



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E VIABILIDADE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA EM
ESCALA AGRÍCOLA: ESTUDO DE CASO DA INSTALAÇÃO E MONITORAMENTO
DE UM BIODIGESTOR PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Autora:

Daniela Lucília Mandlate

Supervisor:

Doutor Carlos Lucas, Eng.º

Co-supervisor:

Doutor Adolfo Condo, Eng.º

Maputo, Abril de 2024



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E VIABILIDADE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA EM
ESCALA AGRÍCOLA: ESTUDO DE CASO DA INSTALAÇÃO E MONITORAMENTO
DE UM BIODIGESTOR PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Autora:

Daniela Lucília Mandlate

Supervisor:

Doutor Carlos Lucas, Eng.º

Co-supervisor:

Doutor Adolfo Condo, Eng.º

Maputo, Abril de 2024

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Daniela Lucília Mandlate entregou no dia ___/___/2024 as ___
cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência:

Intitulado: “Avaliação da eficiência e viabilidade da biodigestão anaeróbica em escala agrícola: Estudo de caso de instalação e monitoramento de um biodigestor para produção de biogás”.

Maputo, ___ de _____ de 2024.

O Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro por minha honra que este trabalho é fruto da minha própria investigação e nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau. Constitui o fruto do trabalho laboratorial e pesquisa bibliográfica, estando as fontes utilizadas no texto e na bibliografia.

Maputo, Abril de 2024

Daniela Lucília Mandlate

Dedicatória

Dedico este trabalho as minhas queridas tia Yolanda e avó Lucília (em memória), por todo amor, amizade e nunca permitirem que eu deixasse de acreditar nos meus sonhos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradecer à Deus pelo dom da vida e permitir-me viver o meu propósito segundo à Sua vontade.

Aos meus pais, Arlindo e Maria Amélia, por toda dedicação e inspiração, por serem os meus maiores incentivadores e por lutarem todos os dias para darem-me o melhor. Muito obrigada por terem-me transmitido os princípios e valores que tornaram-me na mulher que sou hoje.

Ao meu irmão Alan que abrilhanta a minha vida desde que nasceu, por todos os sorrisos espontâneos e gargalhadas que tirou de mim durante as minhas longas noites de estudo.

Ao meu namorado Dempsey pelo companheirismo, carinho, torcida e por diariamente lembrar-me que sou uma verdadeira empoderada. Obrigada pelo suporte emocional incondicional.

Aos meus colegas de faculdade da turma de 2018, aos da *Dream Team* e em especial Bendita, José Jamú, Chris, Yunus, Ébe, Fainesse, João Pery, Auziane, Isaías e Mapire, que tornaram a caminhada mais leve e feliz, por nunca terem medido esforços de partilhar os seus conhecimentos.

Aos meus colegas de trabalho de campo em Moamba, Albino, Agostinho, Marta, Arão e Vutane, por tornarem-me uma engenheira mais forte para o mercado de trabalho e terem sido a força motriz para a evolução deste trabalho.

Aos meus amigos Carla, Próspero, Nuno e Kesney, pelas alegrias partilhadas, apoio nesses anos de convivência e perceberem sempre as fases em que precisava de isolar-me em prol dos meus objectivos.

Aos meus tios Marlene e Arcénio, por sempre tratarem-me como filha, nunca medindo esforços para que eu estivesse feliz e bem encaminhada na vida.

Aos professores Carlos Lucas, Miguel Uamusse e Adolfo Condo, exemplos de profissionais, pelos conhecimentos transmitidos e contribuição de forma significativa para este trabalho.

Por último e não menos importante, agradeço a mim própria, por superar tantos obstáculos e estar aqui super poderosa a alcançar um marco histórico na minha vida.

Tantos choros, noites em claro e dúvidas se estava no caminho certo. *Look at me now, I MADE IT!*

“Todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus.”

- Romanos 8:28

RESUMO

O presente trabalho aborda três etapas: caracterização físico-química do esterco de galinha, montagem do biodigestor e monitoria do processo de biodigestão. Em relação à biomassa *in natura* foram determinados os seguintes parâmetros: DBO (2.3mg/L), proteína (11.46%), gorduras (1.71%) e densidade (956kg/m³). A segunda etapa refere-se a montagem do biodigestor, que foi pré-fabricado na China e instalado numa Quinta em Moamba, adicionalmente calculou-se o fluxo diário de alimentação (1:1) com base nas dimensões do biodigestor (15m³). A última etapa consistiu no monitoramento do processo de biodigestão, em que se fez a recolha diária da amostra do substrato, em garrafas plásticas de 500 ml para análise garantindo as seguintes condições operatórias: faixa de temperatura mesofílica (25-40°C), pH aceitável (6.2-7.4), sólidos totais (5%) e sólidos voláteis removidos (63%).

Como resultado da biodigestão anaeróbica, obteve-se: produção de biogás de 6.28m³ diários, poder calorífico do biogás de 6264 kJ/m³, composição do biogás (medida com o BIOGAS 5000 da GeoTech) indicando 44% de metano, 40% de dióxido de carbono e o restante resíduos (vapor de água e gás sulfídrico).

O biogás produzido foi utilizado na própria Quinta Mothassy Investimentos como gás de cozinha e fertilizante agrícola.

Palavras-chaves: Caracterização físico-química, biodigestão anaeróbica, biogás, energias renováveis.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Justificativa | 2 |
| 1.2. Objectivos | 3 |
| 1.2.1. Geral | 3 |
| 1.2.2. Específicos: | 3 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 2.1. Energia | 4 |
| 2.1.1. Formas de Energia | 4 |
| 2.1.2. Fontes de Energia | 5 |
| 2.2. Energias renováveis em Moçambique | 5 |
| 2.2.1. Produção e consumo de Energia..... | 5 |
| 2.3. Biogás..... | 8 |
| 2.3.1. Breve historial sobre a criação de galinha | 11 |
| 2.3.2. Excremento de galinha e cogeração de energia..... | 12 |
| 2.3.3. Excremento de galinha e o processo de digestão anaeróbica..... | 12 |
| 2.3.4. Tipos de biodigestores..... | 18 |
| 2.3.5. Purificação e refino do biogás..... | 19 |
| 2.3.6. Poder calorífico..... | 21 |
| 3. MONTAGEM E INSTALAÇÃO DO BIODIGESTOR | 23 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 4.1. Local do estudo..... | 26 |
| 4.2. Colecta da matéria-prima..... | 26 |
| 4.3. Análise físico-química da matéria-prima | 27 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.1. | Temperatura, pH e condutividade | 27 |
| 4.3.2. | Demanda Bioquímica de Oxigénio | 27 |
| 4.3.3. | Série de sólidos | 28 |
| 4.3.4. | Proteínas | 29 |
| 4.3.5. | Lípidios: | 30 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 5.1. | Temperatura, pH e condutividade | 32 |
| 5.2. | Humidade e Série de sólidos | 33 |
| 5.3. | Demanda Bioquímica de Oxigénio (DBO) | 34 |
| 5.4. | Densidade..... | 34 |
| 5.5. | Lípidios | 35 |
| 5.6. | Proteínas..... | 36 |
| 5.7. | Monitoria da alimentação diária e produção de biogás | 37 |
| 5.8. | Estimativa do biogás produzido vs. Biogás realmente produzido | 42 |
| 5.9. | Determinação do poder calorífico do biogás e teste de queima | 43 |
| 5.10. | Impactos ambientais, sociais e económicos da actividade em estudo | 44 |
| 6. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 47 |
| 6.1. | Conclusões | 47 |
| 6.2. | Recomendações | 47 |
| | Bibliografia | 49 |
| | Apêndices | I |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Localização geográfica, divisão administrativa de Moçambique e principais indicadores socioeconómicos (Fonte: INE, 2020). | 1 |
| Figura 2: Potencial Renovável Identificado (SORTORI et al., 2017) | 7 |
| Figura 3: Consumo da Energia em Moçambique (SORTORI et al., 2017). | 8 |
| Figura 4: Origem do biogás (fonte: adaptado pela autora). | 11 |
| Figura 6: Esquema tridimensional do biodigestor. | 23 |
| Figura 7: Diagrama simplificado da unidade de produção de biogás. (PUXIN Manual) | 24 |
| Figura 8: a) galinhas de postura em andares no aviário; b) cama de frango; c) colecta da amostra. | 27 |
| Figura 9: a) reagentes para mistura de diluição; b) adição dos reagentes no balão de diluição. | 28 |
| Figura 10: a) balões com a amostra e água de diluição; b) análise de DBO; c) oxímetro | 28 |
| Figura 11: a) Mufla; b) Cadinhos dentro da mufla. | 29 |
| Figura 12: a) Digestor b) Destilador c) Método titulométrico | 30 |
| Figura 13: Equipamento em tamanho real e em fluxograma de determinação de gordura. | 31 |
| Figura 14: Gráfico da influência do pH na condutividade. | 33 |

Índice de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Características dos tipos de processo. | 20 |
| Tabela 2: Peso Específico e Poder Calorífico Inferior em relação a quantidade de metano presente. | 22 |
| Tabela 3: Equipamentos, materiais e reagentes do trabalho..... | 25 |
| Tabela 4: Peso das amostras em estudo. | 32 |
| Tabela 5: Parâmetros físicos da amostra. | 32 |
| Tabela 6: Determinação da série de sólidos..... | 33 |
| Tabela 7: Medição da demanda bioquímica de oxigênio..... | 34 |
| Tabela 8: Análise de gordura de esterco de galinha..... | 35 |
| Tabela 9: Ensaio de proteínas. | 36 |
| Tabela 10: Dados para estimativa de biogás..... | 42 |
| Tabela 11: Impactos ambientais. | 44 |
| Tabela 12: Análise SWOT (FOFA)..... | 45 |

Lista de abreviaturas, acrónimos e siglas

ALER – Associação Lusófona de Energias Renováveis

EDENR – Estratégia de Desenvolvimento de Energias Novas e Renováveis

EDM – Electricidade de Moçambique

ER – Energias Renováveis

FG – Fresco de Galinha

FUNAE – Fundo Nacional de Energias

GEE – Gases de efeito estufa

GEF – Fundo Global para o Meio Ambiente

GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

ONU – Organização das Nações Unidas

% – Percentagem

kg – Quilograma

kCal - Quilocaloria

kJ – Quilojoule

QTY - Quantidade

REN – Rede Eléctrica Nacional

SG – Seco de Galinha

UEM – Universidade Eduardo Mondlane

UNIDO – Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial

1. INTRODUÇÃO

A escassez e aumento nos preços dos recursos energéticos tem levado a uma procura a nível global por fontes alternativas, tais como energia solar, eólica e de biomassa. Nesse contexto, uma tendência é a da recuperação energética de resíduos orgânicos, tais como resíduos industriais, resíduos sólidos municipais e resíduos agrícolas. (MAGALHAES, et al., 2003)

Moçambique está entre os 20 países com o maior défice de acesso a energia no mundo, com cerca de 22 dos 30 milhões de habitantes sem electricidade (Relatório do Progresso Energético da ONU, 2023) . Pela localização geográfica (Figura 1) e as condições geológicas, Moçambique dispõe de uma vasta gama de recursos energéticos renováveis e não renováveis, que provêm condições favoráveis para satisfazer as necessidades energéticas locais e regionais.



Figura 1: Localização geográfica, divisão administrativa de Moçambique e principais indicadores socioeconómicos (Fonte: INE, 2020).

As energias renováveis são fontes de energia que se regeneram naturalmente com o tempo e não se esgotam. Elas são a parte mais importante da transição para um sistema de energia que abandona os combustíveis fósseis, combatendo assim o aquecimento

global. Além disso, são energias limpas que protegem a saúde humana e o meio ambiente. (FELTRE, 2004)

Apesar do alto custo de instalação de tecnologias de ER, a utilização das fontes renováveis de energia pode reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, reduzir os desperdícios e ampliar o acesso à energia e, desta forma, influir na inserção económica e social da população “excluída”, gerando emprego e renda com custos ambientais reduzidos. Além disso, os países em desenvolvimento poderiam criar tecnologias verdes localmente disponíveis que sejam adequadas às suas localizações e condições (TUN *et al.*, 2019). A massificação do uso das ER é um indicador do cumprimento de diversas normas nacionais e internacionais sobre sustentabilidade energética.

Em virtude dos factos mencionados, o presente estudo visa, especialmente, avaliar o potencial do esterco das aves na produção de energia, aplicando a tecnologia de conversão bioquímica, nomeadamente a digestão anaeróbica.

A motivação para a realização do trabalho foi baseada no facto das fontes renováveis serem limpas e atenderem à vários aspectos importantes da gestão económica e ambiental da sociedade contemporânea. Como metodologia do trabalho foram realizadas pesquisa bibliográfica, experiências laboratoriais, trabalho de campo onde se fez o acompanhamento do funcionamento de um biodigestor anaeróbico instalado na Quinta Mothassy (Distrito de Moamba, Província de Maputo).

1.1. Justificativa

O aproveitamento de resíduos agropecuários, em geral esterco de animais, tem sido campo de pesquisa e desenvolvimento. A transformação da matéria orgânica em biogás e biofertilizante contribui para a diminuição da poluição nas zonas rurais, como emissão de metano, dióxido de carbono e a contaminação dos lençóis freáticos e rios. Pela versatilidade do biogás no modo que pode ser usado, sendo geralmente para produção de energia eléctrica e aquecimento. Os gases de efeito estufa evitados com a implementação do biodigestor, podem ser posteriormente negociados e vendidos como créditos de carbono.

1.2. Objectivos

1.2.1. Geral

O presente trabalho tem como objectivo geral avaliar de forma prática e aplicada, a eficiência da biodigestão anaeróbica para produção de biogás a partir do esterco de galinha.

1.2.2. Específicos:

- ✓ Determinar as características físicas e químicas do esterco da galinha;
- ✓ Instalar e estudar um biodigestor pré-fabricado;
- ✓ Discutir sobre os impactos e benefícios da implementação desta tecnologia renovável;
- ✓ Avaliar o desempenho da digestão anaeróbica;
- ✓ Determinar do poder calorífico do biogás.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Energia

De acordo com a Resolução n.º 62/2009 (Boletim da Republica, 2009), energia é medida da capacidade que um corpo, sistema físico ou substância tem de realizar algum tipo de trabalho mecânico ou equivalente.

2.1.1. Formas de Energia

As sociedades humanas dependem cada vez mais de um elevado consumo energético para sua subsistência. Para isso foram sendo desenvolvidos ao longo da história diversos processos de transformação, transporte e armazenamento de energia. Na realidade, em acordo com o expresso pela primeira lei da termodinâmica e pelos conceitos de energia interna e energia térmica, só existem, além da energia pura radiante, duas formas de energia armazenadas em um sistema: a potencial e a cinética. No cotidiano, entretanto, estas acabam recebendo nomes específicos que geralmente fazem referência explícita à natureza do sistema envolvido no armazenamento ou às plantas industriais onde estas são levadas à transformação. Assim tem-se a energia hidráulica como sinónimo de energia potencial gravitacional ou mesmo cinética armazenada nas águas de uma represa hidroeléctrica, que conforme o nome diz, cuida da conversão de energia "hidráulica" em energia potencial eléctrica; a energia nuclear para a energia potencial associada à interacção nuclear forte, ou até mesmo, em senso comum, para a energia eléctrica produzida em termoeléctricas cujas fontes de energia térmica sejam reactores nucleares; a energia eólica associada à energia cinética de movimento das massas de ar (ventos); a energia solar associada à radiação electromagnética com origem no Sol e energia geotérmica associada à energia térmica do interior da terra (RESNICK *et al.*, 1996).

