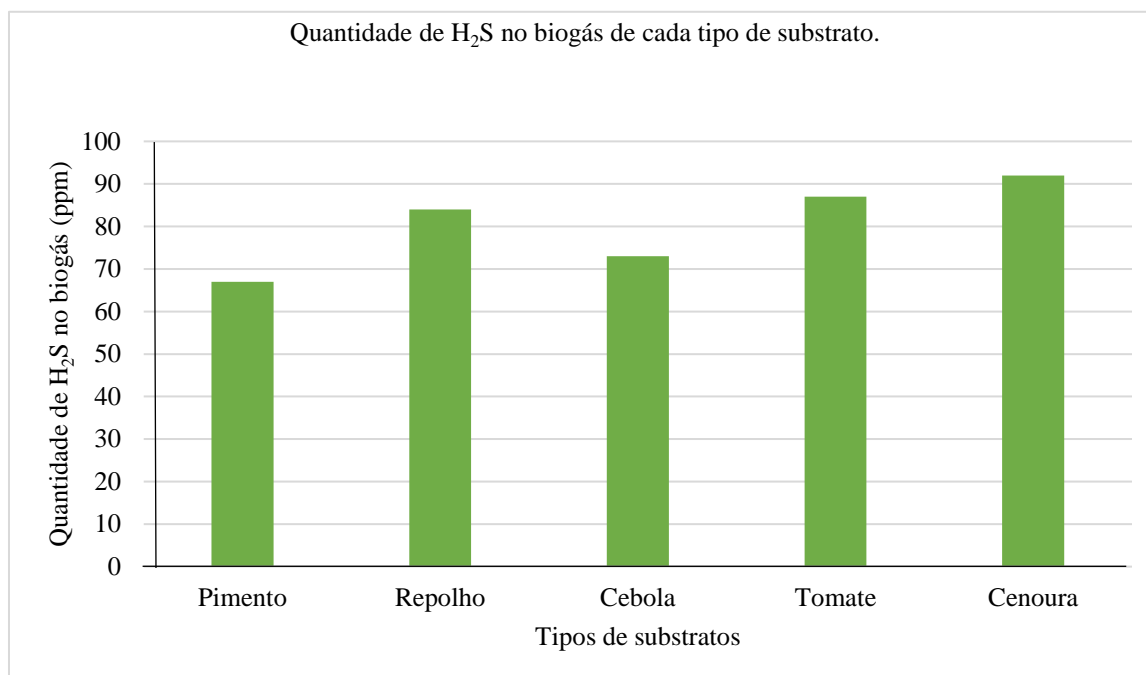


Gráfico 4.4 - Quantidade de H₂S no biogás de cada tipo de substrato.

Fonte: (Autor)

4.2. Determinação do poder calorífico do biogás

O poder calorífico do biogás depende da percentagem de metano contido no mesmo, quanto maior for a percentagem de metano no biogás maior será seu poder calorífico e vice-versa. Para efeitos de cálculos utilizou-se valores do poder calorífico inferior, poder calorífico superior e peso específico do metano que são constantes a condições normais de temperatura e pressão.

O poder calorífico do biogás pode ser quantificado através de cálculo utilizando a equação:

$$PC_B = (\%CH_4) \cdot \rho_{CH_4} \cdot PC_{CH_4} \quad (4.1)$$

Onde:

PC_B = poder calorífico do biogás, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$;

ρ_{CH_4} = peso específico do metano, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$;

PC_{CH_4} = poder calorífico do metano, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

PC_{iCH_4} = 50 000 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

PC_{sCH_4} = 55 545 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

ρ_{CH_4} = 0,72 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.2.1. Determinação do poder calorífico inferior do biogás

$$PC_{IB} = (\%CH_4) \times \rho_{CH_4} \times PC_{iCH_4} \quad (4.2)$$

Onde:

$$PC_{iCH_4} = 50\,000 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1};$$

$$\rho_{CH_4} = 0,72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

Substrato pimento

$$PC_{IB} = 0,497 \times 0,72 \times 50\,000 = 17\,892 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Substrato repolho

$$PC_{IB} = 0,521 \times 0,72 \times 50\,000 = 18\,756 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Substrato cebola

$$PC_{IB} = 0,502 \times 0,72 \times 50\,000 = 18\,072 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Substrato tomate

$$PC_{IB} = 0,117 \times 0,72 \times 50\,000 = 4\,212 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Substrato cenoura

$$PC_{IB} = 0,532 \times 0,72 \times 50\,000 = 19\,152 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Tabela 4.2 - Resultados do cálculo do poder calorífico inferior do biogás.

