



**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ENGENHARIA DO AMBIENTE (PÓS-LABORAL)**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

# **OPERACIONALIZAÇÃO DE UM BIODIGESTOR**

**AUTOR:**

Mácio Eduardo Pelembe

**SUPERVISOR:**

Prof. Doutor Eng<sup>o</sup>. António José Cumbane

Maputo, Setembro de 2023

**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA DO AMBIENTE (PÓS-LABORAL)**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**OPERACIONALIZAÇÃO DE UM BIODIGESTOR**

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, da Universidade Eduardo Mondlane, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciado em Engenharia do Ambiente.

**AUTOR:**  
Mácio Eduardo Pelembe

**SUPERVISOR:**  
Prof. Doutor Eng<sup>o</sup>. António José Cumbane

Maputo, Setembro de 2023



**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA \_\_\_\_\_

**TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA**

Declaro que o estudante \_\_\_\_\_ Entregou  
no dia \_\_\_\_ / \_\_\_\_ /20 \_\_\_\_ as \_\_\_\_ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a  
referência:.....Intitulado.....

.....  
.....

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20 \_\_\_\_

A Chefe de Secretaria

\_\_\_\_\_

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Declaro por minha honra que o trabalho apresentado em seguida foi realizado com base nos conhecimentos adquiridos ao longo do curso e nos documentos e referências citadas no mesmo.

Maputo, Setembro de 2023

O autor

.....  
(Mácio Eduardo Pelembe)

## Dedicatória

*À todos aqueles que de forma incondicional acreditaram no meu potencial, especialmente a minha mãe, Tuáira Jabre Atmane, que tudo fez por mim, mesmo diante de tantas adversidades sempre esteve do meu lado. Aos meus irmãos, que me apoiaram em momentos difíceis e me incentivaram a não desistir dos meus objectivos. À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que eu me tornasse o que sou.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a deus, por estar comigo em todos os instantes, por me dar a capacidade de realizar este trabalho e pelos milagres que já operou e ainda operará em minha vida. Se hoje estou aqui, a sua mão me sustentou.

À toda a minha família, especialmente a minha mãe, Tuáira Jábre Atmane e aos meus irmãos, Idélio, Hélio e Danila pelo carinho e apoio incondicional.

Ao meu supervisor Prof. Doutor Eng.º António José Cumbane, pela oportunidade de realizar o estágio, por todo o suporte técnico, pelos conselhos, pela paciência, disponibilidade, por permitir um ambiente agradável de trabalho e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A dona Marisa, proprietária da quinta Marisa, onde foi instalado o biodigestor, por permitir que todo trabalho decorresse sem sobressaltos.

Aos Docentes e funcionários do Departamento de Química – Faculdade de Engenharia que contribuíram para a minha formação ao longo do curso incluindo os meus colegas de curso.

Ao meu colega, amigo e grande concelheiro Manuel António Aguacheiro, pelo apoio incondicional ao longo de toda jornada estudantil, pela sua simplicidade e amizade.

À Brendaline Smith, meu grande amor, que é o meu porto seguro nos momentos mais difíceis, e a responsável pela minha maior e mais sincera felicidade.

A todos que, de alguma forma, marcaram positivamente a minha vida.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a  
mesma coisa e esperar resultados  
diferentes.”

Albert Einstein

## RESUMO

As emissões de metano a partir da geração de dejetos animais têm contribuído para o aumento dos gases de efeito estufa, intensificando o problema do aquecimento global. A utilização de biodigestores no tratamento de dejetos animais além de reduzir a carga orgânica dos dejetos, também diminui a emissão de GEE com a possibilidade de gerar energia. Entretanto, o objectivo principal deste trabalho consistiu em estudar os parâmetros para operacionalização de um biodigestor com capacidade de 10 000 litros (10 m<sup>3</sup>), operado a partir de dejetos suínos e bovinos no distrito de Namaacha, localidade de Mafuane. Os parâmetros em estudo foram: o pH, demanda bioquímica de oxigénio (CBO), demanda química de oxigénio (CQO), concentração de sólidos voláteis e totais (SVT e ST). Os trabalhos tiveram uma duração de 3 meses desde o início da primeira alimentação que culminou no assoreamento do biodigestor devido a falta de alguns cuidados no âmbito da alimentação.

Os resultados obtidos mostraram que o biogás produzido a partir da mistura dos dejetos suínos e bovinos, apresenta características com um potencial suficiente para ser usado como gás tanto doméstico bem como industrial com teor de metano (CH<sub>4</sub>) igual a 74,00 %, 7.3% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e 0.7% de oxigénio (O<sub>2</sub>). Procedeu-se ao ensaio de queima e verificou-se que a intensidade da chama era suficiente para confeccionar alimentos. Portanto, os parâmetros abordados neste trabalho, mostraram-se suficiente para descrever melhor o desempenho do processo digestivo anaeróbico e avaliar a qualidade do biogás produzido.

Concluiu-se que utilização de reatores anaeróbios nos sistemas de tratamento dos dejetos de suínos e bovinos, além de removerem a matéria orgânica e os sólidos voláteis existentes nos dejetos brutos, possibilitam a formação do biogás com boa composição em termos de CH<sub>4</sub> e com a possibilidade real de sua utilização para geração de energia. Com este tipo de tratamento minimiza-se o impacto causado pela libertação dos GEE na atmosfera, beneficiando o meio ambiente.

**Palavras chave:** Biodigestor, Digestão anaeróbica, Parâmetros operacionais, Dejetos suínos e bovinos, Biogás.

## ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	VII
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.3. HIPÓTESE .....	2
1.4. JUSTIFICATIVA .....	2
1.5. OBJECTIVOS.....	3
1.5.1. Objectivo Geral.....	3
1.5.2. Objectivos Específicos .....	3
1.6. METODOLOGIA DO TRABALHO .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. DIGESTÃO ANAEROBIA.....	5
2.1.1. Hidrólise.....	6
2.1.2. Acidogênese.....	6
2.1.3. Acetogênese.....	7
2.1.4. Metanogênese.....	8
2.2. BIODIGESTOR.....	9
2.2.1. Classificação dos biodigestores .....	9
2.3. PARÂMETROS QUE AFETAM A DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	10
2.3.8. OUTROS PARÂMETROS .....	16
2.4. SEGURANÇA OPERACIONAL .....	19
2.5. BIOGÁS.....	20
2.5.1. Propriedades do Biogás .....	21
2.5.2. Utilização do biogás .....	22
2.5.5.1. PROCESSO DE REMOÇÃO DOS CONTAMINANTES .....	26
2.6. USO DO DIGESTATO COMO FERTILIZANTE.....	30
BIOFERTILIZANTE.....	30
BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DO USO DO LODO COMO BIOFERTILIZANTE .....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	33

3.1.	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	33
3.2.	MATERIAIS USADOS .....	33
3.2.2.	EQUIPAMENTOS.....	34
	MEDIDOR DE DQO: DR1900 PORTABLE SPECTROPHOTOMETER .....	34
3.2.3.	REAGENTES .....	35
	CONFIGURAÇÃO DO REACTOR .....	35
3.3.	ANÁLISES LABORATORIAIS .....	36
3.3.1.	Valor de Potencial hidrogeniónico (pH) .....	36
3.3.2.	Determinação da concentração de Sólidos Totais e sólidos voláteis.....	36
	Determinação da Demanda Bioquímica de Oxigénio (DBO5 20) .....	40
3.3.3.	Determinação da Demanda Química de Oxigénio (DQO) .....	40
3.3.4.	Composição do biogás .....	41
4.	DISCUSSÃO E RESULTADOS .....	43
4.1.	CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS VOLÁTEIS TOTAIS.....	43
4.2.	DEMANDA QUÍMICA E BIOQUÍMICA DE OXIGÉNIO .....	45
4.3.	COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS .....	46
4.4.	PROCESSO DE REMOÇÃO DOS CONTAMINANTES.....	48
4.4.1.	Remoção de H <sub>2</sub> S .....	48
4.4.2.	Remoção da água .....	48
	Vantagens e desvantagens do biogás .....	49
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	51
5.1.	CONCLUSÕES.....	51
5.2.	RECOMENDAÇÕES .....	52
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	A
	ANEXOS.....	D

## **Lista de Abreviaturas e Símbolos**

**AGV** – Ácidos Gordos Voláteis

**AT**- Alcalinidade Total

**DBO** – Demanda Bioquímica de Oxigénio (*Biochemical oxygen demand - BOD*)

**DQO** – Demanda Química de Oxigénio (*Chemical oxygen demand - COD*)

**COV** – Carga Orgânica Volumétrica

**DA** – Digestão Anaeróbica

**DEQUI** – Departamento de Engenharia Química

**pH** – Potencial Hidrogeniónico

**SDT** – Sólidos Dissolvidos Totais

**SFT** – Sólidos Fixos Totais

**ST** – Sólidos Totais

**SVT** – Sólidos Voláteis Totais

**T** – Temperatura

**TRH** – Tempo de Retenção Hidráulica

**UEM** – Universidade Eduardo Mondlane

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação dos biodigestores .....	9
Tabela 2: Características do meio .....	11
Tabela 3: Estágios da temperatura .....	11
Tabela 4: Evolução da relação AI/AP e características do reator. ....	14
Tabela 5: Substâncias inibidoras: Limites Ótimos, Médios e Máximos .....	16
Tabela 6: Composição típica do biogás .....	21
Tabela 7: Características gerais de Biogás.....	22
Tabela 8: Vantagens e desvantagens dos sistemas convencionais para remoção da umidade presente no biogás. ....	27
Tabela 9: Equipamentos usados .....	34
Tabela 10: Reagentes usados.....	35
Tabela 11: Método de determinação dos principais parâmetros em estudo.....	36
Tabela 12: : Realização das análises sólidos totais .....	37
Tabela 13: Resultados das experiências feitas por De Barcelos .....	43
Tabela 14: Resultados de DBO e DQO.....	45
Tabela 15: Valores de conversão energética para alguns efluentes.....	47

## Lista de Figuras

Figura 1: Esquema de decomposição anaerobia para a produção de biogás .....	5
Figura 2: Princípio de funcionamento de uma usina de Biogás .....	9
Figura 3: Etapas de tratamento e purificação do biogás para concentração do biometano de acordo com o seu uso final.....	25
Figura 4: Processos tecnológicos mais comumente observados para a dessulfurização do biogás. ....	28
Figura 5: Localização do distrito de Namaacha .....	33
Figura 6: imagem de dejetos suínos e bovinos usados para alimentação do biodigestor. ....	34
Figura 7: A esquerda temos o biodigestor antes da alimentação e a direita temos um biodigestor em seu pleno funcionamento.....	35
Figura 8: Balança analítica e Estufa.....	37
Figura 9: Imagem da mufla contendo as amostras. ....	38
Figura 10: Medidor de DBO e a incubadora.....	40
Figura 11: Imagens do frasco do reagente para análise do DQO, Termo reator e Espectrofotômetro portátil DR1900 .....	41
Figura 12: Analisador de biogás.....	42
Figura 13: Analisador de Biogás comprovando uma quantidade percentual superior a 70% de metano .....	47
Figura 14: Dessulfurizador para a remoção de H <sub>2</sub> S. ....	48
Figura 15: Imagem do condensador e dessulfurizador já instalados .....	49

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A procura de fontes alternativas de energia que permitam não só reduzir a dependência energética de fontes fósseis, mas também reduzir os níveis de emissões de GEE, deu origem ao desenvolvimento de várias formas de produção de energia renovável, sendo essa variação fruto da utilização de fontes distintas: vento, radiação solar, ondas do mar, calor subterrâneo, massas de água doce ou biomassa. Quanto maior for a diversificação das fontes maior se torna o leque de opções para as diferentes necessidades.