2.1.2. Fontes de Energia

Fontes de energia são opções energéticas com origens diversas. Dividem-se em fontes renováveis e fontes não renováveis (FORTES *et al.*, 2019):

- ✓ As **fontes renováveis** de energia são aquelas que possuem a capacidade de serem repostas naturalmente, o que não significa que todas elas sejam inesgotáveis. Algumas delas, como o vento e a luz solar, são permanentes, mas outras, como a água, podem acabar dependendo da forma como são usadas pelo ser humano. Vale lembrar que nem toda fonte renovável de energia é limpa, ou seja, está livre da emissão de poluentes ou de impactos ambientais;
- ✓ As **fontes não renováveis** de energia são aquelas que poderão esgotar-se futuramente. Alguns recursos energéticos, como o petróleo, possuem seu esgotamento estimado para algumas poucas décadas, o que eleva o carácter estratégico desses elementos.

2.2. Energias renováveis em Moçambique

2.2.1. Produção e consumo de Energia

O Governo de Moçambique assumiu o compromisso de providenciar energia de qualidade, acessível e sustentável a todos os Moçambicanos até 2030, tendo para esse propósito lançado o Programa Energia para Todos, coordenado pelo MIREME (ALER, 2023).

De acordo com o relatório da ALER (2023), em 2023 a taxa de electrificação total é de 51,3%, dos quais 44,7% garantidos através da rede eléctrica e os restantes 6,6% por sistemas fora da rede. Segundo o Roadmap de electrificação fora da rede publicado pelo FUNAE, a ambiciosa meta de 100% de acesso à electricidade até 2030 será garantida maioritariamente graças à extensão da rede nacional (68%), mas os sistemas fora da rede também desempenharão um papel de relevo, nomeadamente 19% através de Sistemas Solares Caseiros (SSC) e 13% de mini-redes.

Moçambique tem um extenso potencial para energias renováveis. O Atlas das Energias Renováveis de Moçambique, publicado pelo FUNAE em 2014, indica um potencial total de 23.026 GW que corresponde a 7.537 MW de projectos prioritários, entre os quais se destacam 599 MW de solar, 5.645 MW de hídrica e 1.146 MW de eólica.

O potencial hídrico é o mais aproveitado e corresponde a 78% do total actual de 2.799 MW de potência instalada em Moçambique. De destacar que, deste total, apenas 39% estão de facto disponíveis para consumo nacional, uma vez que parte se destina a exportação ou a consumo próprio (veja-se o caso da HCB, em que dos 2.075 MW instalados apenas 500 MW estão disponíveis para a EDM).

O potencial das novas renováveis em Moçambique começou a ser explorado em grande escala desde 2019. A capacidade de renováveis ligada à rede, em 2022 de 60 MW solar, aumentará para 575 MW até 2030, tanto de energia solar como eólica, ultrapassando as projecções do Plano Quinquenal do Governo, que prevê que dos 600 MW adicionais a injectar na rede nacional até 2030, 200 MW seriam de energias renováveis.

A capacidade total instalada em 2023 é de 2.841 MW e até 2030 prevê-se que aumente 127% para 6.462 MW.

Em 2030 a capacidade de geração hídrica aumentará significativamente para 4.542 MW, graças ao contributo da central de Mphanda Nkuwa (1.500 MW), mas também de Lupata (600 MW), Boroma (200 MW) e Tsate (50 MW).

O potencial das novas renováveis começou a ser explorado em grande escala desde 2019. A capacidade de novas renováveis ligada à rede, hoje de 75 MW solar correspondentes apenas a 2,6%, aumentará para, pelo menos, 690 MW até 2030, que representarão 10,7%, tanto de energia solar como eólica. Este valor ultrapassa as projecções do Plano Quinquenal do Governo 2020-2024, que previa que dos 600 MW adicionais a injectar na rede nacional até 2030, 200 MW seriam de energias renováveis.

O relatório da ALER (2023) indica ainda que ao nível da produção de electricidade, as renováveis mantiveram-se como a principal fonte e representaram 62% da geração em 2022, apesar do aumento da geração térmica desde 2015 com a entrada em operação

de várias centrais a gás. As centrais geridas pela EDM foram responsáveis por 13% da geração de electricidade, os produtores independentes 31% e a HCB 56%. Em 2022, Moçambique exportou 27% da sua produção para cinco países vizinhos, e de futuro o país pretende posicionar-se como o polo energético na região da SADC.

Conforme a figura 2, a energia solar é a fonte renovável mais abundante em Moçambique com 23.000 GW de potencial, no entanto a hídrica é a fonte que apresenta mais projectos prioritários (GUEIFAO *et al.*, 2013)

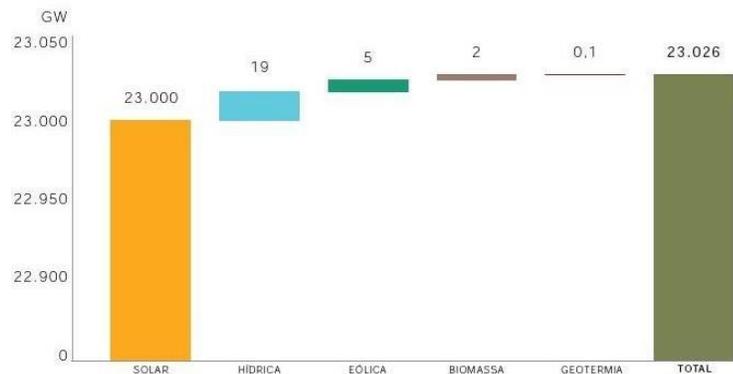


Figura 2: Potencial Renovável Identificado (SORTORI et al., 2017)

De acordo com a figura 3, somente a biomassa tradicional e energias não renováveis contribuem para o consumo de energias em Moçambique. Na sua maior parte, a biomassa tradicional é utilizada em actividades de carácter doméstico, como aquecimento de água e confecção de alimentos. Desta forma, a população rural depende predominantemente de lenha para fins energéticos, enquanto que maior parte da população urbana utiliza carvão vegetal na cozinha.

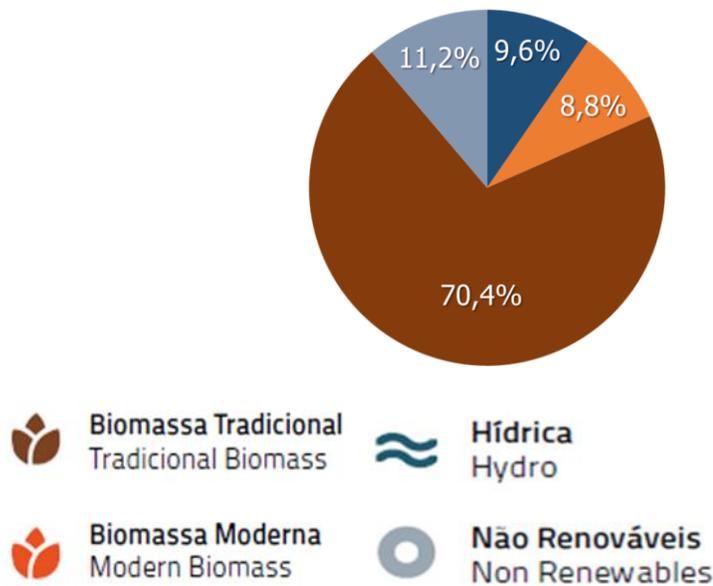


Figura 3: Consumo da Energia em Moçambique (SORTORI et al., 2017).

2.3. Biogás

O biogás é um tipo de biocombustível obtido por fermentação anaeróbica de biomassa (de origem vegetal ou animal), produzindo uma mistura de gases cuja maior parte é composta de metano e dióxido de carbono.

De acordo com DEUBLEIN & STEINHAUSER (2011) a formação do metano é um processo biológico que ocorre naturalmente quando o resíduo orgânico (biomassa) se decompõe em uma atmosfera húmida na ausência de oxigênio, mas na presença de um grupo de micro-organismos que são metabolicamente activos.

A biomassa adequada para digestão anaeróbica é denominada “substrato”. Quando se trata de produção de biogás, substrato é toda biomassa (matéria orgânica de origem vegetal ou animal) usada com a finalidade de produzir energia por meio do processo de digestão anaeróbia. Todo resíduo orgânico é uma biomassa. Em geral, todos os tipos de biomassa podem ser usados como substratos, desde que contenham carboidratos, proteínas, gorduras, celulose e hemicelulose como componentes principais.

Para isso, é necessário observar o tipo de resíduo orgânico utilizado e a temperatura ambiente. Quanto mais alta a temperatura ambiente, mais rápida será a fermentação.

De acordo com DEUBLEIN e STEINHAUSER (2011), a decomposição dos resíduos orgânicos ocorre em quatro fases dentro do biodigestor: São:

- ✓ Na primeira fase (a hidrólise), compostos não dissolvidos, como celulose, proteínas e gorduras, são quebrados em monômeros (fragmentos solúveis em água) por exoenzimas (hidrolase) de bactérias facultativas e obrigatoriamente anaeróbias.

A hidrólise dos carboidratos ocorre em poucas horas, a hidrólise de proteínas e lipídios em poucos dias. A lignocelulose e a lignina são degradadas apenas de forma lenta e incompleta.

Os microrganismos anaeróbios facultativos absorvem o oxigênio dissolvido na água e, assim, causam o baixo potencial redox necessário para microrganismos obrigatoriamente anaeróbios.

- Acidificação ou estágio de fermentação: os compostos solúveis da fase anterior são fermentados em ácidos graxos voláteis, alcoóis, hidrogênio e CO₂.

Os monômeros formados na fase hidrolítica são absorvidos por diferentes bactérias facultativas e obrigatoriamente anaeróbias e são degradados na segunda, a fase acidogênica, em ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas C1 - C5 (por exemplo, ácido butírico, ácido propiônico, acetato, ácido acético), álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. A concentração dos íons hidrogênio formados intermediariamente afecta o tipo de produtos da fermentação. Quanto maior a pressão parcial do hidrogênio, menos compostos reduzidos, como o acetato, são formados.

- Acetanogênese: Os produtos da fase acidogênica servem de substrato para outras bactérias, as da fase acetogênica. Bactérias acetogênicas oxidam ácidos orgânicos como fonte de carbono gerando ácido acético (CH₃COOH), hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂) e odores desagradáveis.

Os microrganismos produtores de acetogênicos e metano devem, portanto, viver em simbiose. Organismos metanogênicos só podem sobreviver com pressão

parcial de hidrogênio mais alta. Eles removem constantemente os produtos do metabolismo das bactérias acetogênicas do substrato e assim mantêm a pressão parcial do hidrogênio, p_{H_2} , em um nível baixo adequado para as bactérias acetogênicas.

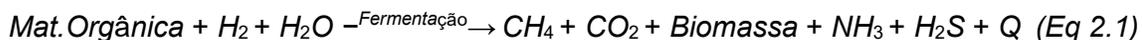
Quando a pressão parcial do hidrogênio é baixa, H_2 , CO_2 e acetato são formados predominantemente pelas bactérias acetogênicas. Quando a pressão parcial do hidrogênio é mais alta, formam-se predominantemente ácidos butírico, caprônico, propiônico e valérico e etanol. A partir destes produtos, os microrganismos metanogênicos podem processar apenas acetato, H_2 e CO_2 .

- Metano ou formação de fases metanogênicas: as bactérias metanogênicas agem na decomposição dos produtos da acetanogênese, gerando metano. Deste modo, o carbono contido na biomassa é convertido a dióxido de carbono e metano através da ação das arqueas metanogênicas. Nesta quarta fase, a formação do metano ocorre em condições estritamente anaeróbicas. Esta reação é categoricamente exergônica.

O biogás se acumula na parte superior do digestor e é extraído através de tubos para tanques de armazenamento.

Terminada a fermentação, o lodo (uma mistura de sólidos e líquidos) é extraído através de tubos.

Resumidamente pode-se considerar a seguinte equação 2.1:



As vantagens da produção e uso do biogás estão directamente relacionadas com a sustentabilidade ambiental, uma vez que se trata de uma fonte de energia renovável (Figura 4). Além disso, é uma alternativa barata pois o nosso país apresenta grande potencial para adopção dessa fonte de energia (ALER, 2017).

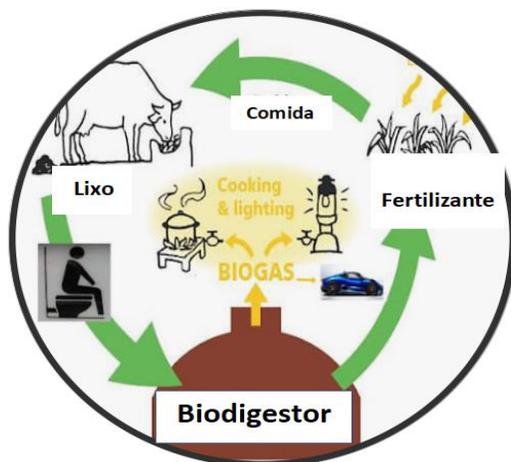


Figura 4: Origem do biogás (fonte: adaptado pela autora).

2.3.1. Breve historial sobre a criação de galinha

A galinha é a espécie que pelo número de criadores (89%), ocupa o primeiro lugar num ordenamento de prioridades, preferências e de importância de cada uma das espécies para o produtor (HARUN & MASSANGO, 1996). As espécies criadas no sector familiar são geralmente aves, porque tem capacidade de sobreviver em condições de manejo extensivo, resistente a doença, com capacidade de voar e fugir dos predadores.

O manejo alimentar neste sector varia de região para região, havendo regiões onde há suplementação, e outras regiões sem suplementação. Nos distritos de maior escassez de produção de cereais as galinhas não são suplementadas e alimentam-se a base de insectos e de desperdícios alimentares .

A postura das galinhas é feita nas capoeiras, nos locais onde os criadores têm capoeira em que é construída um ninho. Nas regiões onde não há capoeiras, as posturas e as incubações são realizadas dentro das casas, ou no mato por volta dos quintais, nestes casos, quando chega o momento incubação, os criadores das aves muitas vezes recolhem as galinhas para dentro das casas, para assim as protegerem dos predadores. (GUEYE, 2000)

2.3.2. Excremento de galinha e cogeração de energia

O biogás produzido a partir da biodigestão da cama de frango, pode ser utilizado para o aquecimento dos pintinhos, através de equipamentos onde ocorrerá a queima do biogás e consequente produção de calor, fundamental para sobrevivência nas duas primeiras semanas de vida destes animais. Pode também substituir a energia eléctrica, como por exemplo, na iluminação (lâmpadas), no aquecimento da água (para esterilização de equipamentos, lavagem das instalações, chuveiros), em fogões, na moagem de grãos, etc.

Dito isto, o excremento de galinha pode ser transformado em outras formas de energia como calor, electricidade ou tracção – cogeração. A cogeração pode ser definida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil (SEIFERT, 2011). Ela apresenta vantagens ambientais como a redução da emissão de CO₂ decorrente da geração de energia termoeléctrica a partir de combustíveis fósseis. A cogeração é indispensável porque satisfaz a demanda energética e ainda faz uso do bagaço, evitando com que este seja descartado para o ambiente e cause impactos negativos.

2.3.3. Excremento de galinha e o processo de digestão anaeróbica

Durante a criação das galinhas, elas ficam confinadas no galpão e se torna necessário um material que possa absorver a humidade (proveniente das fezes, urina e água de bebedouros mal regulados e/ou vazamentos no sistema hidráulico), restos de ração e penas. Assim, a finalidade da cama é de proporcionar um ambiente sanitariamente seguro ao plantel, onde este não tenha contacto com humidade e microorganismos que possam comprometer sua saúde, servir de substrato para absorção de água e urina, incorporação das fezes e penas e contribuir para redução das oscilações de temperatura no galpão. (AVILA, MAZZUCO, & FIGUEIREDO, 2007)

O manejo da cama consiste em mantê-la sempre seca e uma vez por semana revolver toda cama do galinheiro, o emplastamento pode causar problemas de fungos e bactérias, calo no peito dos animais e erosão das patas. O ideal é que a cama permaneça amontoada aproximadamente por 21 dias, permitindo uma boa fermentação e um bom vazão sanitário. (BERNY & BAJAY, 2000)

O aquecimento de pintos é fundamental, pois a não manutenção de temperaturas ideais nos galpões, pode causar elevada mortalidade no início de vida destes. Mas a manutenção deste ambiente ideal tem um custo elevado, podendo ser feitas por campânulas e cortinas internas na transversal do galpão.