Substrato	Poder calorífico inferior PC_{IB} (kJ·m ⁻³)
Pimento	17 892
Repolho	18 756
Cebola	18 072
Tomate	4 212
Cenoura	19 152

Fonte: (Autor)

A seguir encontra-se o gráfico que demonstra a variação do PC_{IB} de cada tipo de substrato.

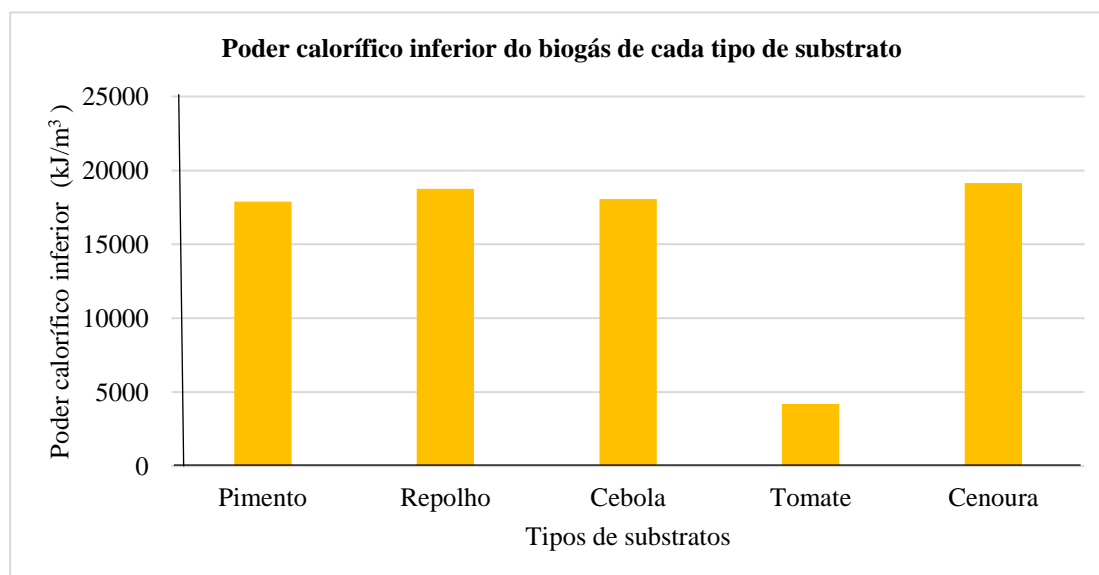


Gráfico 4.5 - Gráfico demonstrativo do poder calorífico inferior do biogás de cada tipo de substrato.

Fonte: (Autor)

Verificou-se que o biogás produzido pelo substrato cenoura teve maior poder calorífico inferior em relação ao biogás produzido pelos demais substratos, segue o biogás produzido pelo substrato repolho, e por fim temos o biogás produzido pelos substratos cebola, pimento e tomate respectivamente.

4.2.2. Determinação do poder calorífico superior do biogás

$$PC_{SB} = (\%CH_4) \times \rho_{CH_4} \times PC_{SCH_4} \quad (4.3)$$

Onde:

$$PC_{SCH_4} = 55\,545 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$\rho_{CH_4} = 0,72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Substrato pimento

$$PC_{SB} = 0,497 \times 0,72 \times 55\,545 = 19\,876,22 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Substrato repolho

$$PC_{SB} = 0,521 \times 0,72 \times 55\,545 = 20\,836,04 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Substrato cebola

$$PC_{SB} = 0,502 \times 0,72 \times 55\,545 = 20\,076,18 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

Substrato tomate

$$PC_{SB} = 0,117 \times 0,72 \times 55\,545 = 4\,679,11 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Substrato cenoura

$$PC_{SB} = 0,532 \times 0,72 \times 55\,545 = 21\,275,95 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

Tabela 4.3 - Resultados do cálculo do poder calorífico superior do biogás.

Substrato	Poder calorífico inferior	PC_{SB} (kJ·m ⁻³)
Pimento		19 876,22
Repolho		20 836,04
Cebola		20 076,18
Tomate		4 679,11
Cenoura		21 275,95

Fonte: (Autor)

A seguir encontra-se o gráfico que demonstra a variação do PC_{SB} de cada tipo de substrato.