Diante do exposto, a utilização de biodigestores para o tratamento dos dejetos aparece como uma solução simplificada e apropriada ao saneamento, assim como ao suprimento autónomo de energia. Trata-se de uma alternativa que associa o adequado tratamento dos resíduos proveniente da criação do gado tanto suíno assim como bovino e a diversificação da matriz energética, sendo aplicável a diversas situações e no contexto atual da crise energética e da problemática dos resíduos sólidos urbanos bem como rurais.

No processo de decomposição dos dejetos são emitidos gases, que podem causar graves problemas nas vias respiratórias do homem e dos animais, além de contribuírem para o aquecimento global (BRAGA et al., 2005). Os gases são emitidos pelos sistemas de criação de suínos, incluindo a fase produtiva dos animais e a geração, manejo e utilização dos dejetos.

Neste trabalho, pretende-se contribuir com o aumento das soluções com potencial utilização na produção de energia renovável, sendo efetuada uma avaliação ao potencial de produção de biogás a partir de dejetos suínos e bovinos. A transformação desses substratos em energia é feita através da sua biodegradação anaeróbica, dando origem a um gás que ao ser utilizado como combustível permite obter energia.

## 1.2. Formulação do Problema

A deficiência do processo de gestão dos resíduos sólidos em Moçambique vem causando uma serie de problemas sob ponto de vista de poluição ambiental, visto que

tanto para o resíduos sólidos urbanos bem como os rurais não tem uma destinação adequada no que concerne ao tratamento dos resíduos, Entretanto a criação de soluções para a minimização destes problemas é fundamental, dai que os biodigestores aparecem como uma parte dessas soluções, porque para além de contribuírem para o tratamento da matéria orgânicos reduzindo dessa forma a emissão de GEE também criam uma fonte alternativa de geração de energia.

### **1.3. Hipótese**

Diante dos problemas que advém da falta de tratamento dos resíduos orgânicos quando libertados ao meio ambiente sem o devido tratamento é apresentado o presente trabalho como hipótese para solucionar estes problemas com a tecnologia do biodigestor como alternativa tanto para o tratamento bem como para geração de energia.

### **1.4. Justificativa**

A escolha do tema partiu de uma sugestão do supervisor, ao fazer o convite para que de forma conjunta fosse possível desenvolver este tema devido ao seu maior grau de importância. Entretanto o presente trabalho consiste em mostrar o potencial do biogás produzido a partir do tratamento dos dejetos, através de um biodigestor anaeróbico. Este tipo de tratamento reduz-se a carga orgânica do efluente e minimiza o impacto causado pela libertação dos gases de efeito estufa, principalmente o CH<sub>4</sub>, beneficiando o meio ambiente. Já existem diversas possibilidades tecnológicas para o tratamento do biogás, eliminando o H<sub>2</sub>S e o CO<sub>2</sub>, permitindo a maximização do aproveitamento energético na geração de eletricidade e energia mecânica. No entanto, é necessário desenvolver mais pesquisas na área para melhorar viabilidade da utilização do biogás a longo prazo.

## **1.5. Objectivos**

### **1.5.1. Objectivo Geral**

Operacionalizar um biodigestor a partir de dejetos suínos e bovinos localizado no distrito de Namaacha, localidade de Mafuane.

### **1.5.2. Objectivos Específicos**

- Avaliar as condições ideais para o processo de digestão anaeróbica;
- Analisar os parâmetros tais como: pH, temperatura, DBO, DQO, concentração dos sólidos voláteis e totais;
- Verificar e avaliar a qualidade do biogás produzido;
- Purificar o biogás produzido;

## **1.6. Metodologia do trabalho**

Para a elaboração do presente relatório foi seguida uma metodologia que consistiu em dividir as actividades de acordo com as fases para o alcance do objectivo geral que é operacionalizar um biodigestor a partir de dejetos suínos e bovinos.

### **FASE I**

Foi caracterizada pela pesquisa bibliográfica relacionada aos seguintes aspectos:

- Produção de biogás com biodigestores operados a partir de dejetos suínos e bovinos;
- Métodos de determinação de parâmetros operacionais;
- Consultas em artigos, relatórios e manuais científicos obtidos nos Websites para a produção de biogás.

### **FASE II**

Consistiu no levantamento das condições do local de trabalho sob ponto de vista de identificação do fornecedor da matéria prima para alimentação do biodigestor e ainda nessa fase procurou-se fazer a primeira alimentação com o intuito de dar início a operação do biodigestor.

### **FASE III**

Esta fase consistiu na recolha de amostras para serem analisadas. Algumas análises foram feitas *in situ* e outras nos laboratórios de química da Faculdade de Engenharia.

### **FASE IV**

A quarta e última fase foi caracterizada pela elaboração do relatório final que consistiu na análise e discussão dos resultados obtidos em todo processo de produção de biogás desde a fase inicial até aos níveis mais elevados do potencial de produção do biogás.

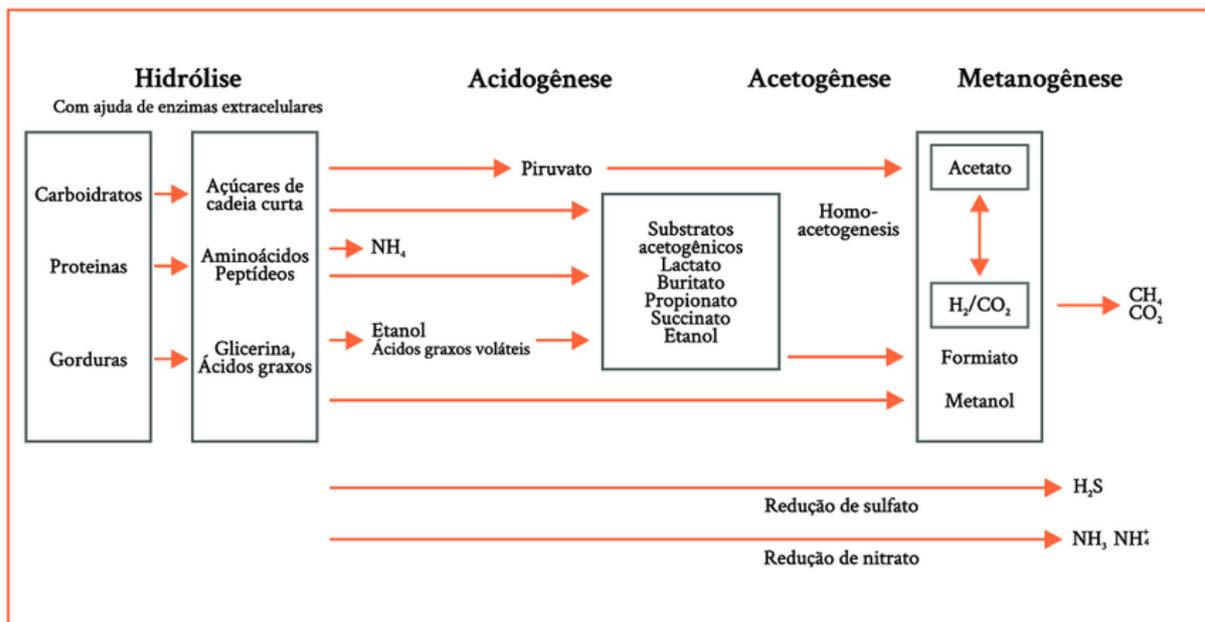
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbica consiste em um processo metabólico complexo, em ausência de oxigênio, e depende diretamente da ação interativa de um consórcio formado por diferentes tipos de micro-organismos específicos que, ao trabalhar de maneira sintrófica e dinâmica, convertem, por meio de reações de fermentação e respiração, compostos complexos orgânicos em substâncias mais simples, dentre eles, o gás carbônico e o metano (MATA-ALVAREZ e CECCHI, 1990; GRIFFIN *et al.*, 1998; ANGELIDAKI *et al.*, 1999; CHANDRA *et al.*, 2012)

O processo metabólico de estabilização anaeróbica em um reator pode ser dividido, de modo geral, em quatro etapas, nas quais ocorre a degradação de matéria orgânica por meio de reações de fermentação e respiração: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme figura abaixo:

Figura 1: Esquema de decomposição anaeróbica para a produção de biogás



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).

### 2.1.1. Hidrólise

A hidrólise é a primeira etapa da digestão anaeróbica, onde as enzimas extracelulares são secretadas pelas bactérias hidrolíticas. As cadeias mais complexas compostas por carboidratos, proteínas e lipídios são quebradas em pequenos pedaços mais solúveis (açúcares, aminoácidos, ácidos graxos) para que os micro-organismos possam assimilar (FARIA, 2012; SALOMON, 2007). Os principais fatores que atrasam esta etapa são: pH, temperatura, tempo de retenção e distribuição das partículas (FARIA, 2012). Entretanto, segundo Monnet (2003), o processo pode ser acelerado através da adição de compostos químicos que oferecem um maior rendimento na produção de metano. E a reação que descreve esta etapa é a seguinte:



### 2.1.2. Acidogênese

Nesta segunda etapa, os monómeros formados na fase hidrolítica são utilizados como substratos por diferentes bactérias anaeróbicas e facultativas, sendo degradados na fase acidogênica a ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas com 1 a 5 carbonos (ex. ácidos butírico, propiónico e acético), álcoois, óxidos de nitrogénio, sulfeto de hidrogénio, hidrogénio e dióxido de carbono. A pressão parcial de hidrogénio durante o processo afeta diretamente o estado de oxidação dos produtos. Se for muito elevada, resultarão em produtos com maior quantidade de carbono (KUNZ; STEINMETZ; DO AMARAL; 2019)

A maior parte das bactérias nesta etapa é considerada anaeróbica estrita. Segundo Bohrz (2010), cerca de 1% são consideradas bactérias facultativas, isto é, elas podem metabolizar por meio oxidativo, usando o oxigénio molecular como aceptor de elétrons, removendo o oxigénio que está dissolvido no sistema.

O ácido acético, hidrogénio e o dióxido de carbono correspondente a 70% segundo Seadi *et al.*, (2008), restantes 30% corresponde a ácidos gordos voláteis (AGV) e álcoois. As bactérias acidogénicas, são anaeróbicas e se desenvolvem em condições ácidas. Nesta

fase ocorre a redução de compostos com baixo peso molecular em álcoois, sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) e alguns traços de metano (Zupancic e Grilc, 2012).

Reações típicas que ocorrem nessa fase são apresentadas abaixo segundo Ostrem e Themelis (2004). Glucose (Reacção 2) é convertida em etanol e a reacção 3 mostra a conversão de glucose ao ácido propiónico.