Pesquisas realizadas no segundo semestre de 2002 pela Embrapa demonstraram que os gastos com os equipamentos para aquecimento (campânulas e botijões de gás), representaram 9,6% do custo total de construção de um aviário.

No processo de biodigestão anaeróbica, a matéria orgânica presente nos efluentes é transformada pela acção dos microorganismos em aproximadamente 78% de biogás, sendo este constituído de uma mistura de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), 20% de material orgânico que continua em dissolução, e entre 1 a 2% de novos microorganismos.

Para que o processo possa funcionar eficientemente, é fundamental o estabelecimento de condições propícias à actividade vital dos microorganismos presentes. Dentre elas destaca-se algumas bastantes relevantes para a sua caracterização neste trabalho (ALBUQUERQUE *et al.*, 2013):

- ✓ **Temperatura:** Geralmente, com o aumento da temperatura se dá também o aumento da velocidade de reacção. Se, no entanto, os processos biológicos apresentam pontos óptimos de temperatura, uma vez que estruturas orgânicas (p. ex. proteínas) se tornam instáveis em ambientes de temperatura elevada e deixam de funcionar. A aplicação técnica de processos anaeróbios diferencia principalmente duas faixas de temperatura: faixa mesofílica de aprox. 37 a 43 °C e faixa termofílica de aprox. 50 a 60 °C.
- ✓ **Potencial Hidrogeniónico (pH):** Os processos biológicos são em grande parte governados pelo valor do pH. A faixa de pH óptima para a formação de metano é

estreita e se situa entre 6,5 a 7,5, embora a formação de gás também seja possível acima e abaixo dessa faixa. O valor do pH controla o equilíbrio de dissociação de importantes produtos metabólicos como a amónia, ácidos orgânicos e sulfeto de hidrogénio. Se, no entanto, o pH sofrer variações drásticas e se deslocar da faixa ideal, isso é geralmente um indicativo de distúrbios graves, que exigem medidas de correcção urgentes (tamponamento).

- ✓ **Humidade:** O teor de água presente na biomassa é um factor importante, pois este ajuda a estimar a sua eficiência (em termos de poder calorífico) na queima de um combustível. O teor de humidade pode ser determinado pelo método de laboratório através da secagem em estufa;
- ✓ **Lípidios:** Os lípidios têm maior influência na produção de metano, pois quando digeridos individualmente produzem maior quantidade de metano na composição do biogás.
- ✓ **Condutividade:** Fornece a concentração aproximada de electrólitos dissolvidos na água, sendo parâmetro de monitoramento de qualidade.
- ✓ **DBO:** Como torna-se difícil quantificar a matéria orgânica biodegradável e não degradável, foram inventados métodos indirectos para se fazer a menção dos mesmos. Este método consiste na determinação da quantidade de oxigénio consumida por microorganismos durante a decomposição.
- ✓ **Série de sólidos:** os totais referem-se aos elementos inorgânicos (como cálcio, potássio, ferro, entre outros minerais) que participam da composição da biomassa, mas não sofrem combustão, sendo responsáveis pela formação das cinzas residuais; os voláteis estão relacionado à reactividade da biomassa à queima, ou seja, a facilidade de ignição da biomassa devido à volatilização de substâncias do material durante o aquecimento; os fixos representam a massa restante após a libertação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de humidade.
- ✓ **Proteínas:** O nitrogénio contido na matéria orgânica é convertido em amónia (NH₃) durante a decomposição. A amónia, por sua vez, dissocia-se na água formando o amónio. Por ser necessário no crescimento celular, o nitrogénio é um nutriente indispensável para a vida dos microorganismos. O nitrogénio amoniacal somado ao nitrogénio orgânico é igual ao nitrogénio total Kjeldahl e o nitrogénio amoniacal pode

se apresentar no dejecto na forma iónica ($\text{NH}_4 + \text{-N}$) ou na forma de amónia ($\text{NH}_3\text{-N}$), onde a transformação do nitrogénio orgânico em íon amónio é chamada de amonificação. Segundo Oliveira (1993), concentrações de nitrogénio amoniacal na forma $\text{NH}_3\text{-N}$, superiores a 1.500 mg/L, combinadas ao pH 9,5 são tóxicos à digestão anaeróbia. Para nitrogénio total o método empregado é o Kjeldahl.

A fermentação anaeróbica oferece as seguintes vantagens:

- ✓ produz um gás combustível que pode ser utilizado para fins domésticos, rurais ou industriais;
- ✓ dispensa o uso de equipamentos sofisticados, uma vez que o processo se realiza à pressão atmosférica e temperatura ambiente nos climas tropicais;
- ✓ reduz a carga poluidora da matéria orgânica através da diminuição da demanda bioquímica de oxigénio;
- ✓ dispensa insumos energéticos.

Além destas, outras vantagens podem ser citadas como: contribui para a mitigação das emissões de gases estufa como o CH_4 e o CO_2 ; promove a conservação de áreas destinadas a aterro de resíduos; disponibiliza força de trabalho pela melhoria das condições de higiene e saúde; altera as relações familiares e sociais nas camadas de baixa renda em função do fornecimento de energia de baixo custo e todas as benéficas consequências; minimiza o tempo despendido no meio rural com actividades relativas ao gerenciamento de resíduos animais e agrícolas; afecta a balança comercial do país pela substituição de combustíveis fósseis e redução dos consequentes impostos; minora distorções de mercado referentes a práticas monopolistas do sector energético em função da auto-suficiência que propicia; actua como um mecanismo de segurança para o sistema regional ou local de geração e distribuição de energia e gera empregos. (FORTES *et al.*, 2019)

Por outro lado, deve-se salientar as seguintes desvantagens:

- ✓ o biogás contém cerca de 40% de dióxido de carbono, que não é combustível, além de traços de sulfeto de hidrogénio, o qual é corrosivo;

✓ o biogás necessita de sistemas de armazenamento com maiores volumes devido a sua baixa densidade comparada com a dos líquidos, e a redução desses volumes requer o uso adicional de compressores.

Os biodigestores classificam-se em 3 escalas: escala familiar (3-14m³), escala agrícola (15-199m³) e escala industrial (200-500m³). Para estabelecer-se relações entre os principais tipos de biodigestores e suas características microbiológicas, se torna fundamental o conhecimento de três parâmetros básicos que influem no modo de operação destes e em suas eficiências na produção de biogás. (ALBUQUERQUE, LIMA, LIMA, STEFANUTTI, & OLIVEIRA, 2013)

Estes parâmetros são: Tempo de Retenção de Microorganismos (TRM), Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e Tempo de Retenção de Sólidos (TRS). O TRH é entendido como o intervalo de tempo necessário para que ocorra o processo de biodigestão de maneira completa. Os TRM e TRS são os tempos de permanência dos microorganismos e dos sólidos no interior dos biodigestores, esses tempos são expressos em dias. De forma resumida pode-se dizer que altas produções de metano são conseguidas, satisfatoriamente, com longos TRM e TRS. (LESTINSKY, VECER, NAVRATIL, & STEHLIK, 2015)

Sendo a cama de frango um resíduo produzido em intervalos de tempo, ou seja, a disponibilidade não é contínua devido ao modo de produção e considerando suas características físicas e químicas como alto teor de sólidos, baixa humidade e tamanho das partículas, o tipo de biodigestor ideal, pelas suas características de desenho e performance, para uma perfeita digestão anaeróbica da biomassa é o biodigestor batelada, podendo este ser manejado em forma de bateria ou sequencialmente.

Observando-se o teor de humidade da cama se faz necessário a adição de água nesta para uma diminuição do teor de sólidos e diluição do conteúdo. Sendo estes muito altos, demandará um longo TRH dificultando uma perfeita consorciação produção de biogás/avicultura.

Para reduzir o TRH, que pode ser de semanas ou meses, pode-se utilizar sistemas de agitação, aquecimento e, principalmente, adição de inóculo. (SANTOS, 1997).

Quanto ao inóculo, este tem a função de acelerar o processo principalmente em decorrência dos altos teores de celulose e lignina que são materiais difíceis de serem digeridos e estão presentes na cama. Este inóculo poderá ser um esterco já biofertilizado de bovinos, suínos, etc. que contém uma grande flora microbiana de bactérias acidogênicas e metanogênicas fundamentais na digestão.

A localização dos biodigestores deve ser feita de maneira a facilitar a distribuição do biogás pelos galpões, diminuindo os custos com transporte e armazenamento do gás. Um modo de disposição consiste em instalá-los atrás de cada galpão, desta forma o gás pode ser conduzido directamente dos gasómetros dos biodigestores até as campânulas de aquecimento e o manejo para o transporte da cama será reduzido. (SANTOS, 1997).

A distribuição, para que não eleve o custo do gás, poderá ser feita utilizando-se tubos de PVC ou metal ligados directamente aos gasómetros dos biodigestores, estes conduzem o gás até um determinado galpão, neste ponto se faz uma rede de distribuição com mangueiras plásticas, iguais as de uso doméstico, que levarão o biogás a cada campânula da instalação, fornecendo calor. O gás também pode ser armazenado em botijas de 11kg ou mais, só que isto demandará equipamentos aumentando o custo, este tipo de acondicionamento é recomendado quando o biogás não for somente utilizado para geração de calor nas campânulas, para usos domésticos e outros. É necessário a manutenção da rede de distribuição periodicamente evitando-se vazamentos, entupimentos e outros problemas que possam causar a paralisação do fornecimento.

A conversão biológica da cama de frango em biogás vai depender de vários factores, tais como: tipo de ração, estação do ano, densidade de alojamento das aves, tipo de substrato de cama, nível de reutilização da cama e características dos excretas das aves.

A composição do biogás irá depender do resíduo que alimenta o biodigestor e também das condições que o mesmo é operado, factores como a temperatura, pH e pressão, no interior do biodigestor, podem alterar a composição do gás levemente.

2.3.4. Tipos de biodigestores

Biodigestores anaeróbicos são sistemas que utilizam microrganismos para transformar resíduos orgânicos em biogás e fertilizante orgânico. Esses sistemas funcionam em ambientes sem oxigênio, ou seja, anaeróbicos. O biodigestor é um tanque hermético onde os resíduos orgânicos são depositados juntamente com água e microrganismos anaeróbicos, que podem ser adicionados na forma de inoculante ou obtidos naturalmente a partir do próprio material orgânico.

O princípio de funcionamento de um biodigestor é baseado na decomposição anaeróbica da matéria orgânica por microrganismos, que resulta na produção de biogás e de um biofertilizante.

Existem diferentes tipos de biodigestores que variam em função do formato, tamanho, material de construção, modo de alimentação, processo de agitação e tempo de retenção, entre outros aspectos.

Em qualquer projecto de reactor anaeróbico o ponto fundamental está relacionado directamente a velocidade das reações (cinética das reações bioquímica do processo), ou seja, a eficiência da remoção da carga orgânica do efluente e sua conversão em metano.

Todo o planeamento e dimensionamento do biodigestor está directamente relacionado com as características do substrato, o qual irá operar. Assim como, com o custo do projecto, com a disponibilidade dos materiais empregados na construção, entre outros factores.

Nesse sentido, podemos destacar alguns modelos de biodigestores com diferentes configurações:

- ✓ Modelo compacto - uso urbano ou rural (exemplo, biodigestor pré-fabricado);
- ✓ Modelos rurais em pequena e média escala: biodigestores modelo batelada, modelo Indiano, modelo Chinês;
- ✓ Modelos rurais em média e grande escala: biodigestor modelo fluxo tubular – fluxo pistão (plug flow);
- ✓ Modelos aplicados ao Saneamento, como reatores UASB;

- ✓ Modelos Industriais em grande escala e alto desempenho, desenvolvidos especificamente para operar com determinados substratos, seja eles isolados ou associados (co-digestão).

Os biodigestores podem ser classificados de acordo com sua periodicidade de carga e forma estrutural.

Os tipos podem ser:

- Descontínuo: consistem em um equipamento que está totalmente carregado e não é recarregado até que pare de produzir biogás. O gás resultante do processo se acumula em um colector flutuante acoplado ao topo do tanque (gasômetro). Esse tipo de biodigestor é usado quando a disponibilidade de resíduos orgânicos é sazonal.
- ✓ Semi-contínuo: neste tipo de equipamento as cargas e descargas são feitas em certos períodos durante o processo de produção de biogás.
- ✓ Contínuo: neste biodigestor a carga e descarga é um processo contínuo, por isso requer disponibilidade permanente de resíduos orgânicos.

Este trabalho estuda o funcionamento de um biodigestor de tipo contínuo.

2.3.5. Purificação e refino do biogás

O biogás produzido no biodigestor junta-se numa única corrente e entra num condensador, que tem a função de reduzir o teor de água presente no biogás. Após isto é encaminhado a um filtro que será responsável por retirar os odores causados pelas bactérias. O biogás já sem o mau cheiro é encaminhado para o gasómetro onde este é armazenado.

Os sistemas de purificação e refino de biogás tem como principais finalidades:

- ✓ Preservar a vida útil de equipamentos;
- ✓ Melhorar a capacidade energética do biogás, transformando-o em biometano;
- ✓ Valorizar economicamente o biogás.

Tabela 1: Características dos tipos de processo.

| PURIFICAÇÃO | REFINO |
|--------------------------|----------------------------|
| ~60% de CH ₄ | >96% de CH ₄ |
| 40% de CO ₂ | 0% a 1% de CO ₂ |
| 0-1% de H ₂ S | 0-1% de H ₂ S |
| 0-1% de Vapor de Água | 0-1% de Vapor de Água |

(BERNY, M.D.; BAJAY, S.V, 2000)

Após este processo nota-se mudanças na constituição do gás, tendo uma eficiência de 87% na remoção de CO₂. Quanto mais purificamos mais produzimos poder calorífico.

Apesar da baixa concentração de ácido sulfídrico (H₂S), a presença deste composto para o ser humano tem grande potencial irritante, agindo primeiramente nos olhos e nariz. A exposição severa a esse gás pode causar coma imediato e até a morte. Na construção do biodigestor, o processo de remoção deste componente indesejado se dá na sua dissociação em meio aquoso.

O H₂S é solúvel em água e se caracteriza como um ácido fraco. A dissociação se dá em duas etapas, inicialmente produzindo o anião hidrossulfeto (HS⁻) e o catião hidrônio (H₃O⁺) pela seguinte equação:



Então a segunda etapa forma o anião sulfeto, pela equação a seguir:



Há outro factor que prejudica a queima do biogás, a humidade, no qual deve ser reduzida ao longo do processo de produção pois afecta a temperatura de chama, limites de inflamabilidade, redução do poder calorífico e taxa ar-combustível do biogás (PECORA, 2006).

2.3.6. Poder calorífico

É uma propriedade importante na avaliação de um combustível e consiste na quantidade de calor libertadas na combustão completa de uma unidade de massa ou volume do material combustível devido a uma reacção química de oxidação, expressa em cal/g, kCal/kg ou kCal/m³. Existem dois tipos de Poder Calorífico: Superior e Inferior.

O Poder Calorífico Superior (PCS), pode ser definido como sendo a quantidade de calor produzida 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. O Poder Calorífico Inferior (PCI), 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, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada. O biogás produzido nos biodigestores pode ser classificado quanto à sua inflamabilidade do metano na sua constituição em três partes, que são: pobre, explosivo e rico. O biogás pobre a sua composição de metano estará no intervalo de 0% - 5%, o biogás explosivo a sua composição de metano estará no intervalo de 5% - 15% e o biogás rico a sua composição de metano será de 15% - 100%. (LEVENSPIEL, 1999)

Para a determinação do Poder Calorífico do Biogás utilizou-se a equação 2.3.5.1 (HONORIO, 2009).

$$P C_B = \% C H_4 \cdot \rho_{CH_4} \cdot P C_{CH_4} \quad (2.3.5.1)$$

Onde:

PC_B : Poder Calorífico do Biogás (kJ/m³);

PC_{CH_4} : Poder calorífico do metano (kJ/Kg);

ρ_{CH_4} : Densidade do metano (Kg/m³);

$\% C H_4$: Percentagem do metano contido no biogás.