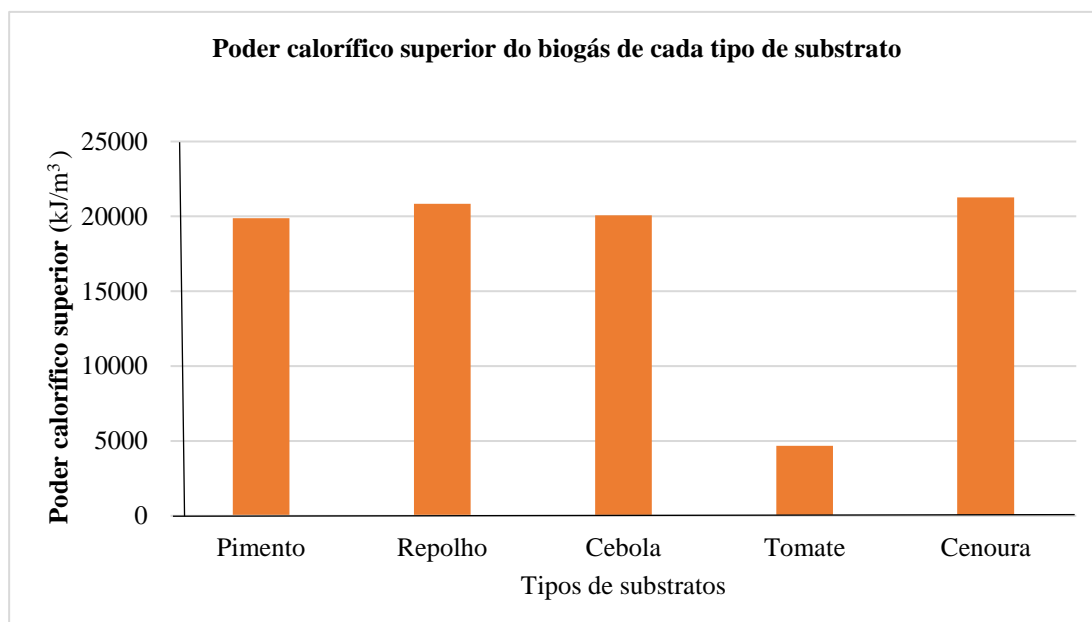


Gráfico 4.6 - Gráfico demonstrativo do poder calorífico superior do biogás de cada tipo de substrato.

Fonte: (Autor)

Verificou-se que o substrato cenoura teve maior poder calorífico superior, segue o biogás produzido pelo substrato repolho, em terceiro lugar encontra-se o biogás produzido pelo substrato cebola, no quarto lugar temos o biogás produzido pelo substrato pimento e por fim temos o biogás produzido pelo substrato e tomate, sendo este com o poder calorífico abaixo do esperado.

CAPÍTULO V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Neste trabalho foram construídos 5 mini biodigestores com material caseiro, que mostraram-se eficientes para a produção de biogás. Os reactores dos mini biodigestores foram alimentados de forma descontínua, postos a operar sob mesmas condições, os biodigestores foram construídos com material transparente, isso possibilitou uma visão mais clara do que se passava no interior dos mesmos e quase todos apresentaram um funcionamento óptimo ao longo do período da realização dos experimentos.

Terminado o trabalho, os objectivos foram alcançados e verificou-se que:

- A produção de biogás no biodigestor, tendo como base uma alimentação em batelada de substratos vegetais é viável, visto que dos 5 biodigestores instalados 4 produziram biogás com uma percentagem de metano acima de 48%, apenas o biodigestor alimentado com o substrato tomate é que demonstrou menor eficiência, pois produziu biogás com apenas 11,7% de metano, acredita-se que tenha havido fuga de gás ao longo do processo, ou material não biodegradado pelo sistema no biodigestor alimentado com o substrato tomate, porém acredita-se que com adição de um inoculante poderia ter obtido-se percentagens de metano maiores que os obtidos;
- Os poder calorífico inferior calculado do biogás gira em torno de $17\ 892\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ e $19\ 152\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ e o poder calorífico superior gira em torno de $19\ 876,22\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ e $21\ 275,95\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ tomando em consideração os biodigestores que operaram de maneira satisfatória. O valor do poder calorífico do biogás produzido por cada substrato é directamente proporcional à percentagem de metano contida no biogás produzido seguindo a seguinte ordem crescente: tomate, pimento, cebola, repolho e cenoura.
- O poder calorífico do biogás depende da percentagem de metano contido no mesmo, quanto maior for a percentagem de metano no biogás maior será seu poder calorífico e vice-versa.

5.2. Recomendações

Os resultados obtidos do experimento neste trabalho no geral servem para ter uma ideia do desempenho de um biodigestor de resíduos orgânicos, para realizar um projecto real recomenda-se adicionar inoculantes na mistura do substrato pois desempenha o papel de catalizador das reacções, reduzindo desta forma o tempo de detenção hidráulica.