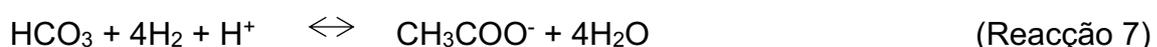
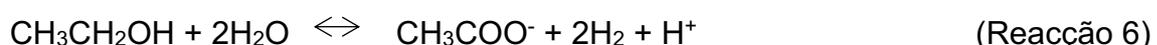
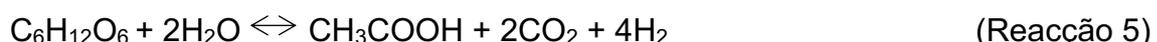
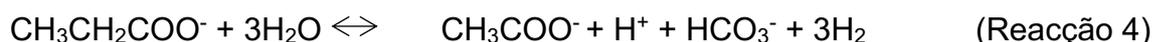


### 2.1.3. Acetogênese

A terceira etapa da digestão anaeróbica é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. As reações acetogênicas são endotérmicas, por exemplo, a degradação do ácido propiónico a acetato e dióxido de carbono apresenta  $\Delta G = + 74 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (KUNZ; STEINMETZ; DO AMARAL; 2019).

Estes produtos finais da fermentação (hidrogénio, dióxido de carbono e acetato) são os precursores da formação do metano (CH<sub>4</sub>), que vai ocorrer na metanogênese. A mudança de energia livre associada à conversão do propionato e butirato em acetato e hidrogénio requer que o hidrogénio esteja em baixas concentrações no sistema (H<sub>2</sub> < 10<sup>-4</sup> atm) ou a reacção não acontecerá (METCALF E EDDY, 1991).

A conversão do substrato a acetato deve ser rápida para que a produção da energia seja viável economicamente, pois o acetato é o principal precursor do metano. Este fato confere grande importância à fermentação acidogênica na conversão da matéria orgânica em energia da forma de metano (SILVA APUD GHOSH, 1981). Entretanto as seguintes reações ilustram a formação de acetato a partir de propionato na reacção 4, glicose na reacção 5, etanol na reacção 6 e por fim bicarbonato na reacção 7.



#### 2.1.4. Metanogênese

Na quarta e última fase, o gás metano é produzido pelas metanobactérias, reduzindo o CO<sub>2</sub> ou o acetato, dependendo da espécie de bactérias presentes, a metano, CO<sub>2</sub> e água (METCALF E EDDY, 1991). Segundo Silva (2009), são dois os papéis desempenhados pelas bactérias metalogénicas: produção de metano que possibilita a remoção de carbono orgânico, reduzindo o ácido acético a metano e dióxido de carbono, pela via acetotrófica, e a redução do dióxido de carbono a metano e água, pela via hidrogenotrófica. Aproximadamente 60% do metano total produzido é derivado da conversão de ácido acético ou a fermentação do álcool formado na fase acidogénica como o metanol (Ray *et al.*, 2013). Restante 40% é resultado da redução de dióxido de carbono por hidrogénio. São apresentadas abaixo as reações que ocorrem nesta fase para a formação de metano de acordo com Ostrem e Themelis (2004).

Conversão de acetato:



Seguido por:



Conversão de Metanol



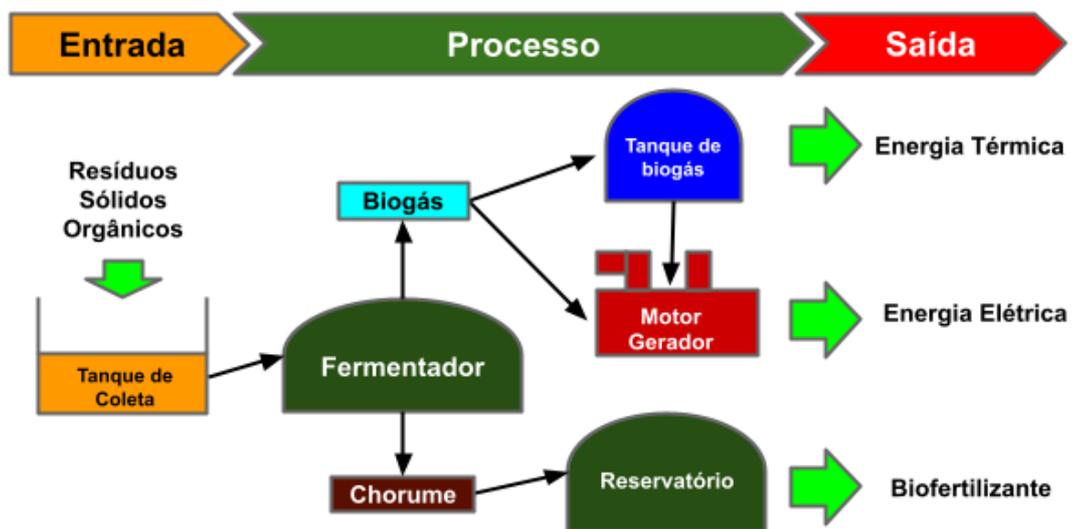
Todas as etapas da digestão anaeróbica estão intimamente relacionadas, uma vez que a produção do metano depende da produção do ácido acético e hidrogénio e a produção destes depende da conversão dos compostos orgânicos a ácidos graxos voláteis. Desta forma, as bactérias metalogénicas dependem do substrato fornecido pelas acetogénicas, que são dependentes das acidogénicas e estas das hidrolíticas, reforçando a relação existente entre as fases.

Segundo Silva (2009), é estimado que a digestão anaeróbica seja responsável pela estabilização de 5% a 10% de toda a matéria orgânica presente no planeta. Este processo representa um sistema ecológico delicadamente balanceado onde cada microrganismo desempenha uma função essencial e fatores que afetam a sobrevivência dos micro-organismos vão também influenciar diretamente na digestão dos resíduos e na produção de biogás (PROSAB, 2003).

## 2.2. Biodigestor

Biodigestores consistem em equipamentos impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar anaerobiamente, ou seja, sem a presença do oxigênio, por um determinado tempo de retenção, no qual ocorre um processo bioquímico denominada digestão anaeróbica, que tem como resultado a formação de produtos gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono, além também biofertilizante (Magalhães, 1986). A Figura abaixo ilustra o princípio de funcionamento de uma usina de biogás:

Figura 2: Princípio de funcionamento de uma usina de Biogás



Fonte: Portal do Biogás, 2021.

### 2.2.1. Classificação dos biodigestores

Quanto ao modo de operação os biodigestores são classificados em:

Tabela 1: Classificação dos biodigestores

Tipo de operação	Forma de Construção	Armazenamento do biogás	Faixa de Temperatura	Fluxo de Material
Descontínuo	Enterrada	Gasómetro interno	Psicrófilo	Vertical
Semi-contínuo	Semi-enterrada	Gasómetro externo	Mesófilo	Horizontal
Contínuo	Externa	-	Termófilo	Ascendente

Fonte: Pinto, 1999

Nos sistemas de alimentação contínua há introdução de substratos de forma constante e regular nos reatores e ao mesmo tempo que ocorre a alimentação, um volume igual ao de entrada é removido como resíduos tratados, o que resulta numa produção contínua de biogás. Esse sistema apresenta como desvantagem a possibilidade de parte do resíduo, que é removido continuamente do digestor, não se encontrar completamente estabilizado (REIS, 2012). Tal possibilidade existirá caso o biodigestor não seja projetado corretamente e tenha um tempo de detenção hidráulica inadequado, não permitindo que as etapas da biodigestão ocorram completamente.

Nos sistemas de alimentação descontínua, há preenchimento total do biodigestor em uma única vez com os resíduos frescos, podendo ou não ser adicionado um inóculo. A introdução de inóculos no meio tem mostrado resultados satisfatórios, uma vez que promove a diminuição do tempo necessário para a bio estabilização anaeróbica dos resíduos, já que contribui para a melhora da densidade microbiana (PROSAB, 2003)

### **2.3. Parâmetros que afetam a digestão anaeróbica**

Como acontece com todos os processos biológicos, as condições ambientais ideais são essenciais para uma operação bem-sucedida da digestão anaeróbica. Os processos do metabolismo microbiano dependem de muitos parâmetros; portanto, esses parâmetros devem ser considerados e cuidadosamente controlados na prática. De forma que se possa operar um biodigestor para produzir eficientemente o biogás verifica-se a necessidade do conhecimento e a identificação antecipada de alguns factores que influenciam no desenvolvimento dos microrganismos. Os processos metabólicos microbianos dependem de vários parâmetros tais como: Temperatura, valor de pH, presença de nutrientes e quantidade de substâncias inibidoras (e.g. Amónia), entre outros (Seadi, *et al.*, 2008). Segundo Zupancic e Grilc (2012), as condições ambientais para o desenvolvimento das bactérias acidogénicas diferem das condições para as bactérias metanogénicas (*Archea*). São apresentados a seguir as diferenças entre as condições do meio para diferentes etapas.

**Tabela 2: Características do meio**

<b>Parâmetro</b>	<b>Hidrólise/Acidogênese</b>	<b>Metanogênese</b>
<b>Temperatura</b>	25 a 35°C	Mesofílico: 30 a 40 °C Termofílico: 50 – 60°C
<b>pH</b>	5.2 a 6.3	6.7 a 7.5
<b>Rácio C: N</b>	10 a 45	20 a 30
<b>Rácio C: N:P:S</b>	500:15:5:3	600:15:5:3
<b>Potencial Redox</b>	+400 a – 300mV	Menos que - 250mV
<b>Traço de elementos</b>	Sem especialidade	Essenciais: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: (Deublein e Steinhauser, 2008 (*apud* Zupancic e Grilc, 2012; Esteves, *et al.*, 2012)

Com substratos contendo celulose (que são lentamente degradáveis) a etapa de hidrólise é o limitante e precisa de atenção prévia. E com substratos ricos em proteínas, o pH ótimo é igual em todas as etapas do processo anaeróbico, portanto, um único digestor é suficiente para um bom desempenho. E também os substratos ricos em gordura, a taxa de hidrólise aumenta com melhor emulsificação, de modo que a acetogênese é limitante. Portanto, um processo termofílico é recomendado.

### **2.3.1. Temperatura**

A temperatura tem efeitos importantes nas propriedades físico - químicas de componentes encontrados nos substratos anaeróbicos. Também influencia a velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos, e com isso, a dinâmica populacional em um biodigestor. Os microrganismos podem ser classificados em função da temperatura, em três grandes grupos de acordo com a seguinte tabela:

**Tabela 3: Estágios da temperatura**

<b>Fase Térmico</b>	<b>Temperatura, °C</b>
Psicrófilo	15 a 20
Mesófilo	30 a 40
Termófilo	50 a 60

Fonte: (Zupancic e Grilc, 2012)

De acordo com o Rohstoff (2010) cada microrganismo envolvido no processo tem a sua própria faixa de temperatura ideal. Existem determinadas faixas de temperaturas nos quais os micro-orgânicos não resistem e deixam de exercer as suas actividades metabólicas acarretando deste modo a velocidade do processo. Consequentemente, este parâmetro está altamente relacionado com a produção do biogás, quanto maior for a temperatura, maior será a taxa de produção do biogás. Entretanto, nem sempre elevadas temperaturas constituem uma vantagem, pois a temperatura influencia na toxicidade de amónia (Seadi, *et al.*, 2008) para além de eliminação de alguns microrganismos que não suportam estas condições.