Por sua vez a densidade relativa ao ar do biogás é útil no projecto de equipamento, armazenamento e compressão do biogás podendo ser calculado pela equação 2.3.5.2. (Honório, 2009):

$$\rho_{relativa} = \frac{\%CH_4 \cdot 0,55 + \%CO_2 \cdot 1,52}{100} \quad (2.3.5.2)$$

A presença de vapor de água, NH₃, CO₂ e H₂S no biogás o torna menos eficiente porque prejudica o processo de combustão, pois estes gases absorvem parte da energia gerada. Na tabela 2.3, apresentam-se as relações entre a composição do biogás com o poder calorífico e o peso específico, nota-se que a eficiência do biogás está diretamente ligada à quantidade de metano existente na mistura gasosa.

Tabela 2: Peso Específico e Poder Calorífico Inferior em relação a quantidade de metano presente.

| Composição química | Peso específico (kg/m³) | Poder calorífico inferior (kCal/kg) |
|---|---|--|
| 10 % CH ₄ e 90 % CO ₂ | 1,8393 | 465,43 |
| 40 % CH ₄ e 60 % CO ₂ | 1,4600 | 2333,85 |
| 60 % CH ₄ e 40 % CO ₂ | 1,2143 | 4229,98 |
| 65 % CH ₄ e 35 % CO ₂ | 1,1518 | 4831,14 |
| 75 % CH ₄ e 25 % CO ₂ | 1,0268 | 6253,01 |
| 95 % CH ₄ e 5 % CO ₂ | 0,7768 | 10469,60 |
| 99 % CH ₄ e 1 % CO ₂ | 0,7268 | 11661,02 |

(UTECH, 2013)

A relação existente entre 1 m³ de biogás em relação aos outros combustíveis mais usados no nosso dia-a-dia equivale a ter 0,61 litros de gasolina; 0,70 litros de gasóleo e 0,55 litros de biodiesel, pode gerar 6,90 KWh de energia eléctrica. A quantidade de calor que se pode gerar com 1 m³ de biogás equivale a 1,54 Kg de lenha, reduzindo assim o abate prematuro e descontrolado de árvores. (PASSAMANI & LIMA, 2012)

3. MONTAGEM E INSTALAÇÃO DO BIODIGESTOR

A UNIDO em colaboração com o Governo de Moçambique e parceiros do sector privado, implementou um projecto financiado pelo GEF intitulado *Towards Sustainable Energy for All in Mozambique* com objectivo de promover no mercado, sistemas integrados de energias renováveis para actividades produtivas nas zonas rurais de Moçambique.

Tendo em conta isso, levou-se em consideração os dados obtidos através dos ensaios laboratoriais da amostra de esterco de galinha para alimentar e monitorar um biodigestor pré-fabricado (Marca: PUXIN), uma vez que esse é um biodigestor contínuo e com elevada capacidade de armazenamento de dejectos.

Foi necessário montar-se o biodigestor que veio em peças da China, e dimensionar estruturas que pudessem ser acopladas ao mesmo para garantir o bom funcionamento do processo anaeróbico.



Figura 5: Esquema tridimensional do biodigestor.

O sistema contará também com os seguintes elementos: canalização de recirculação das lamas e circulação do gás, condensador de humidade e de remoção de sulfureto de hidrogénio, gasómetro para o armazenamento temporário do biogás e depósito para recepção das lamas digeridas.

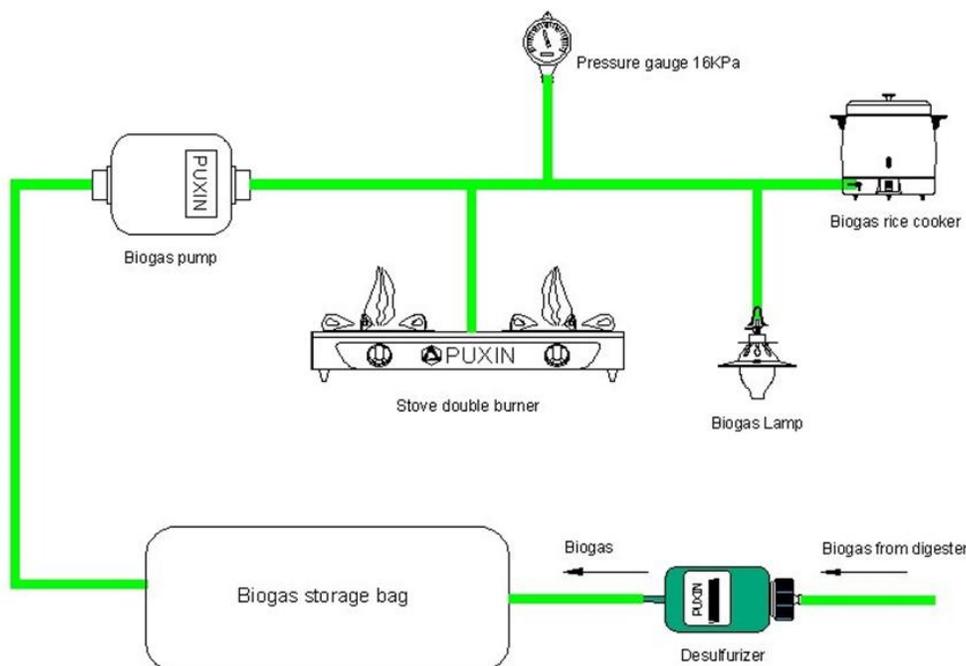


Figura 6: Diagrama simplificado da unidade de produção de biogás. (PUXIN Manual)

O gasómetro servirá para reservar o biogás até dois dias (tempo de retenção considerado adequado). Aceitando que o biogás se comporta de forma ideal, e que se sobre dimensiona o gasómetro por questões de segurança, pode-se considerar o volume dado pelo fabricante.

A caixa de entrada, onde a matéria orgânica é armazenada antes de entrar na caixa de biodigestão, terá que armazenar a quantidade diária de dejectos acrescido de 20% (ALVES, 2017).

A caixa de saída, onde é retirado o biofertilizante, teve um volume 3 vezes maior que a caixa de entrada e ambas são comumente construídas na forma de paralelepípedo com profundidade de 1m.

As lamas que chegam à unidade ficam armazenadas num tanque. Considerou-se um tempo de retenção de 2 dias, para efeitos de reserva para prever eventuais falhas de transporte ou disponibilidade das lamas. (ANGELIDAKI, ELLEGAARD, & AHRING, 2003)

Acoplou-se também um sistema de limpeza para evitar entupimento dos canais. Imagens em anexo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho elegeu-se o estudo do processo de biodigestão anaeróbica em sistema contínuo, ou seja, aquele no qual são realizados abastecimentos periódicos do biodigestor, neste caso diários, com retirada do material já estabilizado, ou seja, do biofertilizante, na mesma frequência do abastecimento.

O biodigestor foi abastecido com água e dejectos de galinhas poedeiras em fase de produção, de mesma idade, recebendo mesmo manejo e criadas em dois sistemas de produção distintos; o sistema de produção automatizado em baterias de gaiolas verticais, ou sistema automatizado, e o sistema de produção convencional em gaiolas, ou sistema convencional.

A escolha do estudo do método contínuo de biodigestão anaeróbia se deu pelo facto de que em sistemas automatizados o manejo dos dejectos é realizado diariamente, necessitando destino e tratamento constantes.

No âmbito da realização do trabalho laboratorial, apresenta-se a seguir os equipamentos, materiais e os reagentes necessários para execução das análises da biomassa e do efluente do biodigestor.

Tabela 3: Equipamentos, materiais e reagentes do trabalho.

| Equipamentos | Materiais | Reagentes |
|----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Mufla | Copos de Becker | Água destilada |
| Incubadora | Placas de Petri | Solução tampão de fosfato |
| Oxímetro | Luvax | Solução de sulfato de magnésio |
| Aparelho de Soxhlet | Erlenmeyer | Solução de cloreto de cálcio |
| Balança Analítica | Proveta graduada | Solução de cloreto de ferro |
| pHmetro | Cartuchos | Soluções ácidas e alcalinas |
| Exsicador | Cadinhos de porcelana | Solução de Sulfeto de Sódio |
| Aparelho de digestão | Papel de filtro | Inibidor de nitrificação |

| | | |
|----------------------|-----------|-------------------------------|
| Banho-maria | Plásticos | Solução de glicose |
| Placa de aquecimento | Pá | Solução de hidróxido de sódio |

4.1. Local do estudo

O biodigestor para produção de biogás a partir do esterco de galinha, foi instalado na Vila de Moamba, nomeadamente na Quinta Mothassy Investimentos. O biodigestor concebido tem como objectivo principal a geração de biogás através da fermentação anaeróbica.

As análises laboratoriais foram feitas no laboratório de operações unitárias e de metalurgia, localizados no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

4.2. Colecta da matéria-prima

Nesta etapa, a colecta seguiu a regra da amostragem representativa usando o equipamento específico. Usou-se um colman em que se manteve a temperatura usando gelo, transportando-se até ao laboratório para garantir a integridade da amostra.



a)



b)



c)

Figura 7: a) galinhas de postura em andares no aviário; b) cama de frango; c) colecta da amostra.

4.3. Análise físico-química da matéria-prima

Tanto as características físicas quanto as químicas, influenciam o crescimento microbiano durante a digestão anaeróbica. Sendo assim, foram analisados os seguintes parâmetros:

4.3.1. Temperatura, pH e condutividade

Ambos parâmetros foram medidos no local durante o processo de colheita das amostras, usando um aparelho próprio designado phmetro da marca Hanna Instruments (modelo HI98130).

4.3.2. Demanda Bioquímica de Oxigénio

Usando o Método B, que consiste em: da incubação com diluição aplica-se a efluentes que contenham microorganismos próprios, porém não tem oxigénio suficiente para que, após 5 dias de incubação, ainda haja oxigénio dissolvido na amostra.

Preparo da água de diluição: Colocou-se sobre o balão água destilada suficiente para amostra. De seguida ajustou-se a temperatura desta para 20° C mais ou menos 1° C. Adicionou-se 1 ml de cada uma das quatro soluções nutrientes por litro de água destilada. Por fim homogeneizou-se a solução final e deixou-se descansar por mais 30 minutos.



Figura 8: a) reagentes para mistura de diluição; b) adição dos reagentes no balão de diluição.

Ensaio de DBO: Colocou-se no balão 1% ou 5% da amostra, encheu-se o volume restante pela água de diluição e agitou-se a amostra, deixou-se repousar por 5 min e fez-se a leitura do oxigénio dissolvido inicial. Por fim, incubou-se a amostra à 20°C e procedeu-se com a leitura do Oxigénio dissolvido após 5 dias.



Figura 9: a) balões com a amostra e água de diluição; b) análise de DBO; c) oxímetro

4.3.3. Série de sólidos

Teor de sólidos totais: Pesou-se o cadinho e registou-se o peso em g. De seguida pesou-se no cadinho 5 gramas da amostra. A seguir colocou-se o cadinho contendo a amostra na estufa à 105°C por 24 h. Retirou-se o cadinho e com dessecador esfriou-se por 30-45 min. Por último, pesou-se o cadinho e registou-se o valor em g.



Figura 10: a) Mufla; b) Cadinhos dentro da mufla.

Teor de sólidos fixos: Pesou-se o Cadinho e registou-se o peso em g. A posterior pesou-se sobre o cadinho 5 gramas da amostra seca e colocou-se o cadinho contendo a amostra na Mufla à 550°C por 24 horas. Retirou-se o cadinho e com dessecador esfriou-se por 30-45 min. Pesou-se o cadinho e registou-se o valor em g.

Teor de sólidos voláteis: A sua determinação é feita por meio de cálculos, e os dados necessários para o efeito são o teor de sólidos fixos e o totais, não havendo assim, necessidade de se usar algum equipamento laboratorial.

4.3.4. Proteínas

Para a digestão colocou-se a amostra (depois de passar pelo processo de retirada de gordura) na estufa de ventilação a 70-80°C durante a noite. De seguida, retirou-se a amostra da estufa e colocou-se no dissecador para arrefecer. Identificou-se o tubo de digestão no suporte com o número da amostra, pesou-se 1 grama da amostra, colocou-se dentro do tubo e adicionou-se 15ml de ácido sulfúrico concentrado. Abriu-se a torneira de água corrente que estava ligada ao sistema do digestor, colocou-se o suporte com tubos no bloco de digestão logo que atingiu os 420°C. Continuou-se a digestão por 45 minutos, desligou-se o aparelho, fechou-se a torneira, tirou-se a tampa da válvula, colocou-se os tubos com suporte fora do bloco e deixou-se arrefecer as amostras. Como no processo de diluição da amostra utilizou-se o vortex então completou-se o volume até 100 ml de água destilada lavando as paredes do tubo.

Seguindo o processo de destilação, verificou-se o aparelho de destilação, o sistema de água corrente, e se os tanques de água e hidróxido de sódio estavam carregados. Colocou-se 20ml da solução colectada (ácido bórico com indicador) num Erlenmeyer de 250 ml e identificou-se com o número da amostra. Colocou-se 20 ml da solução digerida no tubo para destilar, identificou-se e colocou-se no destilador. Adicionou-se 10 ml de solução de NaOH ao digestor e ligou-se imediatamente o destilador. Logo depois de destilar todas as amostras, desligou-se o destilador e fechou-se a água.

Por fim deu-se seguimento a titulação, utilizou-se o ácido clorídrico 0,1N, colocou-se o Erlenmeyer com o destilado e introduziu-se o bico do titulador dentro do Erlenmeyer. Agitou-se dosificando lentamente o ácido para que caísse gota a gota dentro do Erlenmeyer até que a solução ficasse novamente clara meio amarela e essa cor permanecesse constante. Leu-se o valor indicado no aparelho titulador e anotou-se.



a)



b)



c)

Figura 11: a) Digestor b) Destilador c) Método titulométrico

4.3.5. Lípidios:

Pesou-se 3 gramas da amostra em papel de filtro e a massa do balão de fundo chato (PB₁). Embrulhou-se o papel, colocou-se dentro do cartucho e transferiu-se para o aparelho extractor do tipo Soxhlet. Adicionou-se éter em quantidade superior à metade do volume do balão. Depois, acoplou-se o extractor ao balão de fundo chato e um refrigerador de bolas ao Soxhlet. Manteve-se o sistema sob aquecimento em chapa

eléctrica, à extracção contínua durante 6 horas. Retirou-se o cartucho com o papel de filtro e destilou-se o éter. Transferiu-se o balão com resíduo extraído para uma estufa a 105°C, por cerca de 1 hora e resfriou-se o balão em exsicador até temperatura ambiente. Por último, pesou-se o balão (P_{B2}).

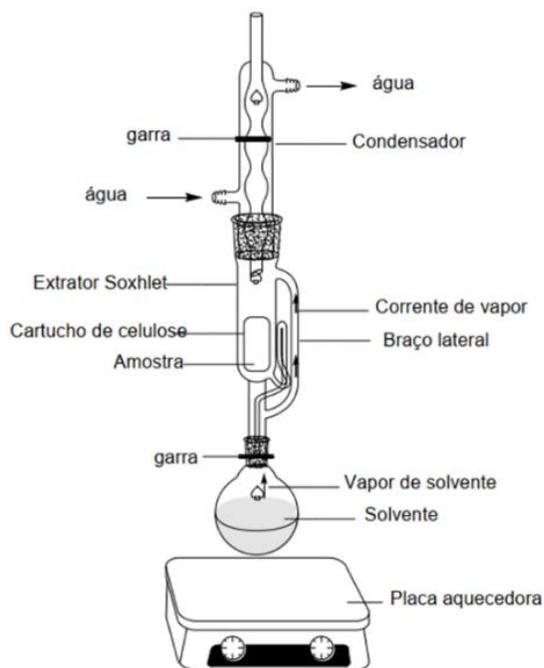


Figura 12: Equipamento em tamanho real e em fluxograma de determinação de gordura.