Deve-se tomar cuidado com o material que é injectado no digestor para que o mesmo não possua nutrientes em excesso, desinfetantes fortes, bactericidas, combustíveis derivados de petróleo entre outros elementos que possam contaminar o substrato e ser fatal para as bactérias envolvidas no processo biológico de formação do biogás .Por esse fato, produtos provenientes de abatedouros ou frigoríficos e a água de lavagem de utensílios, de dependências (linha de produção, cozinha e refeitório, banheiros e vestiários) e de lavagem de caminhões não deve ser introduzida no digestor, pois contém elevada carga de detergentes, desinfetantes e derivados de petróleo.

CAPÍTULO VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AIRTON, Kunz; et al. *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*, Concórdia, 2019.
- (2) AMARAL, C. C, et al. *Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica*, Revista Ciência Rural, vol.34, n°.6, 2004.
- (3) ANEEL. *Balanco Energético Nacional – BEN*, Brasília: MME, 1982 - adaptado por CENBIO,
- (4) ARAÚJO, Ana. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico*, Uberlândia, 2017.
- (5) BOFIM, Oamar; etal. *Estimativa do potencial de geração de biogás oriundo de resíduos de polpa de maracujá e acerola*, São Paulo.
- (6) CASSINI, S. T; COELHO, S. T; PECORRA, V. 2014. *Biogás-biocombustíveis ANP*, Brasil.
- (7) CHRISTO, Giovanna, etal. *Potencial de produção de biogás e energia eléctrica a partir de resíduos de hortifruticultura em Colombo-Pr*, Panamá, Brasil.
- (8) DEGANUTTI, R, et al. *Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada*. In: *40 encontro de energia meio rura*, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP, São Paulo, 2002.
- (9) DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources*, Ed. Wiley-VCH, 2008.
- (10) FILHO, José. *Independência energética pantanal mato grossense*, embrapa, Brasil, 1981.
- (11) FONSECA, F. S. T, et al. *Análise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA: um estudo de caso*. In: *congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural*, Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.
- (12) GOLDEMBERG, José; *Energia e Desenvolvimento Sustentável: Série Sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2010.
- (13) GOLDEMBERG, José; PALETTA, Francisco Carlos. *Energias Renováveis: Série Energia e Sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2012

- (14) HONÓRIO, Micheline. *Estimativa de crédito de carbono da produção e queima do biogás proveniente de dejetos suínos*, Florianópolis – SC, 2009.
- (15) KARLSSON, Tommy; KONRAD, Odorico, et al. *Manual básico de biogas*, Univates, RS, Brasil, 2014.
- (16) KRETZER, Stéfano; et al. *Produção de biogás em diferentes resíduos orgânicos de restaurante universitário*, Brasil, 2016.
- (17) LORA, Electo; ANDRADE, Rubenildo. *Gaseificação e pirólise para conversão de biomassa em electricidade e biocombustíveis*, Brasil, 2012.
- (18) MEDEIROS, Gleidson. *Proposta de um biodigestor anaeróbico modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos orgânicos*, Brasília, 2014.
- (19) METZ, Hugo. *Construção de um biodigestor caseiro para demonstração de produção de biogás e biofertilizante em escolas situadas em meios urbanos*, TCC, Universidade Federal de Lavras, 2013.
- (20) MOÇO, Eunice. *Projecto de uma unidade produtora de biogás*, Mestrado, Instituto Politécnico de Tomar.
- (21) NHAMBIU, Jorge, *Sistemas energéticos: Tipos de energia*, notas do docente, UEM, Maputo, 2017.
- (22) OLIVER, A. P. M. et al. *Manual de treinamento em biodigestão*, 2014.
- (23) PEREIRA, M. F. *Construções Rurais*, São Paulo: Nobel, 1999.
- (24) PINTO, D. M. C. L. *Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolato*, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2000.
- (25) REIS, A. S. *Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio*, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2012.
- (26) Renewable energy atlas of mozambique - resources and projects for power generation.
- (27) ROCHO, Camila. *Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbico de resíduos alimentares*, TCC, Faculdade de engenharia da UFJF, Brasil, 2016.

(28) SOUTO, G. D. B. *Efeito da Variação Gradual da Taxa de Recirculação do Lixiviado em Reatores Anaeróbios Híbridos na Digestão da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos*, Dissertação de Mestrado - Escola de engenharia de São Carlos, Área: Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 2005.

(29) <https://www.vgresiduos.com.br>, 6 de Outubro de 2021

(30) <https://portalresiduossolidos.com.br>, 6 de Outubro de 2021

(31) <https://www.educapoint.com.br>, 6 de Outubro de 2021

(32) <https://www.geotech5000.com>, 28 de Fevereiro de 2022

ANEXOS