### **2.3.2. O valor de pH**

As alterações no pH podem ocasionar problemas que afetam os microrganismos que participam da digestão anaeróbica, como na modificação da sua estrutura, levando à perda de suas características (MEYSTRE, 2007; SALOMON, 2007). De acordo com Weiland (2001), o pH considerado ideal para as bactérias hidrolíticas e acidogênicas desenvolverem suas atribuições é na faixa de 5,2 a 6,3. Já nas últimas fases da digestão anaeróbica, processo realizado pelas bactérias acetogênicas e metalogênicas, é necessário um pH estritamente neutro, na faixa de 6,5 e 8 (LEBUHN *et al.*, 2008). De acordo com o mesmo autor, cada grupo de microrganismo tem um valor diferente de pH óptimo. As arqueas metalogênicas são extremamente sensíveis ao pH, com um valor óptimo entre 6,7 e 7,5. Os microrganismos fermentativos são menos sensíveis e podem se adaptar a maiores variações de pH entre 4,0 e 8,5. Em baixos valores de pH os principais produtos são os ácidos acético e butírico, enquanto que em pH próximo a 8,0, os principais produtos são os ácidos acético e propiônico. Os ácidos voláteis produzidos durante a biodigestão tendem a reduzir o pH do meio reacional. Essa redução é normalmente combatida pela actividade das arqueas metalogênicas, que também produzem alcalinidade na forma de dióxido de carbono, amónia e bicarbonato. Alterações das condições operacionais de um biodigestor ou a introdução de substâncias tóxicas podem ocasionar a acumulação de ácidos gordos voláteis (AGV) e um desequilíbrio ao sistema (Labatut e Gooch, 2012).

Durante o processo de decomposição da matéria orgânica, as bactérias formadoras de ácidos produzem ácidos gordos voláteis no qual implica na redução do valor de pH (Granato, 2003; Carvalho, 2010). Nas mesmas condições, as bactérias metanogénica resistentes a essas condições começam a agir, convertendo os ácidos em metano, e desta forma neutralizam o meio elevando o valor de pH. Outro factor que contribui para aumentar o valor de pH é o teor de amónia que se eleva quando as proteínas são digeridas (Granato, 2003).

### **2.3.3. Demanda Bioquímica e Química de Oxigénio (DBO e DQO)**

#### **2.3.3.1. Demanda Bioquímica de Oxigénio (DBO)**

A demanda bioquímica de oxigénio representa a quantidade de oxigénio necessária para oxidar a matéria orgânica contida em águas e efluentes, a qual ocorre por meio da decomposição microbiana aeróbia. Valores altos deste parâmetro geralmente estão relacionados ao lançamento de cargas orgânicas em efluentes domésticos e daqueles de origem industrial de processos específicos, representando alta concentração de poluentes biodegradáveis e ocasionando a diminuição no oxigénio dissolvido do meio, o que pode provocar a mortalidade dos indivíduos aquáticos presentes (BITTENCOURT; PAULA, 2014).

#### **2.3.3.2. Demanda Química de Oxigénio (DQO)**

É a quantidade de oxigénio necessária para oxidação da matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente químico, como o dicromato de potássio. Os valores da DQO normalmente são maiores que os DBO, sendo o teste realizado num prazo menor. O aumento da concentração de DQO num corpo d'água deve-se principalmente a despejos de origem industrial. A DQO é um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de esgotos sanitários e de efluentes industriais. A DQO é muito útil quando utilizada conjuntamente com a DBO para observar a biodegradabilidade de despejos. Sabe-se que o poder de oxidação do dicromato de potássio é maior do que o que resulta mediante a ação de microrganismos, exceto raríssimos casos como hidrocarbonetos aromáticos e piridina. Desta forma, os resultados da DQO de uma

amostra são superiores aos de DBO. Como na DBO mede-se apenas a fração biodegradável, quanto mais este valor se aproximar da DQO significa que mais biodegradável será o efluente.

De acordo com Von Sperling (1996), quando comparada a análise da DBO, esta é mais abrangente em seu resultado, visto que a DBO se refere somente a oxidação bioquímica da matéria orgânica, realizada exclusivamente por microrganismos. Outra diferença entre os dois parâmetros é o tempo de obtenção dos resultados, visto que a DQO leva de 2 a 3 horas enquanto o tempo mínimo para DBO é de 5 dias (DBO).

#### 2.3.4. Ácidos Gordos Voláteis

A maioria dos problemas na digestão anaeróbica pode ser atribuída ao acúmulo de ácidos voláteis e, conseqüentemente, a queda do pH. Os principais efeitos adversos dos ácidos orgânicos voláteis (AOVs) no processo de digestão anaeróbica são relacionados ao fato de serem espécies intermediárias. A diminuição do pH abaixo de 6,6 implica na inibição do crescimento das arqueas metanogênicas. No entanto, as bactérias acidogênicas continuam suas funções até pH 4,5. O resultado é um rápido acúmulo de AOVs (KUNZ; STEINMETZ; DO AMARAL; 2019)

Uma estratégia para o controle do sistema de tamponamento e monitoramento indireto dos ácidos produzidos durante a digestão anaeróbica é a relação alcalinidade intermediária/alcalinidade parcial (AI/AP), sendo que a primeira fornece valores equivalentes à alcalinidade por bicarbonato, enquanto que a segunda à alcalinidade vinda dos ácidos voláteis. Na Tabela abaixo pode-se observar a importância do acompanhamento da relação AI/AP, onde são apresentadas as relações e as características do reator segundo a experiência empírica.

**Tabela 4: Evolução da relação AI/AP e características do reator.**

Relação AI/AP	Características do reator
>0,4	Reator em sobrecarga
0,3 – 0,4	Faixa ótima
< 0,3	Reator em subcarga

**Fonte:** Adaptado de Mézes, et al. (2011).

O valor ótimo pode variar dependendo das características do reator e substrato. É recomendado acompanhar a relação AI/AP constantemente, pois o mais importante é observar variações bruscas e realizar medidas corretivas quando necessário (KUNZ; et, al, 2019)

### **2.3.5. Concentração de nutrientes**

É imprescindível que a concentração de macro e micronutrientes esteja de forma adequada para que os processos de tratamento dos efluentes sejam realizados com eficácia (BOHRZ, 2010).

Os nutrientes mais essenciais são o fósforo e nitrogênio em qualquer processo biológico, a eficiência dos microrganismos na obtenção da energia vai depender da qualidade da matéria orgânica (LOUZADA, 2006).

Alguns nutrientes como ferro, zinco, cobalto, níquel e cobre estão entre os micronutrientes mais utilizados, pois os mesmos atuam como estimulantes nos processos anaeróbios (SALOMON, 2007; LOUZADA, 2006).

### **2.3.6. Rácio C: N**

Outro factor que tem influência na digestão anaeróbica e que necessita de ser controlado para que os biodigestores funcionem corretamente é a razão entre a quantidade de carbono e azoto presentes no meio. Durante o processo digestivo os microrganismos utilizam o carbono entre 25 a 30 vezes mais rápido do que o azoto, daí que seja necessário manter o equilíbrio C: N na razão dos 30:1. Quando as matérias-primas não possuem valores perto dos aconselhados, a codigestão com outros substratos é uma boa estratégia para equilibrar a razão C: N (Yadvika et al., 2004 & Ward et al., 2008).

### **2.3.7. Substâncias Inibidoras**

Em sistemas de digestão anaeróbica, um fenómeno característico pode ser observado. Algumas substâncias que são necessárias para o crescimento microbiano em pequenas concentrações inibem a digestão em concentrações mais altas. Efeito semelhante pode ter alta concentração de ácidos graxos voláteis totais (tVFA's). Embora representem o

próprio substrato que as arqueias metanogênicas se alimentam em concentrações acima de 10.000 mgL<sup>-1</sup>, podem ter um efeito inibitório na digestão (Mrafkova et al., 2003; Ye et al., 2008). De acordo com (Rohstoff, 2010), deve –se ter em conta que para além de inibição que pode ser causado pelas substâncias presentes no substrato existe uma outra forma de inibição que é originado através do próprio processo como os compostos intermediários em estágios de decomposição. Neste contexto, é de extrema importância observar que a alimentação excessiva do substrato no biodigestor pode ocasionar a inibição do processo digestivo (Rohstoff, 2010).

**Tabela 5: Substâncias inibidoras: Limites Ótimos, Médios e Máximos**

<b> Materiais</b>	<b>Concentração ótima (ppm)</b>	<b>Inibição moderada (ppm)</b>	<b>Inibição (ppm)</b>
Sódio	100-200	3500-5500	16000
Potássio	200-400	2500-4500	12000
Cálcio	100-200	2500-4500	8000
Magnésio	75-150	1000-1500	3000
Detergente	-	-	-
Cloreto de Sódio	-	-	-

Fonte: Zupancic e Grilc, 2012

### **2.3.8. Outros Parâmetros**

Existem outros parâmetros ligados ao dimensionamento da planta de biogás além dos já supracitados para sua operação e eficácia.

#### **2.3.8.1. Agitação**

A agitação facilita o contacto entre o substrato, os microrganismos e os nutrientes, fornecendo temperatura uniforme ao longo do processo. É particularmente importante que os microrganismos hidrolíticos tenham contacto com as várias moléculas que são

rompidas no processo de digestão, de modo que suas enzimas possam ser disseminadas a uma grande superfície de contato do substrato (Lajeado, 2014). De acordo com o mesmo autor a agitação também evita que o material se acumule no fundo do biodigestor e reduz o risco de formação de espuma. Além disso, facilita a transferência de hidrogênio a partir de metano e permite que os microrganismos realizem oxidação anaeróbica.

A agitação não deve ser muito forte porque, muitas vezes, os microrganismos crescem juntos em pequenos agregados, facilitando a sua cooperação estreita e de transferência de hidrogênio. A partir de uma agitação leve é promovida a formação de agregados e metano (LAJEADO, 2014)

A agitação contínua evita a sedimentação e o espaço no biodigestor pode ser ocupado da melhor maneira possível. Substratos com altos níveis de sólidos totais são geralmente mais difíceis de serem misturados em comparação aos líquidos. A agitação no tanque de substrato também é importante para evitar a sedimentação causada pelo excesso de carga orgânica (LAJEADO, 2014).

#### **2.3.8.2. Tempo de Retenção Hidráulica**

Tempo de detenção hidráulica é o tempo que o material permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do digestor. De acordo com os diferentes substratos utilizados para a alimentação do biodigestor, e dos demais fatores, o tempo de retenção varia de 4 a 60 dias (Mazzucchi, 1980; Filho, 1981).

Para o substrato composto de resíduos de matéria orgânica o tempo de detenção situa na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e devido a isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo e a partir desse ponto passa a decair (Beux, 2005). Segundo o mesmo autor o tempo de retenção hidráulica pode ser obtido pela relação entre o volume de mistura líquida do biodigestor e a carga diária. Durante o tempo de retenção, a matéria orgânica é degradada e ocorre a produção de biogás.

### **2.3.8.3. Carga Orgânica Volumétrica**

A COV influencia toda a dinâmica do processo de digestão anaeróbica. Uma ótima carga orgânica volumétrica proporciona condições adequadas para o crescimento dos microrganismos e conseqüentemente maior estabilidade do processo. Baixas COVs podem representar baixa relação alimento/microrganismo, o que resulta em baixa atividade biológica. Elevadas COVs podem apresentar elevada relação alimento/microrganismo, podendo levar ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e falência do processo. A COV ideal é relacionada ao modelo de biodigestor, tecnologia aplicada e ao tipo de substrato (Do Amaral, Steinmetz, Kunz 2019).

### **2.3.8.4. Produtividade**

É um parâmetro extremamente importante para avaliar o desempenho de uma usina de biogás. A produtividade é expressa pela produção de gás em relação ao volume do biodigestor. Ela é definida pelo cociente entre a produção diária de gás e o volume do reator, indicando, portanto, a eficiência. A produtividade pode se referir tanto à produção de biogás quanto à produção de metano Rohstoff (2010).