4.3.6. Densidade:

Mediu-se a massa da amostra e encheu-se o picnómetro com a água destilada. De seguida, mediu-se a temperatura da água destilada e removeu-se totalmente a água da superfície externa do picnómetro. Pesou-se o picnómetro com água destilada e colocou-se a amostra dentro do picnómetro, deixando transbordar. Por fim, secou-se no exsicador e pesou-se o picnómetro com o conteúdo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Temperatura, pH e condutividade

Foram retiradas três amostras da capoeira, pesadas e dando resultados que estão indicados na tabela 4.

Tabela 4: Peso das amostras em estudo.

| Designação da amostra | Peso (kg) |
|-----------------------|-----------|
| FG1 | 1000.55 |
| FG2 | 1001.09 |
| FG3 | 1000.72 |

Tabela 5: Parâmetros físicos da amostra.

| Designação da amostra | Temperatura (°C) | pH | Condutividade (µS/cm) |
|-----------------------|------------------|------|-----------------------|
| FG1 | 26.2 | 6.89 | 13.2 |
| FG2 | 26.6 | 6.78 | 12.9 |
| FG3 | 26.2 | 6.83 | 13 |

Conforme pode se ver na tabela 5, as amostras apresentam pontos ótimos de temperatura, pH e condutividade. As temperaturas encontradas favorecem as reacções de biodigestão, uma vez que estruturas orgânicas se tornam instáveis em ambientes de temperatura elevada (45°C) e deixam de realizar a atividade enzimática. Os resultados da faixa de pH encontram-se no intervalo aceitável para a formação de metano com uma média de 6.8, sendo que este nível favorece a actividade dos microorganismos metanogênicos e acetogênicos, essenciais para a produção de biogás.

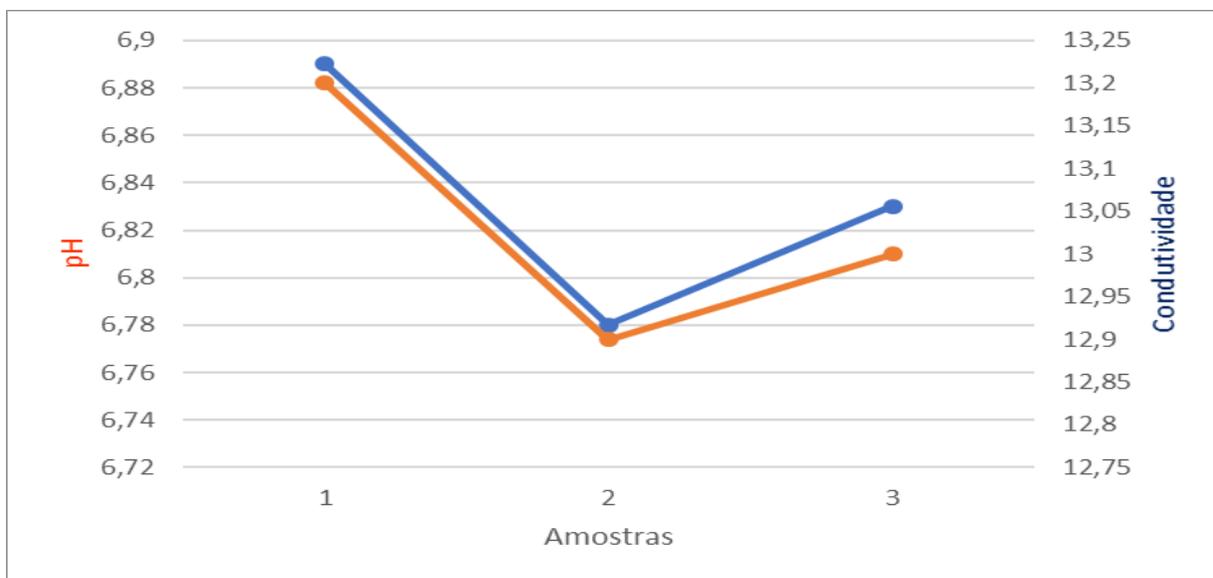


Figura 13: Gráfico da influência do pH na condutividade.

A partir da figura 14 nota-se que existe uma correlação positiva entre pH e condutividade, pois iões presentes na biomassa afectam ambas as propriedades. Manter um pH adequado será crucial para o funcionamento do biodigestor e a monitorização da condutividade eléctrica poderá fornecer informações valiosas sobre a composição química do meio, ajudando a ajustar as condições para otimizar o processo de digestão anaeróbica.

5.2. Humidade e Série de Sólidos

Tabela 6: Determinação da série de sólidos.

| Designação da amostra | Peso do cadinho | Peso da amostra | Peso a saída da estufa | Peso a saída da mufla | Teor de sólidos totais | Teor de voláteis | Teor de sólidos fixos | Teor de humidade |
|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| FG1 | 23.7496 | 5.0005 | 24.9170 | 24.9387 | 23.2900 | 62.9899 | 37.0098 | 76.3670 |
| FG2 | 21.1142 | 5.0004 | 22.3105 | 22.2695 | 23.9100 | 62.9843 | 37.0089 | 76.0759 |
| FG3 | 38.1379 | 5.0006 | 39.2988 | 39.1952 | 23.3200 | 62.9929 | 37.1199 | 76.6763 |

O teor de humidade apresentado na tabela 6, auxilia no cálculo da quantidade de água necessária para adicionar no biodigestor. O teor de série de sólidos fixos encontrado indica que após o processo de digestão anaeróbica, teremos uma quantidade de resíduos (substâncias não biodegradáveis) aceitável em termos de benefício (biogás). O teor de sólidos voláteis na casa dos 60% indica que não haverá acidez excessiva no reactor, sem riscos de inibição do crescimento bacteriano.

5.3. Demanda Bioquímica de Oxigénio (DBO)

Tabela 7: Medição da demanda bioquímica de oxigénio.

| Designação da amostra | Quantidade da amostra (mg) | DBO no dia 1 | DBO no dia 5 | DBO _f (mg/L) |
|-----------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| FG1 | 2.87 | 5.16 | 0.53 | 1.54 |
| FG2 | 2.92 | 8.48 | 0.51 | 2.65 |
| FG3 | 2.82 | 8.41 | 0.76 | 2.54 |
| H2O | 0 | 8.96 | 8.65 | 0.11 |
| Confirmação | 0 | 8.65 | 8.18 | 0.15 |

O DBO ajudou a medir indirectamente a quantidade de oxigénio e estes resultados encontrados nos mostram que as necessidades microbianas são satisfatórias, o que significa que se em 5 dias estes degradaram bruscamente boa parte do substrato então num tempo de retenção hidráulica imposto que neste caso é de 30 dias poderemos ter a produção de gás ideal. Este resultado fez com que reduzíssemos a quantidade de água para que houvesse menos consumo de oxigénio no tempo de retenção hidráulica pressuposto (30 dias).

5.4. Densidade

A quantidade da amostra foi calculada com base na densidade obtida no laboratório. O princípio usado foi de volume deslocado. O volume deslocado é o tanto que um corpo

desloca do líquido ao ser inserido nele. Esse volume deslocado é o mesmo volume submerso do corpo.

Apesar de existirem pequenos desvios de casas decimais, encontrou-se valores de densidades (Apêndice 2, tabela 3) para os ensaios e calculou-se a densidade final (956.1kg/m³) com base na média entre elas. A densidade da biomassa encontrada aproxima-se ao da literatura (850 kg/m³), e foi um resultado útil para avaliar a concentração de sólidos totais e o conteúdo de matéria orgânica. Neste caso a análise da densidade foi realizada para: avaliar a concentração de sólidos no material alimentado ao biodigestor. A densidade da biomassa foi considerada no dimensionamento do biodigestor para garantir que ele seja adequado para lidar com a carga orgânica específica.

5.5. Lipídios

Para determinar os lipídios usou-se a equação abaixo:

$$\text{Gordura (\%)} = \frac{P_{B2} - P_{B1}}{m} \times 100$$

Onde:

P_{B2}- Peso do balão com gordura

P_{B1}- Peso do balão;

m- Massa da amostra

Tabela 8: Análise de gordura de esterco de galinha.

| Designação da amostra | m (g) | P _{B1} (g) | P _{B2} (g) | %Gordura |
|-----------------------|--------|---------------------|---------------------|----------|
| FG1 | 3.0132 | 115.7150 | 115.7711 | 1.8618 |
| FG2 | 3.0044 | 115.7103 | 115.7667 | 1.8525 |
| FG3 | 3.0128 | 115.7110 | 115.7700 | 1.8609 |

A tabela 8 resulta de ensaios de gordura, foi essencial seguir os métodos padronizados de colecta e teste, garantindo resultados precisos contribuindo para uma operação

eficiente e sustentável do biodigestor. Isto porque esta é uma análise muito longa (5 horas) e durante as primeiras 4 tentativas houve muitos erros de leitura e calibração do material que levaram a repetição das análises laboratoriais muitas vezes.

A ração consumida pelas galinhas apresenta 3% de gordura, e pelas análises laboratoriais tem-se cerca de 2% (1.86%) o que indica que boa parte das gorduras foi consumida pelas galinhas para gerar energia, servindo de fonte valiosa no processo anaeróbico. O valor de lipídios encontrado garante que o biodigestor seja capaz de lidar com a carga específica de gordura nos resíduos. Se o valor percentual de gordura tivesse sido elevado iria resultar em flutuação do pH formando ácidos graxos voláteis, tendo mais dificuldade de se biodegradar.

5.6. Proteínas

Para calcular-se a proteína no balão de 100ml:

$$\%N = \frac{(V - B) * N}{W} * 0,14 * 100$$

$$PB = \%N * 6,25$$

Onde:

V – volume total HCl em ml gastos na titulação

B – volume de HCl em ml gastos na titulação (0.45ml)

W – peso da amostra em gramas

N – normalidade do HCl

Tabela 9: Ensaio de proteínas.

| Designação da amostra | W | V | N | %N | PB |
|-----------------------|--------|------|-----|------|-------|
| FG1 | 1.0046 | 1.76 | 0.1 | 1.83 | 11.44 |
| FG2 | 1.0048 | 1.78 | | 1.87 | 11.48 |

| | | | | | |
|------------|--------|------|--|------|-------|
| FG3 | 1.0045 | 1.76 | | 1.88 | 11.45 |
|------------|--------|------|--|------|-------|

O índice da proteína encontrada aproxima-se ao da consumida através da ração que é de 15%, sendo uma grande fonte de nitrogénio para os microorganismos metanogênicos. Se o valor fosse elevado iria levar a formação de amónia e sulfeto de hidrogénio, afectando a produção de biogás e dificuldade de biodegradabilidade. Este valor também foi útil para o dimensionamento do biodigestor, pois garante que ele seja capaz de lidar com a carga específica de proteínas nos resíduos.

As gorduras fornecem o maior rendimento de biogás, mas elas demandam um longo tempo de degradação devido a sua limitada biodisponibilidade. Já as proteínas possuem um menor tempo de digestão, porém um menor rendimento na produção de gás. (WEIDLAND, 2010).

5.7. Monitoria da alimentação diária e produção de biogás

Para se obter resultados satisfatórios na produção de biogás em escala real é primordial que se faça o monitoramento do biodigestor, a fim de verificar se o processo de biodigestão anaeróbica está ocorrendo de maneira eficiente ou se necessita de intervenção para adequação dos parâmetros. (SEABRA JUNIOR, 2017)

Os resultados apresentados no apêndice 4 demonstram que o biodigestor em questão teve um bom funcionamento, gerando biogás de maneira satisfatória (6.28m³/dia) e necessitou apenas de correcção para pH.

Os processos biológicos são em grande parte governados pelo valor do pH. A faixa de pH óptima para a formação de metano é estreita e se situa entre cerca de 6.5 a 7.5, embora a formação de gás também seja possível acima e abaixo dessa faixa. O valor do pH controlou o equilíbrio de dissociação de importantes produtos metabólicos como a amónia, ácidos orgânicos e sulfeto de hidrogénio. Contudo, nalguns dias (apêndice 4, tabela 6) o pH sofreu variações drásticas e se deslocou da faixa ideal, sendo um indicativo de distúrbios graves (SEIXAS, 1980), que exigiu medidas de correcção

urgentes onde recorreu-se a adição de soda cáustica. Para correcção da acidez adicionou-se 5 misturas diferentes de substrato com soda cáustica de 10 em 10 minutos, para tentar elevar o pH para o valor óptimo (7). Tendo em conta o pH constante do substrato na ordem dos 6.24, teve-se nas misturas os seguintes resultados:

- ✓ 1 kg de soda cáustica + 20 litros de substrato = pH no balde logo de seguida foi de 12.02 e quando introduziu-se toda essa mistura no biodigestor, teve-se como pH final 6.46;
- ✓ 200 g de soda cáustica + 20 litros de substrato = pH resultante foi de 9.25 e quando introduziu-se toda essa mistura no biodigestor, teve-se como Ph final 6.62;
- ✓ 100 g de soda caustica + 20 litros de substrato = pH resultante foi de 9.16;
- ✓ 10 litros da mistura (3) + 10 litros de substrato = pH resultante foi de 8.46;
- ✓ 10 litros da mistura (4) + 10 litros de substrato = pH resultante 8.03;

Destacando-se assim, a boa capacidade de tamponamento do biodigestor e a produção de quantidades ínfimas de H_2S e NH_3 (16%).

Após 30 minutos de recirculação no biodigestor o pH subiu até 6.66 mas mesmo depois de 48h o gasómetro não encheu dando uma indicação negativa para este processo de produção de biogás. Valores abaixo da faixa ideal determinam a queda da produção de biogás, podendo chegar a paralisação quando o pH atinge valores abaixo de 6.0. A alcalinidade não foi suficientemente elevada podendo ocorrer o acúmulo de ácidos gordos voláteis e de hidrogénio, levando a acidificação do reactor. Os resultados da correcção de acidez indicam que 1.54g de cal está para aproximadamente 1 litro de substrato em fermentação.

De acordo com estes resultados, constatou-se que dois factores estavam a impedir a produção do biogás, respectivamente: serradura usada nos galpões do aviário e tipo de produtos usados para limpeza do aviário. Os detergentes durante a limpeza do aviário anulavam a actividade enzimática, e a serradura estava a ser adicionada no biodigestor sem querer.

Em suma, a literatura (SILVEIRA, KRETZER, NAGAOKA, & BAUER, 2014) aponta o esterco de galinha como sendo um dos resíduos mais difíceis de trabalhar pelo facto de produzir maior quantidade de gás mas em menor proporção de metano.

O teor de humidade foi determinado pelo método de laboratório através da secagem em estufa. Com os resultados obtidos no laboratório (apêndice 4, tabela 1) , notou-se que após 30 dias de alimentação o substrato estava muito fluído com aparente maior quantidade de água enquanto que o esperado era uma mistura tipo lama. Recalculou-se as proporções de água e esterco, reduzindo-se a quantidade de água, pois devido a este excesso o pH estava desequilibrado (entre 4.8 e 6) e sem uma concentração de metano de 50-70% como é esperado na literatura (no trabalho prático obteve-se 44% de metano). (UTECH, 2013)

As descontinuidades encontradas na sequência de dados do gráfico 3 do apêndice 4, representam os dias em que não foram realizadas as medições das variáveis de controle. A análise dos resultados apresentados no gráfico 3 do apêndice 4, indica que mesmo nos dias sem alimentação do reactor existe produção de gás, mas o volume diminui gradativamente até que uma nova alimentação seja realizada.

Depois de introduzir o inóculo e iniciar a alimentação, o biodigestor levou cerca de 22 dias para mostrar os primeiros sinais de actividade metanogênica positiva. Isto foi percebido pela formação de bolhas de biogás sob a campânula instalada. (JENKINS, 1990)

Nos três dias seguintes, o biodigestor demonstrou inflar a campânula, mas não de forma permanente. Em seguida, devido à ocorrência de alguns vazamentos na parte superior do biodigestor, ele recebeu ajustes e melhorias durante uma manhã inteira de trabalho, visando evitar problemas futuros. Desta forma, após uma semana da reparação, o biodigestor demonstrou que o processo de digestão anaeróbica estava ocorrendo com eficácia em seu interior, conforme demonstram os resultados apresentados no apêndice 4.