### **2.3.8.5. Rendimento**

O rendimento expressa a produção de gás em relação à quantidade de substrato introduzida. O rendimento também pode se referir tanto à produção de biogás quanto à produção de metano. Ele é determinado pelo cociente entre o volume de gás produzido e a quantidade de matéria orgânica introduzida.

O valor do rendimento reflete a eficiência da produção de biogás e metano a partir do substrato utilizado. Como parâmetro isolado, porém, ele é pouco significativa, pois não agrega a carga efetiva do biodigestor. Por essa razão, os rendimentos sempre devem ser analisados juntamente com a carga orgânica volumétrica (Rohstoff, 2010).

### **2.3.8.6. Taxa de degradação**

A taxa de degradação é um parâmetro que tem também a sua importância no processo pós traduz a eficiência do aproveitamento do substrato. A taxa de degradação pode ser

determinada com base na matéria orgânica seca (MOS) ou na demanda química de oxigénio (DQO). Em virtude dos processos analíticos predominantes na prática, recomenda-se a determinação da taxa de degradação com base na MOS (Rohstoff, 2010).

## **2.4. Segurança operacional**

### **2.4.1. Proteção no trabalho e na usina**

Biogás é uma mistura gasosa composta de metano (50% - 75% em vol.), dióxido de carbono (20% - 50% em vol.), sulfeto de hidrogénio (0,01% - 0,4% em vol.) e outros gases. Em determinadas concentrações, o biogás se combina com o oxigénio do ar para formar uma atmosfera explosiva. Por essa razão, a construção e a operação de uma usina de biogás devem respeitar as normas de segurança relativas à proteção da usina. Também existem outros riscos tais como asfixia, intoxicação e danos provocados por agentes mecânicos (p.ex. esmagamento por elementos móveis). (Rohstoff, 2010). De acordo com o mesmo autor o administrador tem a obrigação de identificar os riscos inerentes à operação da usina de biogás, avaliá-los e tomar as medidas necessárias para sua eliminação a minimização.

### **2.4.2. Risco de intoxicação e asfixia**

O grau de pureza e a concentração de metano são os principais factores a serem considerados em termos de potencial calorífico do biogás, que varia entre 15 e 30 MJ Nm<sup>-3</sup> (Abatzoglou; Boivin, 2009). Dentre os principais contaminantes que afetam o potencial energético do biogás, destacam-se o sulfeto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e amónia (NH<sub>3</sub>). Dependendo da composição do substrato utilizado na biodigestão anaeróbica, o biogás bruto produzido poderá apresentar concentrações de H<sub>2</sub>S que variam entre 100 e 10.000 ppm (mg m<sup>-3</sup>) e, em casos extremos, até 30.000 ppm (Beil; Beyrich, 2013). O H<sub>2</sub>S é um gás que confere mau odor, além de ser corrosivo e tóxico (Hendrickson et al., 2004; Ni et al., 2000). Com relação à saúde humana e toxicidade, sabe-se que a exposição contínua à baixa concentração gasosa de H<sub>2</sub>S (15-50 ppm) resulta em irritação da mucosa no trato respiratório, podendo ocasionar dores

de cabeça, tonturas e náusea (MSDS, 1996). Concentrações elevadas entre 200 e 300 ppm resultam em parada respiratória; e exposições a concentrações acima de 700 ppm por mais de 30 minutos são fatais (MSDS, 1996).

#### **2.4.3. Risco de explosão e incêndio**

Na operação de usinas de biogás, deve-se considerar a hipótese da formação de misturas de gás e ar e do aumento do risco de incêndio, principalmente nas imediações dos biodigestores e gasómetros. As áreas da usinas de biogás devem ser devidamente sinalizadas com placas de alerta e nelas devem ser tomadas medidas de prevenção e segurança (Rohstoff, 2010). O biogás quando combinado com o oxigénio em determinadas concentrações, cria uma atmosfera explosiva. O metano é altamente explosivo em contacto com o ar atmosférico em concentrações correspondente a 6 – 15% (Gould e Haugen, 2012). O Metano é um gás difícil de detetar por ser incolor e inodoro. Por isso, é recomendável que a planta de biodigestor esteja em um lugar bem ventilado (Rohstoff, 2010).

#### **2.5. Biogás**

O biogás é um gás natural resultante da fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos como dejetos de animais, resíduos vegetais, lixo industrial ou residencial em condições adequadas (COLDEBELLA, 2006). É um combustível gasoso com alto potencial energético e pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica (SOUZA, 2004).

O biogás é constituído por uma mistura de gases, sendo que a fração de cada gás presente é determinada pelas características do resíduo e as condições de operação do processo de digestão, sendo basicamente composto por metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), apresentando um potencial em torno de 75% de metano. Em linhas gerais, a constituição típica do biogás é a seguinte:

**Tabela 6: Composição típica do biogás**

Componente	Concentração (% vol.)			
	(Ray, <i>et al.</i> , 2013)	(Vij, 2011)	(Seadi, <i>et al.</i> , 2008)	(Faria, 2012 ( <i>apud</i> Tietz <i>et al.</i> , 2013))
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	50 – 70	55 - 60	50-75	40 - 75
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	25 - 30	35 - 40	25-45	25 - 40
<b>Vapor de Água (H<sub>2</sub>O)</b>	0 – 5	2 - 7	2 (20°C) – 7 (40°C)	-
<b>Sulfureto de Hidrogénio (H<sub>2</sub>S)</b>	0 – 3	0,002 - 2	<1	0.1 – 0.5
<b>Amónia (NH<sub>3</sub>)</b>	0 – 0,5	0 – 0,05	<1	0.1 – 0.5
<b>Oxigénio (O<sub>2</sub>)</b>	0 – 3	0 – 2	<2	0.1 – 1
<b>Hidrogénio (H<sub>2</sub>)</b>	-	0 – 1	<1	1 - 3
<b>Nitrogénio (N<sub>2</sub>)</b>	0 -10	0 - 2	<2	0.5-2.5

Fonte: La Farge, 1979

### 2.5.1. Propriedades do Biogás

De acordo com o (COSTA, 2006) citado em (Zilotti, 2012), o potencial energético do biogás varia de acordo com a presença de metano em sua composição, ou seja, quanto maior for o teor de metano na mistura gasosa, mais rico é o biogás. O biogás apresenta menor poder calorífico em virtude do menor conteúdo de metano de acordo com o mesmo autor. A tabela abaixo ilustra as características gerais do biogás. Segundo (Vij 2011), o biogás apresenta algumas propriedades tais como:

- volume varia em função da temperatura e pressão;
- Poder calorífico varia em função da temperatura, pressão e o teor de vapor de água;
- Vapor de água varia em função da temperatura e pressão;

**Tabela 7: Características gerais de Biogás.**

Conteúdo Energético	6 a 6.5 kWh/m <sup>3</sup>
Combustível equivalente	0.6 a 0.65 l óleo/m <sup>3</sup> biogás
Limites explosivos	6 a 12% biogás no ar
Temperatura de Ignição	650 à 750°C
Pressão crítica	75 à 89 bar
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidade normal	1.2Kg/m <sup>3</sup>
Cheiro	Ovos estragados (podre)

Fonte: (Vij, 2011)

### **2.5.2. Utilização do biogás**

Na busca por fontes de energia elétrica alternativas ou renováveis, o biogás é uma opção. É fonte renovável pois não utiliza combustíveis fósseis. É alternativa pois foge do padrão de hidroelétricas e termoelétricas do Sistema Elétrico convencionais. Portanto, a sua produção é contínua no tempo, independentemente do aproveitamento para gerar energia elétrica ou para ser queimado, transformando quase a totalidade do metano em dióxido de carbono.

O biogás pode ser utilizado:

- Substituindo o gás de cozinha (GLP);
- Geração de energia elétrica, através de geradores acionados por motores ciclo Otto ou até mesmo turbinas;
- Para lucrar com os Créditos de Carbono, agredindo menos o meio ambiente, desde que se tenha um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aprovado e implantado.

### 2.5.3. Equivalências energéticas do biogás

O poder calorífico do biogás, varia de 5000 a 7000 kcal/m<sup>3</sup> devido à percentagem do metano. Essa variação é também devido à maior ou menor pureza. O biogás altamente purificado pode alcançar 12000 kcal/m<sup>3</sup>. (COLDEBELLA apud SGANZERLA, 1983).

Um metro cúbico de biogás equivale à:

- 0,613 litro de gasolina
- 0,579 litro de querosene
- 0,553 litro de Diesel
- 0,454 litro de gás de cozinha
- 1, 536 quilograma de lenha
- 0,790 litro de álcool hidratado
- 1,428 KW de eletricidade.

A utilização do biogás como fonte de energia se deve fundamentalmente ao metano, que quando puro e em condições normais de pressão (1 atm) e temperatura (0 °C), possui poder calorífico inferior (PCI) de 9,9 kWh/m<sup>3</sup>. O biogás com um teor de metano entre 50 e 80% terá um PCI entre 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup> (AGRENER, 2008).

Em termos práticos, pode-se considerar 1m<sup>3</sup> equivalente à 1,8 kW de potência, considerando 65% de gás metano na mistura. Esta é a equivalência que empresas fabricantes de grupos motores/geradores empregam (FOCKING; BRANCO MOTORES, 2009) (1,8 kW por m<sup>3</sup>).

### 2.5.4. Quantidade de dejetos para formar 1 m<sup>3</sup> de biogás

A produção do biogás, no âmbito do presente trabalho, fundamenta-se na decomposição da Matéria Orgânica (MO) proveniente dos dejetos suínos e bovinos tendo por destino um biodigestor, onde a mesma irá produzir CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Destes, o gás de interesse nesta pesquisa

é o metano (CH<sub>4</sub>). Para produzir 1m<sup>3</sup> de gás metano, é necessário, por exemplo (MESQUITA, 2009):

- 25 Kg de esterco de gado;
- 5 Kg de esterco de galinha;
- 25 Kg de plantas ou cascas de cereais;
- 20 Kg de lixo (aproximadamente);
- 12 Kg de esterco de suínos.

### 2.5.5. Tratamento e purificação de biogás

O grau de pureza e a concentração de metano são os principais factores a serem considerados em termos de potencial calorífico do biogás, que varia entre 15 e 30 MJ Nm<sup>-3</sup> (ABATZOGLOU, et al 2009). Dentre os principais contaminantes que afetam o potencial energético do biogás, destacam-se o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e amónia (NH<sub>3</sub>). Dependendo da composição do substrato utilizado na biodigestão anaeróbica, o biogás bruto produzido poderá apresentar concentrações de H<sub>2</sub>S que variam entre 100 e 10.000 ppm (mg m<sup>-3</sup>) e, em casos extremos, até 30.000 ppm (BEIL; et al, 2013).

O **H<sub>2</sub>S** é um gás que confere mau odor, além de ser corrosivo e tóxico (HENDRICKSON et al., 2004; Ni et al., 2000). Apesar de ser um gás inflamável que contribui no potencial energético do biogás, a presença do H<sub>2</sub>S causa corrosão nos tanques de armazenamento, tubulações metálicas e motores de combustão, e resulta na deterioração da infraestrutura de produção do biogás (GARCIA-ARRIAGA et al., 2010).

O **dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)** é um dos principais constituintes do biogás, correspondendo a um volume de 20 a 30% em substratos provenientes de resíduos da agricultura (WELLINGER et al., 2013). A presença do CO<sub>2</sub> interfere diretamente no potencial energético do biogás por ser inerte em termos de combustão e ocupar volume.

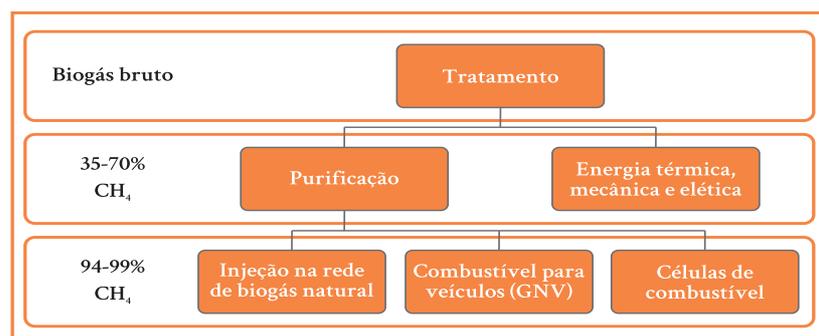
A **amónia (NH<sub>3</sub>)** também é outro contaminante bastante comum no biogás originado a partir de resíduos agrícolas e presente em concentrações que variam entre 50 a 100

mg.m<sup>-3</sup> (Wellinger et al., 2013). A amónia apresenta propriedades corrosivas e tóxicas. Durante os processos de combustão incompleta em motores, por exemplo, ocorre a liberação de óxidos de nitrogénio (NO<sub>x</sub>) para a atmosfera, os quais podem contribuir na formação de chuva ácida e resultar em problemas respiratórios (Latha; Badarinath, 2004). Segundo o mesmo autor, além da mistura de gases, o biogás também apresenta água (umidade) em sua composição, em concentrações médias de 6% quando a 40° C. Quando não removida do biogás, a água pode acumular nos dutos via processos de condensação, resultando em problemas de corrosão ou entupimento em caso de congelamento.

Neste contexto, é necessária a implantação de tecnologias de tratamento do biogás para a geração de um combustível de qualidade que possa ser eficientemente convertido em energia térmica, elétrica e mecânica. Atualmente, os processos de tratamento e Purificação do biogás têm como premissas:

1. Ajuste do valor calorífico e a remoção de contaminantes que afetam a qualidade do biogás e a vida útil dos componentes do sistema; e
2. A Purificação do biogás e a concentração do biometano para sua inserção em linhas de distribuição e transporte de biogás

**Figura 3: Etapas de tratamento e purificação do biogás para concentração do biometano de acordo com o seu uso final.**



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).

## **2.5.5.1. Processo de remoção dos contaminantes**

### **2.5.5.1.1. Remoção da água**

O biogás bruto obtido na saída do biodigestor apresenta-se saturado de umidade que deve ser efetivamente removida. Os métodos de remoção de água do biogás bruto geralmente permitem também a remoção simultânea de impurezas como o material particulado e a espuma (quando houver). A remoção da água é geralmente realizada na primeira etapa de filtragem do biogás para prevenir a corrosão de compressores e tubulações.

Dentre os métodos mais utilizados estão a separação física da água por condensação ou a secagem química. As principais técnicas de condensação utilizam separadores de ciclone; desembaçadores com tela de malha fina (porosidade de 0,5-2  $\mu\text{m}$ ); e tubulação contendo purgador para separar e eliminar o vapor condensado (NOVAK et al., 2016; Ryckebosch et al., 2011). O resfriamento da tubulação aprimora a condensação, sendo geralmente mais eficiente na remoção da umidade do biogás. Entretanto, existe o alto custo de implantação e manutenção desta prática, a qual se torna mais complexa com a instalação de resfriadores e tubulações associadas. A secagem química abrange o uso de reatores cilíndricos contendo no seu volume interno materiais absorventes como o trietileno glicol ou sais higroscópicos ou adsorventes como zeólitas, gel de sílica ou óxido de alumínio (NOVAK et al., 2016; RYCKEBOSCH et al., 2011).

A secagem química é uma técnica predominante, contudo, os materiais precisam ser trocados e regenerados frequentemente para a manutenção da eficiência de remoção da umidade do biogás. Durante a primeira etapa de tratamento para a remoção da umidade, também pode ocorrer remoção simultânea de partículas e hidrocarbonetos (RYCKEBOSCH et al., 2011). A tabela a baixo apresenta as vantagens e desvantagens dos sistemas convencionais para remoção da umidade presente no biogás.

**Tabela 8: Vantagens e desvantagens dos sistemas convencionais para remoção da umidade presente no biogás.**

<b>Processo</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Adsorção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sílica gel</li> <li>➤ Peneira molecular.</li> <li>➤ Alumina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ As matérias adsorventes podem ser regeneradas</li> <li>➤ Estes podem ser destinados a qualquer uso de biogás e com baixos custos operacionais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ As colunas de adsorção devem ser operadas em pressão de 6-10 bar;</li> <li>➤ Partículas e óleo devem ser removidas previamente</li> </ul>
<b>Absorção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Etileno glicol</li> <li>➤ Selexol</li> <li>➤ Sais higroscópicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Os materiais podem ser regenerados</li> <li>➤ Remoção simultânea de partículas e hidrocarbonetos</li> <li>➤ Não são compostos tóxicos</li> <li>➤ Eficiência de remoção alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Necessidade de temperaturas e pressões altas para regeneração da solução absorvedora</li> <li>➤ Precisa tratar volumes de gás elevados (&gt;500 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) para ser económico</li> </ul>
<b>Refrigeração</b>	Arrefecimento a 2°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Técnica mais eficiente na remoção da umidade do biogás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elevado consumo de energia para manter a refrigeração do sistema</li> </ul>
<b>Condensação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Desembacadores separados de ciclone</li> <li>➤ Sistemas de troca de calor</li> <li>➤ Tubulação com sistema de purga do vapor de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Podem ser aplicadas como pré-tratamento em todos os sistemas de geração de biogás</li> <li>➤ Redução de vapor de água em até 0,15% do volume inicial</li> <li>➤ Elimina partículas de hidrocarbonetos e óleo, tecnologia simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ As tubulações devem ser longas e instaladas com inclinação para permitir purga do vapor de água</li> <li>➤ Tubulações devem ser resistentes ao congelamento</li> </ul>

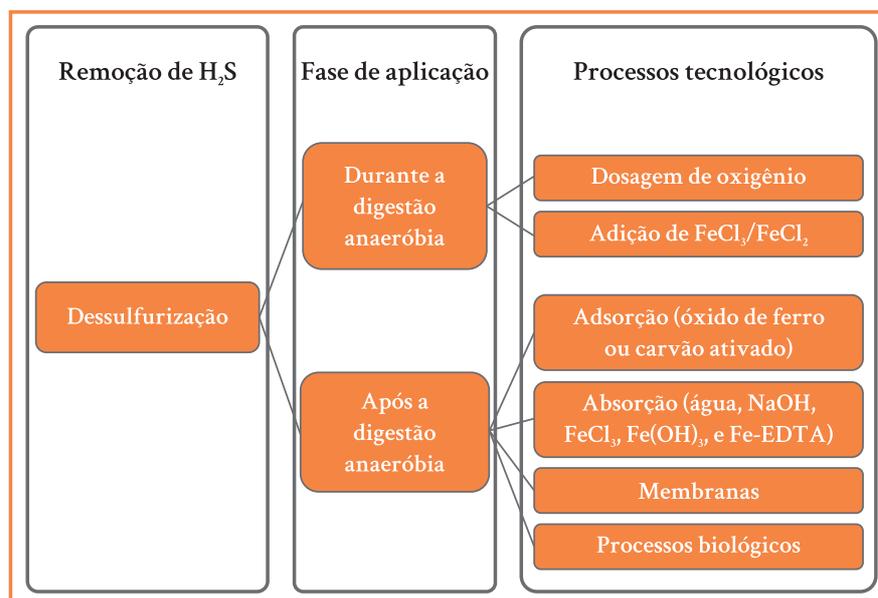
Fonte: Adaptado de Ryckebosch et al. (2011)

### 2.5.5.1.2. Remoção de H<sub>2</sub>S

A remoção do H<sub>2</sub>S pode ser realizada por processos biológicos, físicos ou químicos. O processo de dessulfurização está dividido em duas fases:

- Fase primária, que reduz os níveis de H<sub>2</sub>S a <500 ppm, podendo alcançar remoção eficiente de aproximadamente 100 ppm; e
- Fase de precisão, que ajusta as concentrações de H<sub>2</sub>S nas especificações e requisitos para injeção na rede de biogás natural. Neste caso, as concentrações de H<sub>2</sub>S são reduzidas a menos de 0,005 ppm. Além desta classificação, os métodos de dessulfurização podem ainda ser divididos em métodos internos ou externos, quando ocorrem dentro ou fora do biodigestor, respectivamente.

Figura 4: Processos tecnológicos mais comumente observados para a dessulfurização do biogás.



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011).

### 2.5.5.1.3. Remoção de H<sub>2</sub>S após o biodigestor

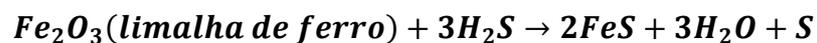
#### Processos de adsorção

Diversos materiais adsorventes como zeólitas sintéticas, carvão ativado, gel de sílica ou alumina são utilizados para remover H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O dentre outros compostos do biogás (Beil; Beyrich, 2013; Ryckebosch et al., 2011). Segundo a mesma fonte, os reatores contendo materiais adsorventes são instalados em série, na linha do biogás. Estes reatores na forma de colunas operam em etapas distintas, como: adsorção, despressurização, dessorção e pressurização. A adsorção dos contaminantes ocorre sob pressão (~800 kPa) e a dessorção ocorre pela despressurização do leito, permitindo a remoção dos contaminantes e a regeneração do adsorvente.

Embora a remoção de H<sub>2</sub>S possa ser realizada por este processo, a recomendação é que este seja removido previamente através de outros processos de purificação já mencionados anteriormente, pois a presença do H<sub>2</sub>S pode fazer com que a adsorção no material torne-se irreversível (RYCKEBOSCH et al., 2011). A presença de água no biogás também pode resultar em saturação rápida dos materiais adsorventes e, portanto, a remoção da água antes do processo de adsorção é recomendada. Durante a adsorção, gases como o O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> podem ser removidos, desde que o material adsorvente apresente seletividade a estes elementos e seja aplicado em condições específicas de pressão atmosférica (RYCKEBOSCH et al., 2011).

Os adsorventes mais comumente utilizados são o carvão ativado e o óxido de ferro (Abatzoglou and Boivin, 2009). Com relação ao carvão ativado, este pode ser impregnado com permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub>), iodeto de potássio (KI), carbonato de potássio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ou óxido de zinco (ZnO), os quais agem como catalisadores, resultando no aumento da velocidade de reação de oxidação do H<sub>2</sub>S (PETERSSON, 2013). O carvão ativado impregnado com sais metálicos de efeito catalisador apresenta uma maior capacidade de adsorção do H<sub>2</sub>S devido à combinação de microporosidade e propriedades oxidativas. Exemplos de óxidos metálicos também incluem Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu<sub>2</sub>O e MnO (WIHEEB et al., 2013).