Logo após ao primeiro dia de alimentação ao biodigestor, desenvolveu-se em laboratório o teste de demanda bioquímica de oxigénio (DBO) da mistura de esterco e água para a alimentação dentro do biodigestor, visando determinar a quantidade de oxigénio consumida por microorganismos durante a decomposição.

Após a realização do teste de DBO, obteve-se como resultado no quinto dia um valor quase nulo em torno de 0,6mg/L. Na prática, isto significou que o inóculo utilizado, para

dar partida no biodigestor, não apresentava uma biomassa com potencial adequado para conversão de substratos orgânicos em biogás. No entanto, acreditava-se que após o biodigestor receber as primeiras cargas orgânicas de dejectos, ocorreria um aumento da actividade microbiológica dentro do sistema, reactivando o inóculo utilizado e resultando na produção mensurável de biogás. (FARUK, BLEIDZKHI, FINK, & SAIN, 2012)

Diante disso, levantaram-se duas hipóteses, a primeira seria o excesso de água, por isso não estaria ocorrendo uma eficaz produção de biogás e a segunda seria a existência de vazamentos de biogás em algum ponto do biodigestor. Após um teste para descobrir, constatou-se que o efluente vazava na parte de cima do biodigestor e no gasómetro, e em virtude desses vazamentos, tudo foi totalmente remendado. Logo o gasómetro começou a encher indicando a produção de biogás e, desde então, a produção de biogás pelo biodigestor é monitorada (apêndice 4, tabela 6).

Em face aos vazamentos ocorridos no biodigestor, o monitoramento da produção de biogás foi interrompida com vista a dar espaço para reparação da ruptura no biodigestor. No entanto, durante a fase final do acompanhamento do sistema, algumas leituras puderam ser feitas no gasómetro, constatando-se uma produção média de biogás da ordem de 0,115l/h. Convertendo este valor, obteve-se uma produção de 6.28m³/dia. Logo, tendo em conta os resultados no teste de DBO no apêndice 4 e com base nesta produção diária de biogás, é possível afirmar que o inóculo utilizado fez com que a biomassa existente alcançasse um potencial mais eficiente para conversão da matéria orgânica em biogás.

A alimentação diária foi para aumentar a carga orgânica e garantir o bom nível de ST a fim de 30 dias. Consequentemente, com o aumento da temperatura (temperatura máxima chegando aos 42°C) se deu também o aumento da velocidade de reacção. A aplicação técnica de processos anaeróbicos destaca-se principalmente na faixa de temperatura mesofílica de 30 a 40°C. (SILVA, 2009)

Portanto, de acordo com as condições ambientais e de operação existentes ao longo desta pesquisa no apêndice 4 e comparando-se os resultados obtidos com os da literatura consultada (SILVA, 2009), pode-se afirmar que o biodigestor atingiu uma

produção diária satisfatória e mensurável de biogás (6.28m³), e a estabilidade de sistema.

Desta forma, mesmo a temperatura interna do biodigestor oscilando (apêndice 4, tabela 6), sofrendo influência directa da temperatura ambiente, pode-se afirmar que o biodigestor esteve operando dentro de uma faixa aceitável de temperatura. No entanto, esta temperatura pode ter sido um factor limitante para o processo de digestão anaeróbica, bem como, para uma melhor e mais rápida aclimação do efluente dentro do biodigestor após sua partida. Em virtude deste parâmetro não apresentar um comportamento uniforme dentro do biodigestor, é possível que possa ter influenciado algumas reacções químicas internas e conseqüentemente o comportamento de outros parâmetros (pH e condutividade). Alterações bruscas de temperatura prejudicam a digestão anaeróbica porque as bactérias metanogênicas são sensíveis a mudanças de temperatura (STEVENS & SCHULTE, 1979).

Apesar da temperatura interna do biodigestor não ter alcançado de forma constante 35 °C (faixa mesofílica), que é quando a taxa de digestão anaeróbica é considerada máxima, o processo anaeróbico ocorreu regularmente, pois houve produção de biogás em face da campânula do biodigestor estar diariamente inflada (variação da produção do volume no apêndice 4, tabela 6).

O pH dos dejectos brutos, armazenados na unidade de homogeneização, manteve-se sempre abaixo da neutralidade, já que o pH médio foi de 6.60 (apêndice 4, tabela 2). É possível que o pH desta unidade tenha sofrido influência da acidez total presente nos dejectos armazenados. Neste sentido, pode-se dizer que o pH foi bastante favorável aos microorganismos responsáveis pelo processo de digestão anaeróbica dentro do biodigestor. (DEMIRBAS, 2002)

Os dejectos bovinos que serviram de inóculo apresentaram característica propícia a rápida proliferação das bactérias metanogênicas, apresentando produção de biogás em menor espaço de tempo que os dejectos de outros animais.

5.8. Estimativa do biogás produzido vs. Biogás realmente produzido

Como referência inicial adoptou-se a metodologia utilizada pelo Centro Nacional de Referência da Biomassa (CENBIO, 2008) para saber a quantidade produzida temos a seguinte equação:

Tabela 10: Dados para estimativa de biogás.

| Parâmetro | Valor |
|---|-------|
| Esterco (kg/animal/dia) | 0.14 |
| Concentração de metano (%) | 60 |
| Densidade do metano (kg.CH ₄ /m ³ CH ₄) | 0.67 |
| Densida do biogás (kg biogás/m ³) | 1.20 |

Fonte: (SEABRA JUNIOR, 2017)

Substituindo temos:

$$V_{Metano} \left(\frac{m^3}{mês} \right) = \frac{30 \text{ dias} \times (628) \times 0,14 \times 0,05 \times (0,6)}{0,67}$$

$$V_{Metano} \left(\frac{m^3}{mês} \right) = 118 \left(\frac{m^3}{mês} \right)$$

A estimativa de gás produzido de acordo com a literatura é de 118m³/mês. Mas na prática tendo em conta que são 628 galinhas na quinta, e cada galinha tem potencial de 0.01m³, logo o potencial de biogás gerado diariamente é de 6.28m³, e por mês de 188.4m³. Tendo em conta a composição do biogás (medida com o BIOGAS 5000 da GeoTech) indicando 44% de metano, 40% de dióxido de carbono e o restante resíduos (vapor de água e gás sulfídrico), teremos:

1m³ de biogás – 400g de GPL

6,28m³ de biogás – x

x=2512g

2512g – y botijas

11000g – 1 botija

y= 7 botijas

Isto significa que este sistema de digestão anaeróbica, ao atingir a concentração de 50% de metano terá capacidade para produzir o equivalente a 7 botijas de 11kg de GPL (CHEN, XING, & HANA, 2009), logo o proprietário da Quinta que comprava 1 botija por mês reduz esse seu custo a zero pois poderá passar a beneficiar-se directamente do biogás como gás de cozinha. O resíduo deste processo é biofertilizante que passará a também eliminar totalmente o custo que o proprietário tinha antes de 950Mt/mês com 10kg de fertilizante agrícola, pois o resíduo fornece em torno de 30kg de biofertilizante.

5.9. Determinação do poder calorífico do biogás e teste de queima

O poder calorífico para o sistema de produção foi calculado com base na interpolação na tabela 2, tendo em conta a percentagem de metano (44%) e dióxido de carbono (40%) obtido no biogás em estudo. Obteve-se 6264 kJ/m³, e o indicado na literatura é de 9000 kJ/m³ (ALBUQUERQUE *et al.*, 2013). O baixo poder calorífico deveu-se ao facto do biogás apresentar alta concentração do gás CO₂ (40%) e outras impurezas (16%).

Realizou-se o teste de chama para confirmar o poder da inflamabilidade do CH₄ produzido, e assim verificou-se que a composição do metano para a presente pesquisa é satisfatória. Tendo sido testados duas amostras do biogás, submetendo a queima e usando como fonte de ignição a chama do fósforo. De biogás produzido sem inóculo verificou-se pequenas chamas porém fracas devido a baixa concentração do gás CH₄ chegando a atingir a composição máxima de 8,5% no biogás e alta concentração de CO₂ porém para o segundo teste com inóculo bovino verificou-se uma chama resultante da combustão do biogás apresentando uma chama forte azulada indicando a baixa existência de componentes tóxicos. (KALIYAN & MOREY, 2009)

Verificou-se que o aumento da concentração do gás CH₄ influenciou directamente na intensidade da chama.

5.10. Impactos ambientais, sociais e económicos da actividade em estudo

Os impactos ambientais provocados pela utilização das fontes não renováveis são bem preocupantes, pois liberam gases poluentes durante sua combustão. Entre eles temos o dióxido de carbono, considerado actualmente o principal causador do aquecimento global. Em menor quantidade são ainda liberados óxidos de enxofre e óxido de nitrogénio, ambos responsáveis pelo fenómeno conhecido como chuva ácida. (VICTORINO, 1995)

O poder calorífico de GPL corresponde à queima de dez árvores. Isso significa que o consumo de biogás a base de esterco de galinha evita a queima de milhões de árvores em Moçambique e no mundo. (ALER, 2017)

Tabela 11: Impactos ambientais.

| Efluente | Impacto negativo | Forma de mitigação do impacto |
|------------------|--|---|
| Biogás | Produção de metano com emissão ao ar livre gera graves problemas ambientais. | Utilização do metano para gerar energia, reduzindo o impacto que este teria se fosse produzido ao ar livre. |
| Resíduos sólidos | Poluição hídrica e do solo; Destruição da biodiversidade. | Deposição num aterro sanitário |
| Lama digerida | Poluição hídrica e do solo; Destruição da biodiversidade. | Reutilização dos resíduos para a produção de biofertilizantes Reutilização na câmara de mistura para reduzir o consumo de água |

Impacto social

De forma social positiva, a actividade da biodigestão anaeróbica produz biofertilizantes que podem ajudar na prática da agricultura nas comunidades.

Contudo, esta actividade também tem um impacto social negativo da seguinte forma: os trabalhadores directamente ligados a área de mistura do esterco com água estarão em contacto com odores indesejados, sendo que a exposição a estes ambientes periga a saúde do trabalhador (MINISTERIO DA AGRICULTURA E SEGURANCA ALIMENTAR, 2015); além disto, os trabalhadores estarão em contacto com material inflamável bem como dispositivos eléctricos. Como forma de garantir a segurança no sector de trabalho são apresentadas as seguintes medidas:

- ✓ Passagem de efluentes por filtros apropriados;
- ✓ Distribuição de equipamento de protecção individual;
- ✓ Montagem de kits de primeiros socorros;
- ✓ Elaboração de planos de emergência.

Impacto econômico

A tabela a seguir mostra os pontos fortes e fracos da unidade fabril bem como as principais ameaças e oportunidades.

Tabela 12: Análise SWOT (FOFA).

| | |
|----------------------|--|
| Forças | <ul style="list-style-type: none">✓ Baixo custo de matéria-prima;✓ Redução de impactos ambientais;✓ Produção de fertilizantes orgânicos. |
| Fraquezas | <ul style="list-style-type: none">✓ Alto custo de investimento;✓ Tecnologia complexa;✓ Dependência da matéria-prima. |
| Oportunidades | <ul style="list-style-type: none">✓ Incentivos governamentais; |

| | |
|----------------|---|
| | <ul style="list-style-type: none">✓ Demanda crescente por energia renovável;✓ Parceria com agricultores e indústrias. |
| Ameaças | <ul style="list-style-type: none">✓ Disponibilidade limitada de matéria-prima;✓ Riscos operacionais;✓ Flutuações de preços. |

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

No presente estudo, avaliou-se a eficácia da biodigestão anaeróbica como uma tecnologia viável para a produção de biogás a partir de esterco de galinha, chegando-se às seguintes conclusões:

- ✓ A análise físico-química é uma etapa crucial para garantia da melhor eficiência de um biodigestor e garantia da qualidade do biogás a ser produzido, pois estes mostraram que os parâmetros analisados no esterco de galinha garantem uma biodegradação ótima (teor de humidade 76.37%, densidade de 956 kg/m³, gordura 1.71%, DBO 2.3mg/L, proteína 11.46%);
- ✓ A opção pelo modelo de biodigestor pré-fabricado é viável por se tratar de uma tecnologia mais moderna e avançada, com menor complexidade de montagem do sistema e facilidade na operação;
- ✓ Quanto a performance da digestão anaeróbica resultando na eficiente produção do gás, conclui-se que: o resultado da análise de ST (5%), revela-se ideal para formação de gás pois é o recomendado pelo fabricante do biodigestor;
- ✓ Do ponto de vista energético, o biogás produzido a partir da biodigestão de esterco de galinha produziu poder calorífico de 6264 kJ/m³;
- ✓ O proprietário da Quinta Mothassy teve ganhos como eliminação do custo da aquisição do GPL e obtenção do biofertilizante para actividade agrícola.

6.2. Recomendações

Com o trabalho realizado, propõe-se o seguinte:

- ✓ Recomenda-se que os Conselhos Municipais incentivem aos avicultores a tornarem-se energeticamente auto-sustentáveis;
- ✓ O Governo incentivar as empresas que comercializam equipamentos de produção e utilização de biogás, facilitando a aquisição da tecnologia pelos avicultores;

- ✓ Separar as penas do esterco porque causam entupimento das bombas;
- ✓ Instalar um misturador rotativo vertical para homogeneizar a mistura de esterco e água.

Bibliografia

- ALBUQUERQUE, L. V., LIMA, N. C., LIMA, A. C., STEFANUTTI, R., & OLIVEIRA, F. D. (2013). Avaliação de actividade metanogênica específica para produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos. *VI Workshop de engenharia de petróleo*. Ceara.
- ALER. (2023). *Energias renováveis em Moçambique: Relatório Nacional do ponto de situação*. Maputo.
- ANGELIDAKI, I., ELLEGAARD, L., & AHRING, B. (2003). *Applications of the Anaerobic Digestion Process in Biochemical Engineering/Biotechnology* (Vol. 82). Denmark.
- AVILA, V. S., MAZZUCO, H., & FIGUEIREDO, E. A. (2007). *Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante*. Concordia: Embrapa Suínos e Aves.
- BERNY, M. D., & BAJAY, S. V. (2000). *Geração de energia e a digestão anaeróbica no tratamento de efluentes: estudo de caso na indústria de papel*. Campinas: AGRENER.
- Boletim da República. (2009, Outubro 14). *Política de Desenvolvimento de Energias Novas e Renováveis*. Maputo, Mocambique.
- CHEN, L., XING, L., & HANA, L. (2009). *Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology* (Vol. XIII). Oxford: Renewable and Sustainable Review.
- DEMIRBAS, A. (2002). *Relationship between heating value and pH of biomass* (Vol. 20).
- FARUK, O., BLEIDZKHI, H., FINK, H. P., & SAIN, M. (2012). *Biocomposites Reinforced with natural Fibers* (Vol. XXXVII).
- FELTRE, R. (2004). *Química*. Sao Paulo: Moderna.
- FORTES, A. G., MUTENDA, F. M., & RAIMUNDO, B. (2019). Energias renováveis em Moçambique: disponibilidade, geração, uso e tendências futuras. *Revista brasileira multidisciplinar*, 22(1a).
- GUEIFÃO, C., ANDRE, J., NOBREGA, N., CARANOVA, N., SANTOS, J., ANDRE, S., . . . FALCAO, D. (2013). *Atlas das energias renováveis de Moçambique: Recursos e projectos para produção de electricidade*. Maputo: Gesto-Energia, S.A.
- GUEYE, E. F. (2000). *The role of family poultry in poverty alleviation, food security and the promotion of gender equality in rural Africa* (Vol. 29). Agriculture.
- HARUN, M., & MASSANGO, F. A. (1996). *Estudo sobre sistemas de produção de pequenas espécies nos distritos de Angonia e Tsangano na província de Tete*. Maputo: DANIDA.
- HONORIO, M. (2009). *Estimativa de créditos de carbono da produção e queima do biogás proveniente de dejectos suínos: estudo de caso*. Florianópolis.
- JENKINS, B. M. (1990). *Fuel properties for biomass materials, international symposium on application and management of energy in agriculture*.