Os processos de adsorção são extremamente eficientes na redução do H<sub>2</sub>S (< 5 ppm) e amplamente aplicados quando há a necessidade de alcançar baixos níveis de H<sub>2</sub>S no biogás, como é o caso de células a combustível e biometano (Beil; Beyrich, 2013). Uma das grandes desvantagens desta prática de filtragem está na acumulação de sulfeto férrico. Este é formado a partir da reação de oxidação do H<sub>2</sub>S com o ferro, e na presença de ar reage exotermicamente causando ignição instantânea e risco de explosão. Este é conhecido como um processo pirofórico. A equação química de formação do sulfeto férrico está demonstrada abaixo:



## 2.6. Uso do digestato como fertilizante

### Biofertilizante

Um dos maiores desafios para o desenvolvimento da indústria dos biodigestores é a necessidade da correta destinação do efluente dos biodigestores (digestato). Se, por um lado, existem tecnologias para tratamento do digestato, visando a remoção de nutrientes (nitrogénio e fósforo) e possibilitando o reuso da água residuária ou o seu lançamento em corpos hídricos receptores, por outro, o emprego destas tecnologias agrega custos que impactam na viabilidade económica destes empreendimentos (MIELE et al., 2015).

A reciclagem do digestato como fertilizante na agricultura afasta parte do custo agregado com a implantação e operação de sistemas de tratamento do digestato, porém aspectos relacionados à oferta de nutrientes via digestato, à demanda de nutrientes nas áreas agrícolas disponíveis para sua reciclagem e a logística de distribuição do fertilizante devem ser considerados nos projetos destes empreendimentos visto que também agregam custos e têm limitações de ordem técnica (MIELE et al., 2015).

### Caracterização do digestato como fertilizante

A qualidade do digestato e o seu potencial para uso agronómico depende de diversos fatores, a saber:

- Composição e variabilidade dos resíduos utilizados como substratos para a biodigestão (ex.: dejetos e carcaças de animais mortos, resíduos de agroindústrias, resíduos ou biomassa vegetal, entre outros);
- Tipo de biodigestor e tecnologia de biodigestão utilizada;
- Segregação e perdas de nutrientes nas estruturas de armazenamento dos substratos e do digestato;
- Eficiência dos sistemas pré-tratamento do substrato (ex.: separação de fases antes do biodigestor) e/ou do tratamento do digestato; e
- Diluição dos substratos e digestato com água.

### **Critérios para o uso agronómico do digestato**

A aplicação de fertilizantes ao solo, independente da fonte ter origem mineral ou orgânica, tem por objetivo suprir a demanda de nutrientes das culturas agrícolas a fim de que estas expressem o seu potencial produtivo. As plantas exploram o solo através do seu sistema radicular em busca por água e nutrientes que podem ter origem no próprio solo ou ser proveniente do fertilizante aplicado. Desta maneira, solos mais férteis demandam a aplicação de menores doses de fertilizantes do que solos que apresentam teores mais baixos de nutrientes disponíveis, visto que aqueles são capazes de suprir maiores quantidades de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Co, Ni e Zn) às plantas. De maneira geral, as recomendações de adubação têm por objetivo estabelecer as doses de maior eficiência técnica e económica de N, P e K para as diferentes culturas agrícolas (GATIBONI et al., 2016).

### **Valor nutricional**

Durante a decomposição da matéria orgânica num processo de biogás são liberados vários tipos de minerais. Nos biofertilizantes, os nutrientes (o nitrogénio (N), fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg)) estão no solo e há disponibilidade destes para as plantas de maneira direta, além de conter diferentes tipos de oligoelementos, também essenciais para o crescimento (GATIBONI et al., 2016).

O valor nutritivo do biofertilizante, ou seja, a concentração de diferentes produtos finais depende do substrato utilizado no processo de biogás e como este será executado. Uma

vantagem disso é que nesse biofertilizante há uma grande quantidade de amônio, o qual é absorvido diretamente pelas plantas.

Uma vez que todo o material orgânico é convertido em biogás durante o processo de digestão anaeróbia, no biofertilizante também terá certa quantidade de carbono orgânica e nitrogênio. Uma parte dessa fração se concentra no solo e, com o passar do tempo, por meio dele mais nutrientes serão liberados. A fração orgânica tem um efeito estimulador sobre a atividade biológica do solo, sendo favorável para as plantas. No entanto, os biofertilizantes podem ter ausência de fósforo (P), o qual poderá ser adicionado como suplemento, a fim de evitar sua deficiência.

### **Benefícios ambientais do uso do lodo como biofertilizante**

A dispersão dos resíduos orgânicos não tratados nos solos tem como resultado um maior risco de lixiviação dos nutrientes do solo e das águas subterrâneas, e vindo a poluir os recursos hídricos. Quando os dejetos passam por um tratamento anaeróbico, uma grande parte do nitrogênio ligado organicamente ao nitrogênio amoniacal é absorvido pelas plantas mais facilmente. A utilização do produto final (biofertilizante) após a digestão do dejetos reduz o risco de lixiviação do nitrogênio em terra agrícola.

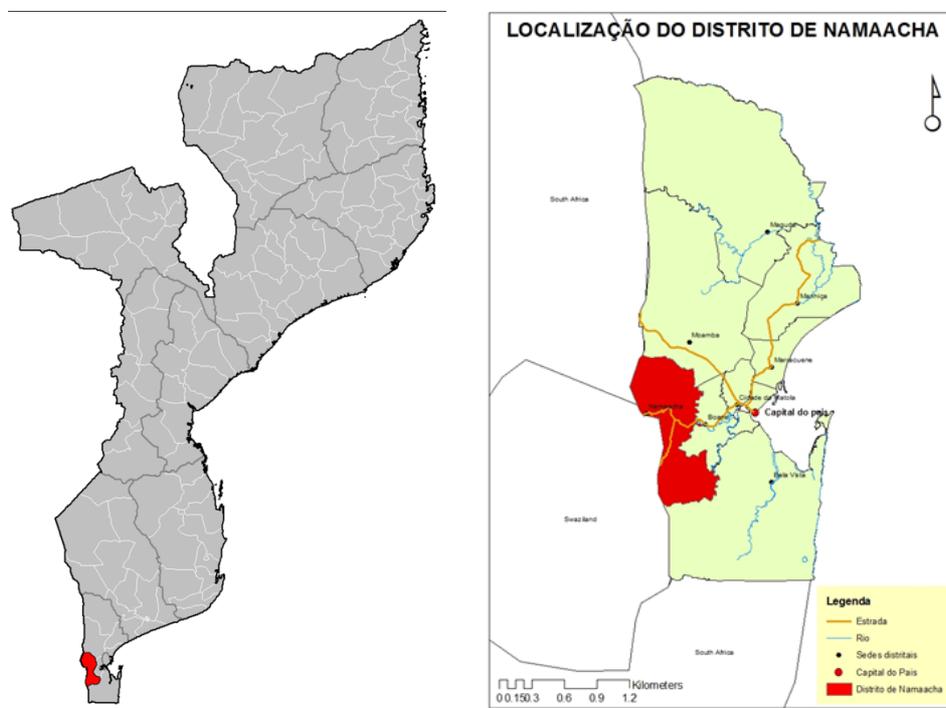
A digestão anaeróbica do dejetos também reduz o risco de emissões de gases do efeito estufa, aumentando as emissões de metano e de óxido nitroso, respectivamente, em aproximadamente 20 e 300 vezes mais que as emissões liberadas pelo dióxido de carbono. Isso se dá pelo fato de o dejetos conter grande quantidade de material orgânico durante o armazenamento que pode degradar-se em metano, a não ser que este gás seja armazenado sob condições controladas, como ocorre durante o processo de digestão.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Local de realização do trabalho

O biodigestor encontra-se instalado na quinta da dona Marisa situada na localidade de Mafuiane, distrito de Namaacha posto administrativo de Namaacha. O distrito de Namaacha tem limite, a norte com o distrito de Moamba, a oeste com a África do Sul e Essuatíni, a sul e sudeste com o distrito de Matutuíne e a leste com o distrito de Boane. De acordo com o censo 2017, o distrito de Namaacha tem 47.524 habitantes dos quais cerca de 70% é economicamente activa e se dedica a agricultura

**Figura 5: Localização do distrito de Namaacha**



Fonte: QGIS

#### 3.2. Materiais usados

##### 3.2.1. Substrato

Neste presente trabalho foram usados para alimentação do biodigestor os dejetos suínos e bovinos que são compostos por fezes, urina, água desperdiçada de bebedouros e de higienização, poeiras, resíduos de ração e outros materiais que surgem no decorrer da

criação. O substrato em causa foi fornecido por um criador de gado bovino e suíno da localidade de Mafuiane

**Figura 6: imagem de dejetos suínos e bovinos usados para alimentação do biodigestor.**



### 3.2.2. Equipamentos

Estão listados abaixo os equipamentos utilizados para a realização deste trabalho. Equipamentos estes que foram extremamente importantes para a realização das análises laboratoriais.

**Tabela 9: Equipamentos usados**

<b>Item</b>	<b>Nome</b>	<b>Função</b>
1	EPI's	Proteção individual
2	Termoreactor (COD Reactor RD 125)	Auxiliar na determinação de DQO
3	Medidor de DQO: DR1900 Portable Spectrophotometer	Medir o DQO.
4	Medidor de DBO: BOD – System BD 600	Medir o DBO.
5	Estufa e Mufla	Determinar ST e SVT, respectivamente.
6	Analizador de Biogás: Geotech GA5000 - Landfill Gas Analyser <sup>1</sup>	Analisar a composição do Biogás.
7	Balança analítica	Pesar as amostras

### 3.2.3. Reagentes

Os principais reagentes usados neste trabalho tiveram um papel extremamente importante para a determinação da demanda química de oxigênio e acerto do pH.

Tabela 10: Reagentes usados

Item	Reagente	Parâmetro
1	0.1N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Acido Sulfúrico)	DBO
2	Digestion solution for cod	DQO

### Configuração do reactor

A planta do biogás é constituída por uma estrutura de alvenaria onde no seu interior encontra-se instalado o biodigestor do tubular sem agitação com capacidade de 10  $m^3$  que tem no seu lado direito a caixa de alimentação (Afluente), na sua parte central encontra-se a camera de digestão e no lado da saída do efluente encontra-se instalada a caixa para a saída do digestato que por sua vez será usado como biofertilizante.

Figura 7: A esquerda temos o biodigestor antes da alimentação e a direita temos um biodigestor em seu pleno funcionamento.



### 3.3. Análises laboratoriais

As análises dos parâmetros foram realizadas no Laboratório de Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane.

Os principais parâmetros a serem estudados e analisados no presente trabalho e os métodos de determinação estão na tabela abaixo:

**Tabela 11: Método de determinação dos principais parâmetros em estudo**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Expresso</b>	<b>Unidades</b>
<b>DBO<sub>5 20</sub></b>	Respirométrico	O <sub>2</sub>	mg/l
<b>DQO</b>	Fotometria	O <sub>2</sub>	mg/l
<b>pH</b>	Potenciométrico	-	-
<b>Sólidos Totais</b>	Gravimétrico	Sólidos Totais	mg/l
<b>Sólidos Voláteis</b>	Gravimétrico	Sólidos Voláteis	mg/l

#### 3.3.1. Valor de Potencial hidrogeniónico (pH)

A medição deste parâmetro foi extremamente importante para análise do DBO, visto que para que amostra pudesse ser submetida a análise, esta devia estar com o pH neutro, daí que foi usado um multímetro ilustrado na figura abaixo para o acerto do pH. Este aparelho da marca Lovibond usado para o presente trabalho faz a medição de pH, Potencial Redox, sólidos dissolvidos totais e a temperatura. Procedeu-se com as medições. O eléctrodo de pH gera uma tensão e esta intensidade é convertida para uma escala de pH.