- KALIYAN, N., & MOREY, R. V. (2009). *Factors affecting strength and durability of densified biomass products* (Vol. III). Biomass and Bioenergy.
- LESTINSKY, P., VECER, M., NAVRATIL, P., & STEHLIK, P. (2015). *Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para zona rural*. São Paulo: Icone.
- LEVENSPIEL, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. New York: John Wiley e Sons.
- MAGALHAES, R., SILVA, T. M., & CASTRO, V. G. (2003). *Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo*. Florianópolis: PR.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E SEGURANÇA ALIMENTAR. (2015). *Anuário de estatísticas agrárias*. Maputo.
- PASSAMANI, F., & LIMA, A. (2012). *Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETA-UFES*. Vitória.
- RESNICK, R., HALLIDAY, D., & WALKER, J. (1996). *Física 2* (4a ed.). Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos SA.
- SANTOS, T. M. (1997). *Caracterização química, microbiológica e potencial de produção de biogás a partir de três tipos de cama, considerando dois ciclos de criação de frango de corte*. Jaboticabal.
- SEABRA JUNIOR, E. (2017). *Análise da produção de biogás proveniente da mistura de biomassa da suinocultura com bagaço de cana em diferentes granulometrias*. Cascavel: UNIOESTE.
- SEIFERT, B. (2011). A taxonomic revision of the Eurasian *Myrmica salina* species complex. *Soil organisms*, 169-186.
- SEIXAS, J. (1980). *Construção e funcionamento de biodigestores*. Circular técnica.
- SILVA, W. R. (2009). *Estudo cinético do processo de digestão anaeróbica de resíduos sólidos vegetais*. PB - Brasil: Universidade Federal da Paraíba.
- SILVEIRA, M. A., KRETZER, S. G., NAGAOKA, A. K., & BAUER, F. C. (2014). Produção de biogás em biodigestores de tamanho reduzido abastecido com cama de aviário. *Acta tecnológica*, IX, p. 9-15.
- SORTORI, S., KURIYAMA, G. S., ALVARENGA, T. H., VIEIRA, B. S., & CAMPOS, L. M. (2017). Os benefícios e desafios da geração de electricidade no contexto da sustentabilidade. *Encontro internacional sobre gestão empresarial e meio ambiente*. São Paulo: FEA-USP.
- TUN, P. P., SAH, C. B., WIN, S. S., & SHRESTHA, K. (2019). The preparation and characteristics of briquettes from coconut husks as renewable resource of energy. In *North American Academic Research* (p. 58-71).
- UTECH, K. (2013). *Cinética de consumo de substrato na codigestão anaeróbica de dejectos da bovinocultura de leite e cama de aviário*. Palotina.

VICTORINO, A. (1995). *Estudo sobre o fogão a carvão vegetal e o ensino de Física em Moçambique*. Beira: Universidade Pedagógica.

Apêndices

Apêndice 1 – Produção de Frango

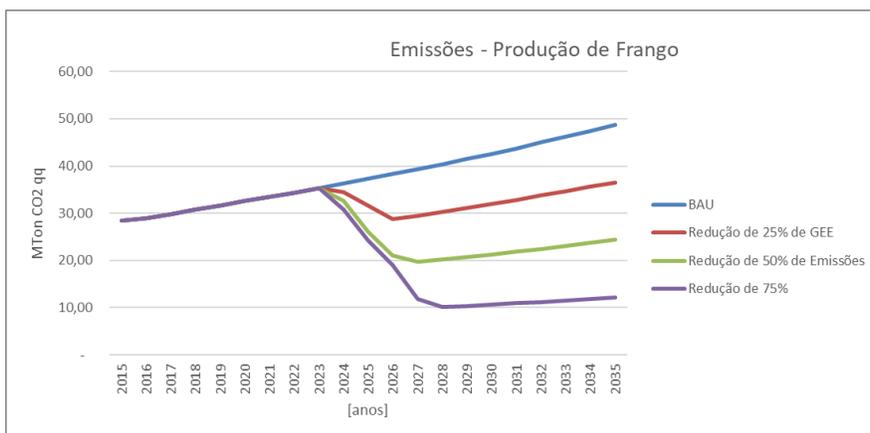


Gráfico A1-1: Emissões vs. Produção de Frango.

| | 2016 | 2018 | 2020 | 2022 | 2024 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Produção de Frangos [*10⁶(un/ano)] | 45,28 | 47,98 | 50,80 | 53,61 | 56,57 |
| Produção de Excremento (Gton/ano) | 2,97 | 3,15 | 3,34 | 3,52 | 3,72 |
| Emissões Geradas (Gton CO2 eq/ ano) | 29,01 | 30,74 | 32,55 | 34,35 | 36,25 |

Tabela A1-1: Impacto da produção de frangos e excremento ao longo dos últimos anos.

Apêndice 2 - Caracterização física e química do esterco de galinha.

| Designação da amostra | W | B | N |
|-----------------------|--------|-----|-----|
| FG1 | 1.0173 | 1.8 | 0.1 |
| | 1.0001 | 1.9 | |
| | 1.0006 | 1.6 | |
| FG2 | 1.0035 | 2 | |
| | 1.0019 | 2 | |
| | 1.0090 | 2.1 | |
| FG3 | 1.0060 | 4.9 | |
| | 1.0053 | 2.9 | |
| | 1.0009 | 3.8 | |

Tabela A2-1: Determinação de proteínas.

| Ensaio de DBO | | | | | | | |
|---------------|-------|------------|---------------|-------|-------|-----------|------|
| Data | Hora | Designação | Qty (mg ou L) | DBO-1 | DBO-5 | DBO final | |
| 8/14/2023 | 12:00 | FG1-A | 2.89 | 5.06 | 0.51 | 455 | |
| | | FG1-B | 2.84 | 6.37 | 0.53 | 584 | |
| | | FG1-C | 2.88 | 4.07 | 0.55 | 352 | |
| | | | | | | | |
| | | FG2-A | 2.88 | 8.55 | 0.62 | 793 | |
| | | FG2-B | 2.89 | 8.49 | 0.45 | 804 | |
| | | FG2-C | 2.99 | 8.42 | 0.48 | 794 | |
| | | | | | | | |
| | | FG3-A | 2.84 | 8.46 | 1 | 746 | |
| | | FG3-B | 2.83 | 8.43 | 0.79 | 764 | |
| | | FG3-C | 2.8 | 8.36 | 0.5 | 786 | |
| | | | | | | | |
| | | H2O-A | | | 8.97 | 8.71 | 0.26 |
| | | H2O-B | | | 8.96 | 8.51 | 0.45 |
| | | H2O-C | | | 8.98 | 8.7 | 0.28 |
| | | | | | | | |

| | | | | | |
|--|-------------|--|------|------|------|
| | Confirmação | | 8.65 | 8.18 | 0.47 |
|--|-------------|--|------|------|------|

Tabela A2-2: Determinação da demanda bioquímica de oxigénio.

| Designação da amostra | P ₀ | P ₁ | Densidade | Média das densidades | Densidade final |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------|----------------------|-----------------|
| FG1 | 15.5742 | 62.2397 | 0.9333 | 0.9576 | 0.9561 |
| | 15.6838 | 65.5805 | 0.9979 | | |
| | 15.2741 | 62.3534 | 0.9416 | | |
| FG2 | 15.6038 | 64.0738 | 0.9694 | 0.9659 | |
| | 15.6933 | 64.0725 | 0.9676 | | |
| | 15.3046 | 63.2498 | 0.9589 | | |
| FG3 | 15.5904 | 62.4408 | 0.9370 | 0.9454 | |
| | 15.6851 | 63.1991 | 0.9502 | | |
| | 15.2752 | 62.7350 | 0.9492 | | |

Tabela A2-3: Determinação de densidade.

Tabela A2-4: Determinação de teor de sólidos.

| Designação da amostra | Peso do cadinho | Peso da amostra | Peso a saída da estufa | Peso a saída da mufla | Teor de sólidos totais | Teor de voláteis | Teor de sólidos fixos | Teor de humidade |
|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| FG1 | 29.6021 | 5.0006 | 30.7354 | 30.7054 | 22.6600 | 62.9898 | 37.1199 | 77.3367 |
| | 22.1400 | 5.0002 | 23.3041 | 23.2887 | 23.2800 | 62.8756 | 37.0098 | 76.7189 |
| | 19.5068 | 5.0009 | 20.7117 | 20.7009 | 24.0900 | 63.0009 | 36.9872 | 75.9063 |
| FG2 | 22.3591 | 5.0006 | 23.6227 | 23.5989 | 25.2600 | 62.9743 | 37.1089 | 74.7310 |
| | 21.9542 | 5.0002 | 23.0931 | 23.0099 | 22.7700 | 62.9786 | 37.1123 | 77.2229 |
| | 19.0295 | 5.0004 | 20.2159 | 20.1999 | 23.7200 | 63.0012 | 36.8347 | 76.2738 |
| FG3 | 21.8883 | 5.0005 | 23.0546 | 22.9878 | 23.3200 | 62.9998 | 37.1089 | 76.6763 |
| | 47.8471 | 5.0004 | 48.9884 | 48.8989 | 22.8200 | 62.9815 | 37.1199 | 77.1758 |
| | 44.6785 | 5.0008 | 45.8535 | 45.6989 | 23.4900 | 62.9929 | 37.7699 | 76.5037 |

Tabela A2-5: Resultados laboratoriais vs. da literatura.

| Parâmetros analisados | Resultados laboratoriais | Resultados da literatura |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Temperatura (°C) | 26.33 | 25 |
| pH | 6.86 | 6.5-8.5 |
| Condutividade (µS/cm) | 12.01 | 10-20 |
| Densidade (kg/m ³) | 956 | 850 |
| Gordura (%) | 1.71 | 3 |
| Proteína (%) | 11.46 | 15 |
| DBO (mg/L) | 2.3 | 3 |
| Humidade (%) | 76.37 | + de 50 |

Apêndice 3 – Dimensionamento do biodigestor

| Dados Gerais | | |
|--|------------------------|--------|
| Produção de Excremento por dia | kg/ave/dia | 0.18 |
| Qty de Aves | unid | 628.00 |
| Quantidade Gerada de Excremento | kg/dia | 113.04 |
| Volume do Biodigestor | m ³ | 15.00 |
| Volume útil | m ³ | 8.80 |
| Volume reservado para o gás no biodigestor | m ³ | 6.20 |
| Volume do gasómetro | m ³ | 6.00 |
| Potencial de Produção de Biogás | m ³ /dia/kg | 0.45 |
| Dados Laboratoriais | | |
| Teor de Humidade | % | 83 |
| Densidade | kg/m ³ | 954 |
| Teor de Sólidos Totais | % | 22 |
| Sólidos Voláteis | % | 63 |
| Sólidos Fixos | % | 37 |
| DBO | [mg/l O ₂] | 783 |

Tabela A3-1: Dados gerais e laboratoriais.

Apêndice 4 - Caracterização da alimentação diária e do biogás

| Data | Designação da amostra | Peso do cadinho | Peso da amostra | Peso a saída da estufa | ST | H |
|----------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------|----------|
| 10/11/2023 (1º dia) | Alimentação | 49.9969 | 5 | 50.2649 | 5% | 95% |
| | | 47.8792 | 5.0005 | 48.1309 | 5% | 95% |
| | | 48.3183 | 5.0009 | 48.6216 | 6% | 94% |
| | Recirculação 15min | 43.2088 | 5 | 43.3870 | 4% | 96% |
| | | 44.6764 | 5 | 44.8576 | 4% | 96% |
| | | 22.5699 | 5.0009 | 22.7463 | 4% | 96% |
| | Recirculação 10min | 48.2107 | 5.0004 | 48.3567 | 3% | 97% |
| | | 47.2756 | 5.0006 | 47.4077 | 3% | 97% |
| | | 21.9464 | 5 | 22.1074 | 3% | 97% |
| | Recirculação 20min | 23.0015 | 5.0001 | 23.2102 | 4% | 96% |
| | | 48.2184 | 5.0001 | 48.4265 | 4% | 96% |
| | | 49.7533 | 5.0002 | 49.9564 | 4% | 96% |
| | Recirculação 30min | 36.3839 | 5.0004 | 36.5985 | 4% | 96% |
| | | 48.308 | 5.0001 | 48.5111 | 4% | 96% |
| | | 60.2718 | 5.0006 | 60.4867 | 4% | 96% |
| 13/11/2023 (4º dia) | Alimentação | 22.8281 | 5.0004 | 23.1528 | 6% | 94% |
| | | 40.81 | 5.0002 | 41.1374 | 7% | 93% |
| | | 49.065 | 5.0007 | 49.3869 | 6% | 94% |
| | Recirculação 1h | 49.4967 | 5.0009 | 49.6462 | 3% | 97% |
| | | 47.7877 | 5.0009 | 47.9365 | 3% | 97% |

| | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|-----|
| | | 47.7612 | 5.0009 | 47.9132 | 3% | 97% |
| 17/11/23 (8° dia) | Alimentação | 49.0654 | 5.0001 | 49.354 | 6% | 94% |
| | | 48.3093 | 5 | 48.6688 | 7% | 93% |
| | | 47.9966 | 5.0009 | 48.3439 | 7% | 93% |
| | Antes da recirculação | 44.6776 | 5 | 45.0927 | 8% | 92% |
| | | 46.8057 | 5.0009 | 47.1916 | 8% | 92% |
| | | 48.3219 | 5.0009 | 48.651 | 7% | 93% |
| | Recirculação 30min | 23.003 | 5 | 23.0774 | 1% | 99% |
| | | 22.5711 | 5 | 22.6471 | 2% | 98% |
| | | 40.8115 | 5.0009 | 40.9264 | 2% | 98% |
| | 20/11/23 (11° dia) | Antes da recirculação | 43.2112 | 5 | 43.6233 | 8% |
| 49.4998 | | | 5.0009 | 49.9116 | 8% | 92% |
| 47.7919 | | | 5.0003 | 48.2019 | 8% | 92% |
| Recirculação 15min | | 47.8796 | 5.0007 | 48.07 | 4% | 96% |
| | | 47.2779 | 5.0006 | 47.464 | 4% | 96% |
| | | 49.7552 | 5 | 49.9458 | 4% | 96% |
| 27/11/23 (18° dia) | Antes da recirculação | 48.3085 | 5.0007 | 48.8523 | 11% | 89% |
| | | 49.7562 | 5 | 50.3115 | 11% | 89% |
| | | 46.8055 | 5.0008 | 47.3453 | 11% | 89% |
| | Recirculação 15min | 47.3995 | 5.0002 | 47.8085 | 5% | 95% |
| | | 48.2785 | 5.0004 | 48.9099 | 5% | 95% |
| | | 48.3096 | 5.0003 | 48.8911 | 5% | 95% |

Tabela A4-1: Monitoria da humidade e %ST da alimentação diária.

| Dia | Designação da amostra | Valor de pH |
|----------------------------|------------------------------|--------------------|
| 10/11/23 (1° dia) | Alimentação | 6.38 |
| | Recirculação 15min | 7.19 |
| | Recirculação 10min | 6.99 |
| | Recirculação 20min | 6.81 |
| | Recirculação 30min | 7.06 |
| 13/11/2023 (4° dia) | Alimentação | 6.41 |
| | Recirculação 1h | 6.34 |
| 17/11/23 (8° dia) | Alimentação | 6.33 |
| | Antes da recirculação | 7.33 |
| | Recirculação 30min | 6.19 |
| 18/11/23 (9° dia) | Antes da recirculação | 7.57 |
| | Recirculação 15min | 6.05 |
| 19/11/23 (10° dia) | Antes da recirculação | 7.56 |
| | Recirculação 15min | 6.21 |
| 20/11/23 (11° dia) | Antes da recirculação | 5.94 |
| | Recirculação 15min | 5.85 |
| 27/11/23 (18° dia) | Antes da recirculação | 5.55 |

Tabela A4-2: Monitoria da composição do pH do biodigestor.

| Operação do Biodigestor | | |
|--------------------------------|--------------|----------------|
| Parâmetro | Valor | Unidade |
| Quantidade da Água | 156.48 | Kg ou L |
| Quantidade de Água | 0.16 | m ³ |
| Quantidade de Esterco | 137.4 | kg |
| Carga Orgânica Diária | 0.29 | m ³ |

| | | |
|--------------------------------|------|----------------|
| TDR | 30 | dias |
| Potencial de Geração de Biogás | 6.28 | m ³ |

| Aclimação / Produção do Inóculo | | |
|--|--------------|----------------|
| Parâmetro | Valor | Unidade |
| Volume Útil | 8.8 | m ³ |
| Esterco | 1.8 | m ³ |
| Água Residual | 7 | m ³ |
| Sólidos Totais | 0.44 | m ³ |
| Quantidade de ST no Biodigestor | 5 | % |
| Quantidade de Esterco | 1679 | kg |
| Quantidade de Água | 7040 | kg |
| 8° dia | Valor | Unidade |
| Esterco | 13.41 | kg |
| Sólidos Totais | 3.26 | kg |
| Massa Total de Alimentação (10% ST) | 32.6 | kg |
| Quantidade de Água | 19.56 | kg |
| 9° dia ao 17° | Valor | Unidade |
| Esterco | 19.56 | kg |
| Sólidos Totais | 4.89 | kg |
| Massa Total de Alimentação (10% ST) | 48.9 | kg |
| Quantidade de Água | 29.34 | kg |

Tabela A4-3: Parâmetros operacionais do biodigestor.

| Data | Hora | Designação | Qty (mg/L) | DBO-1 | DBO-5 | DBO final |
|-------------|-------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|------------------|
| 14/08/2023 | 12:00 | FG1-A | 2.89 | 5.06 | 0.51 | 455 |

| | | | | | | |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------|-------|
| | | FG1-B | 2.84 | 6.37 | 0.53 | 584 |
| | | FG1-C | 2.88 | 4.07 | 0.55 | 352 |
| | | FG2-A | 2.88 | 8.55 | 0.62 | 793 |
| | | FG2-B | 2.89 | 8.49 | 0.45 | 804 |
| | | FG2-C | 2.99 | 8.42 | 0.48 | 794 |
| | | FG3-A | 2.84 | 8.46 | 1 | 746 |
| | | FG3-B | 2.83 | 8.43 | 0.79 | 764 |
| | | FG3-C | 2.8 | 8.36 | 0.5 | 786 |
| | | H2O-A | | 8.97 | 8.71 | 0.26 |
| | | H2O-B | | 8.96 | 8.51 | 0.45 |
| | | H2O-C | | 8.98 | 8.7 | 0.28 |
| | | Confirmação | | 8.65 | 8.18 | 0.47 |
| | | | 12:00 | Confirmação | | 8.59 |
| FG1 | 2.67 | | | 7.9 | 0.49 | 741 |
| FG2 | 2.63 | | | 7.88 | 0.39 | 749 |
| FG3 | 2.66 | | | 7.94 | 0.34 | 760 |
| S1A | 15 | | | 7.72 | 0.43 | 145.8 |
| S1B | 15 | | | 7.28 | 0.28 | 140 |
| S1C | 15 | | | 7.08 | 0.28 | 136 |
| S2A | 15 | | | 7.48 | 0.3 | 143.6 |
| S2B | 15 | | | 7.12 | 0.29 | 136.6 |
| S2C | 15 | | | 7.15 | 0.3 | 137 |
| S3A | 15 | | | 7.38 | 0.3 | 141.6 |
| S3B | 15 | | | 7.23 | 0.28 | 139 |
| S3C | 15 | | | 7.16 | 0.43 | 134.6 |
| 29/09/2023 | 10:00 | A3A-1 | 15 | 8.73 | 0.9 | 156.6 |

| | | | | | | |
|--|--------------|-------------|--------------|------|------|--------|
| | | A3A-2 | 15 | 8.67 | 0.61 | 161.2 |
| | | A3A-3 | 15 | 8.64 | 0.42 | 164.4 |
| | | A3B-1 | 15 | 8.73 | 0.44 | 165.8 |
| | | A3B-2 | 15 | 8.66 | 0.39 | 165.4 |
| | | A3B-3 | 15 | 8.62 | 0.36 | 165.2 |
| | | A3C-1 | 15 | 8.71 | 0.71 | 160 |
| | | A3C-2 | 15 | 8.59 | 0.41 | 163.6 |
| | | A3C-3 | 15 | 8.56 | 0.36 | 164 |
| | | A12-1 | 15 | 6.04 | 0.35 | 113.8 |
| | | A12-2 | 15 | 5.19 | 0.38 | 96.2 |
| | | A12-3 | 15 | 5.27 | 0.43 | 96.8 |
| | | Confirmação | | 8.91 | 8.42 | 9.8 |
| | | | 09:00 | S1 | 3 | 8.48 |
| S2 | 3 | | | 8.47 | 0.27 | 273.33 |
| S3 | 3 | | | 8.46 | 0.27 | 273.00 |
| A1 | 3 | | | 8.24 | 0.72 | 250.67 |
| A2 | 3 | | | 8.27 | 0.61 | 255.33 |
| A3 | 3 | | | 8.34 | 0.44 | 263.33 |
| Confirmação | 0 | | | 8.56 | 7.89 | 22.33 |
| 13/10/2023 (30o dia após alimentação) | 14:00 | A1 | 3 | 8.23 | 0.29 | 264.67 |
| | | A2 | 3 | 8.14 | 0.38 | 258.67 |
| | | A3 | 3 | 8.03 | 0.34 | 256.33 |
| | | S1-A | 3 | 8.46 | 0.75 | 257 |
| | | S1-B | 3 | 8.44 | 0.36 | 269.33 |
| | | S1-C | 3 | 8.43 | 0.28 | 271.67 |
| | | S2-A | 3 | 8.49 | 0.22 | 275.67 |

| | | | | | | |
|--|--|-------------|---|------|------|--------|
| | | S2-B | 3 | 8.46 | 0.26 | 273.33 |
| | | S2-C | 3 | 8.43 | 0.31 | 270.67 |
| | | Confirmação | 0 | 8.49 | 8.05 | 14.67 |

Tabela A4-4: Determinação de DBO das amostras da alimentação.

| Data | Dias de alimentação | pH | Condutividade (μ s) |
|--------|---------------------|------|--------------------------|
| 14/set | 1o | 6,92 | 13.6 |
| | | 6,9 | 13.7 |
| | | 6,77 | 14.9 |
| 19/set | 5o | 6,25 | 18.46 |
| | | 6,09 | 7.71 |
| | | 6,33 | 7.79 |
| 21/set | 8o | 6,13 | 11.6 |
| | | 6,06 | 12.4 |
| | | 6,27 | 12.32 |
| | | 6,28 | 12.38 |
| 02/out | 18o | 6,30 | 13.78 |
| | | 6,23 | 14.02 |
| | | 6,31 | 14.78 |
| 13/out | 30o | 6,52 | 10.03 |
| | | 6,34 | 18.87 |
| | | 6,34 | 18.99 |

Tabela A4-5: Monitoria do pH das amostras da alimentação.

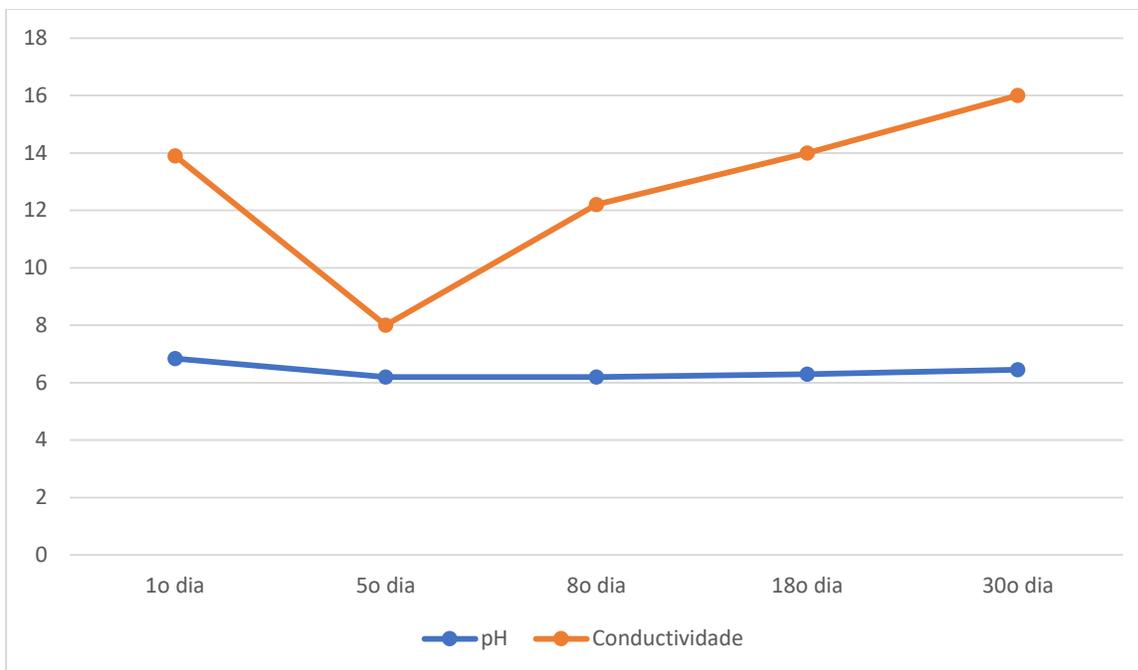


Gráfico A4-2: Comportamento do pH ao longo do período de monitoramento do sistema.

| Data | Temperatura (°C) | Produção do gás (m³) |
|----------|------------------|----------------------|
| 09/01/24 | 37 | 186.1 |
| 10/01/24 | 33.7 | 188.9 |
| 11/01/24 | 36.2 | 191.5 |
| 19/01/24 | 22.9 | 230.1 |
| 20/01/24 | 27.5 | 243.6 |
| 21/01/24 | 30.9 | 253.5 |
| 22/01/24 | 32.1 | 258.1 |
| 23/01/24 | 31 | 261.9 |
| 24/01/24 | 32.2 | 267.6 |
| 25/01/24 | 29.1 | 279.2 |

| | | |
|----------|------|-------|
| 26/01/24 | 39.1 | 284.8 |
| 27/01/24 | 37.7 | 287.9 |
| 28/01/24 | 25.7 | 299.1 |

Tabela A4-6: Leituras dos parâmetros do biogás.

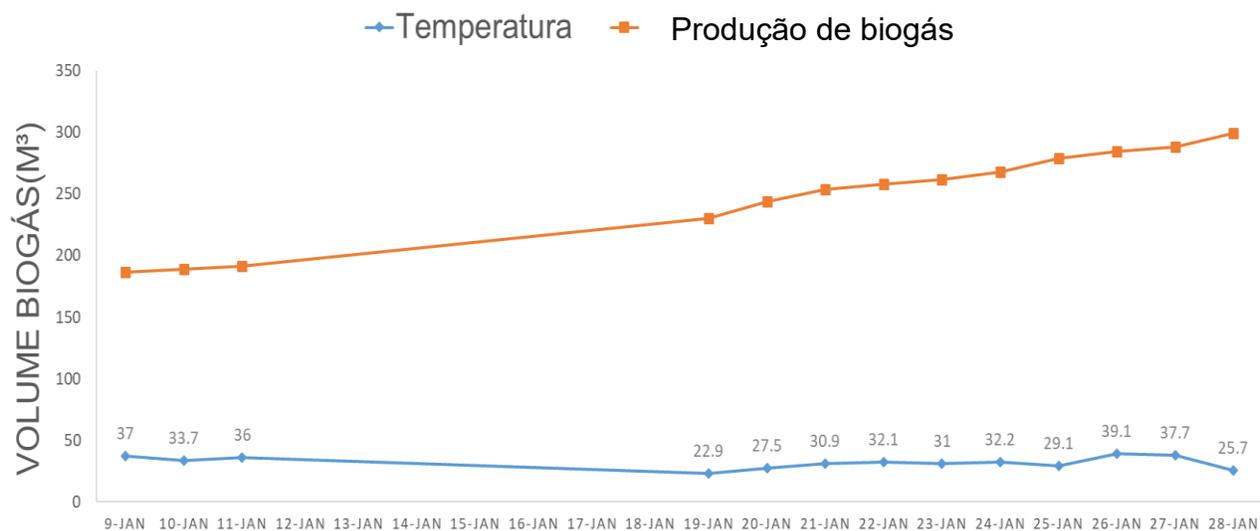


Gráfico A4-3: Comportamento da temperatura ao longo do período de monitoramento do sistema.

Apêndice 5 - Reportagem fotográfica



Figura A5-1: Recolha e pesagem da matéria-prima.



Figura A5-2: Montagem do biodigestor.



Figura A5-3: Alimentação do biodigestor.



Figura A5-4: Colheita de amostras para análise.



Figura A5-5: Planta de biogás.



Figura A5-6: Montagem de sistema de limpeza.



Figura A5-7: Fogão a funcionar abastecido por biogás.

Apêndice 6 - Fichas de especificações técnicas

| Material | Quantidade | Unid |
|---------------------------------------|------------|------|
| Tubo PVC DN 50 | 2 | Un |
| Válvula DN 50 | 2 | Un |
| Curva DN 50-90 | 2 | Un |
| Curva DN 50-45 | 2 | Un |
| T DN 50 | 2 | Un |
| Ferro 6 (2m) | 1 | Un |
| Cimento (kg) | 2 | Kg |
| Madeira (60/70 cm de diâmetro) | 1 | Un |
| Braçadeiras DN 50 | 8 | Un |
| Braçadeiras $\frac{3}{4}$ para parede | 15 | Un |
| Fixador de parede 10mm | 20 | Un |
| Tubo de gás | 45 | M |
| Tubo de água $\frac{3}{4}$ | 40 | m |
| Cola PVC | 1 | M |
| Filtro de água | 1 | Un |
| Teflon | 1 | Un |
| Redutores | 2 | Un |
| Curva $\frac{1}{2}$ (fêmea + fêmea) | 2 | Un |
| União $\frac{1}{2}$ | 2 | Un |
| Parafusos para suspensão do filtro | 3 | Un |
| Braçadeiras para tubo de gás | 15 | Un |
| Equipamentos | | |
| Rebarbadora | | |
| Máquina de soldar | | |

| |
|-----------|
| Berbequim |
| Cerrote |
| Martelo |

Tabela A6-1: Material e equipamentos para montagem do sistema de lavagem e canalização do biogás para cozinha.

| Descrição | QTY | Unidade |
|--|-----|---------|
| Membrana de montagem PUXIN 15CBM (A) | 1 | Set |
| Pó de fermentação | 15 | Kgs |
| Conexões de biogás | 1 | Set |
| Desidratador de biogás PX-10L | 1 | Pcs |
| Dessulfurizador biogás PX-20L | 1 | Pcs |
| Pelota do dessulfurizador | 50 | Kgs |
| Saco de armazenamento para biogás PX-CDQ-RM6 6m ³ | 1 | Pcs |
| Bomba 220V AC 20W | 1 | Sets |
| Fogão com duas bocas para biogás | 1 | Set |
| Lâmpada | 1 | Sets |
| Gerador para biogás 1.5Kw | 1 | Set |
| Bomba de circulação c/ entrada p/ tubos (0.75kW 220v 50Hz) | 1 | Set |
| Bomba de esgoto (1.1kW, fase única) | 1 | Set |
| Triturador de restos de alimentos 20L (3kW, fase única) | 1 | Set |

Tabela A6-2: 1 conjunto de planta de biogás com membrana de montagem PUXIN de tamanho médio 15m³ (A).