#### 3.3.2. Determinação da concentração de Sólidos Totais e sólidos voláteis

##### 3.3.2.1. Sólidos Totais

Na fase inicial fez-se a pesagem dos recipientes. Posteriormente foram transferidas para o interior dos recipientes as amostras e logo de seguida fez-se a pesagem na balança

analítica onde obteve-se os resultados ilustrados na tabela abaixo, feito o processo de pesagem, as amostras foram transferidas para estufa onde permaneceram por 6 horas a 110°C. Findo esse processo, retirou-se com o auxílio de uma pinça e deixou-se esfriar num dessecador por 30 minutos e pesou-se em seguida numa balança analítica com precisão de 0.1 mg.

**Figura 8: Balança analítica e Estufa**



**Tabela 12: Realização das análises sólidos totais**

<b>Cadinhos Vazios</b>	<b>Cadinhos com amostra</b>	<b>Peso da amostra</b>	<b>Estufa a 110°C</b>	<b>Mufla a 550°C</b>
<b>C<sub>1</sub> = 27,4305 g</b>	C <sub>1</sub> = 37,6440g	C <sub>1</sub> = 10,2135g	C <sub>1</sub> = 6,3807g	C <sub>1</sub> = 0,1918g
<b>C<sub>2</sub> = 28,0445 g</b>	C <sub>2</sub> = 37,9719g	C <sub>2</sub> = 9,9274g	C <sub>2</sub> = 4,4213g	C <sub>2</sub> = 0,0973g
<b>C<sub>3</sub> = 25,2334 g</b>	C <sub>3</sub> = 36,4508g	C <sub>3</sub> = 11,2174g	C <sub>3</sub> = 6,9487g	C <sub>3</sub> = 0,0736g

Para proceder com a determinação dos sólidos totais foi usada a equação abaixo

$$ST \left( \frac{mg}{l} \right) = \frac{(Ms - Mr) * 10^6}{Va}$$

Onde:

ST Sólidos Totais, em mg/l;

- Ms Massa da amostra seca a 110 °C, em g;  
Mr Massa de recipiente, em g;  
Va Volume da amostra, em ml;

### 3.3.2.2. Sólidos voláteis totais

Para determinar a concentração de sólidos voláteis, usou-se os materiais secos remanescentes de determinação de sólidos totais que foram transferidos para mufla a 550 °C onde permaneceram por 6 horas. E em seguida deixou-se resfriar em dessecador e por fim pesou-se numa balança analítica obtendo assim o peso de cinzas voláteis.

Figura 9: Imagem da mufla contendo as amostras.



Para calcular a concentração de sólidos voláteis totais foi usada a seguinte equação:

$$SVT \left( \frac{mg}{l} \right) = ST - \frac{(Mc - Mr) * 10^6}{Va}$$

Onde:

- SVT Sólidos Voláteis Totais, em mg/l;  
ST Sólidos Totais  
Mc Massa de cinza + massa do recipiente, em g;

Mr    Massa do recipiente, em g;

Va    Volume de amostra, em ml;

Para proceder com o calculo percentual dos sólidos foram usadas as seguintes equações:

$$\text{Sólidos totais (\%)} = \frac{(p_1 - p)}{p_0} \times 100\%$$

Onde:

$P_1$  = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

$P_0$  = Peso da amostra

$$\text{Sólidos voláteis (\%)} = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1 - P} \times 100\%$$

Onde:

$P_1$  = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

$P_2$  = Peso pós-mufia

$$\text{Sólidos fixos (\%)} = \frac{(P_2 - P)}{P_1 - P} \times 100\%$$

Onde:

$P_1$  = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

$P_2$  = Peso pós-mufia

E para o calculo dos sólidos totais fixos foi usada a seguinte equação

$$\text{STF} = \text{ST} - \text{STV}$$

### Determinação da Demanda Bioquímica de Oxigénio (DBO5 20)

A determinação de carência bioquímica de oxigénio foi baseada nos procedimentos apresentados no manual de instrução do equipamento: *BOD-System BD 600 Instruction Manual*. Inicialmente as amostras foram preparadas (e.g. ajuste do pH até alcançar a faixa de 6.5 a 7.5, filtração ou homogeneização). Em seguida, tomou-se uma quantidade de amostra de acordo com as especificações do instrumento e colocou-se uma amostra numa das garrafas de modo a analisar o DBO. Logo de seguida, a garrafa contendo a amostra junto com o seu equipamento foi colocada em uma incubadora a 20 °C como mostra a figura abaixo durante 5 dias.

Figura 10: Medidor de DBO e a incubadora.



### 3.3.3. Determinação da Demanda Química de Oxigénio (DQO)

A demanda química de oxigénio foi determinada com o auxílio de um instrumento de medição de DQO designado por Espectrofotómetro portátil DR1900. Para a determinação de DQO, procedeu-se de acordo com as especificações do manual de instrução do instrumento. Inicialmente preparou-se um branco usando água destilada e logo de seguida, introduziu-se num frasco contendo reagente CSB VARIO MR, 2ml de água destilada. Misturou-se o conteúdo invertendo várias vezes o frasco. Durante a mistura ocorreu uma reacção exotérmica. Logo de seguida, deixou-se digerir por 120 minutos no

termo reactor a 150 °C. Passados os 120 minutos removeu-se em seguida o frasco e deixou-se resfriar à temperatura ambiente por 30 minutos. Ultrapassado o processo de resfriamento, introduziu-se o frasco contendo a amostra na câmara do instrumento de modo a ser analisada e posteriormente fez-se a leitura do valor obtido.

**Figura 11: Imagens do frasco do reagente para análise do DQO, Termo reator e Espectrofotómetro portátil DR1900**



### **3.3.4. Composição do biogás**

A composição do biogás foi obtida com o auxílio do analisador do biogás Geotech GA5000 - Landfill Gas Analyser. O instrumento faz a leitura do teor de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e Oxigénio (O<sub>2</sub>) em volume. Para aferir a composição do biogás ligou-se o instrumento e deixou-se estabilizar por alguns segundos. Em seguida, zerou-se o instrumento de modo a obter resultados mais precisos. Posteriormente, o instrumento foi conectado ao biodigestor através da mangueira branca. A mangueira de cor amarela foi conectada ao instrumento de modo que sirva de tubo de exaustão. Uma vez conectadas a mangueira iniciou-se com o processo de análise e fez-se a leitura dos valores.

Figura 12: Analisador de biogás.



### Legenda

- A - conector entre computador e o analisador de biogás via usb;
- B – Entrada da mangueira branca (transparente) de amostra de gás. Usado também para medir a pressão estática;
- C – Entrada da mangueira azul de amostra para medir a diferença de pressão;
- D – Entrada de sonda de temperatura. Usando também para recarregar a bateria interna do analisador;
- E- Entrada da mangueira amarela para saída de gás no instrumento;
- F - Entrada de anemómetro;
- G – Acessório usado como tampa para proteger os pontos de ligação.

## 4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1. Concentração de Sólidos Totais e Sólidos Voláteis Totais

Os sólidos voláteis referem-se à fração orgânica que será volatizada dentro do biodigestor. Estão contidos nos sólidos totais os sólidos voláteis e fixos. Este é um dos parâmetros mais relevantes para estimar produção de biogás uma vez que, dependendo da fração de sólidos voláteis, a produção de biogás pode ser intensificada ou reduzida. Portanto, os teores de sólidos voláteis caracterizam a fração orgânica de material que será fermentado para produzir o biogás, ou seja, quanto maior for sua concentração na biomassa, maior será a produção de biogás, considerando a eficiência do biodigestor (EMBRAPA, 2002). A seguir, os valores encontrados na literatura para sólidos voláteis de acordo com a espécie animal:

Tendo feito as experiências, o autor De Barcelos chegou aos seguintes resultados:

**Tabela 13: Resultados das experiências feitas por De Barcelos**

Meios de Reação	Parâmetros				
	pH	DQO (g/kg)	Teor de Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis Totais (%)
MR – Esterco Bovino	7,5	448,0	81,6	18,3	81,8
MR – Esterco Suíno	7,3	507,5	81,1	18,8	81,2
MR – Rúmen Bovino	7,8	621,0	80,8	19,1	83,0
MR – Testemunha	8,3	523,5	84,4	15,5	83,6

Legenda:

MR – Meio de Reação

Autor: De Barcelos

De acordo com (ZANG et al., 2014), A percentagem de sólidos totais encontrada nos dejetos suínos foi de 20,38% estando de acordo com a literatura (13,6 - 29,6%). Quanto aos sólidos voláteis, a percentagem presente nos dejetos suínos foi de 68,15%, encontrando-se, também, de acordo com outros trabalhos publicados (53,19 - 78,3) (ZANG et al, 2015; ORRICO et al., 2015; COSTA; ORRICO; SUNADA, 2014).

LEITE e POVINELLI (1999) estudaram o comportamento dos sólidos totais e voláteis no processo de biodigestão anaeróbia com resíduos sólidos urbanos e industriais, encontrando uma variação de remoção dos sólidos voláteis de 43,8 a 47,7% (com variações devido à heterogeneidade dos resíduos).

MENDONÇA (2009), que estudou o tratamento anaeróbio de efluentes de bovinicultura de leite, encontrou remoções de sólidos voláteis de 30,2 a 86,3%, conforme variação do tempo de detenção hidráulica. AMARAL et al (2004) obteve redução de sólidos voláteis de 26,42 à 40,64%, com média de 34,29%.

A partir dos sólidos totais foi possível quantificar a concentração dos sólidos voláteis e avaliar o potencial que a mistura de dejetos suínos e bovinos apresentou para a produção de biogás.

Tabela 14: Resultados dos sólidos totais, voláteis e fixos.

<b>Amostras</b>	<b>Sólidos totais (%)</b>	<b>Sólidos voláteis totais (%)</b>	<b>Sólidos fixos (%)</b>
1	23,30	91,94	8,056
2	14,31	93,15	6,64
3	33,41	98,03	1,96

Dos resultados obtidos, verificou-se que as amostras analisadas apresentaram um teor de sólidos totais que estão dentro dos valores encontrados por outros autores na literatura e o mesmo registou-se na análise dos sólidos voláteis totais onde os valores estiveram entre 91,94 – 98,03 %, dando desta forma a indicação positiva do potencial de produção de biogás.

Sendo assim, mesmo tendo enfrentado algumas dificuldades em localizar na literatura, trabalhos que tenham estudado a mistura de substrato usado nesse trabalho, pode-se afirmar que os dejetos usados nesse estudo apresentaram uma remoção de sólidos voláteis que se encaixaram dentro da faixa de variação obtidas pelos autores supracitados.

## 4.2. Demanda química e bioquímica de oxigénio

A relação DQO/DBO é utilizada para obter conclusões sobre a biodegradabilidade dos despejos, valores muito elevados indicam provável insucesso, ou seja, a fração não biodegradável é alta, já que a fração biodegradável torna-se pequena prejudicando o tratamento biológico. Se essa relação for baixa a fração biodegradável é elevada, valor que indica a possibilidade da utilização de tratamento. Para efluentes, relações DQO/DBO menores que 2,5 indicam que os mesmos são facilmente biodegradáveis (JARDIM; CANELA, 2004).

No entanto, para o estudo feito nesse trabalho obteve-se os seguintes resultados:

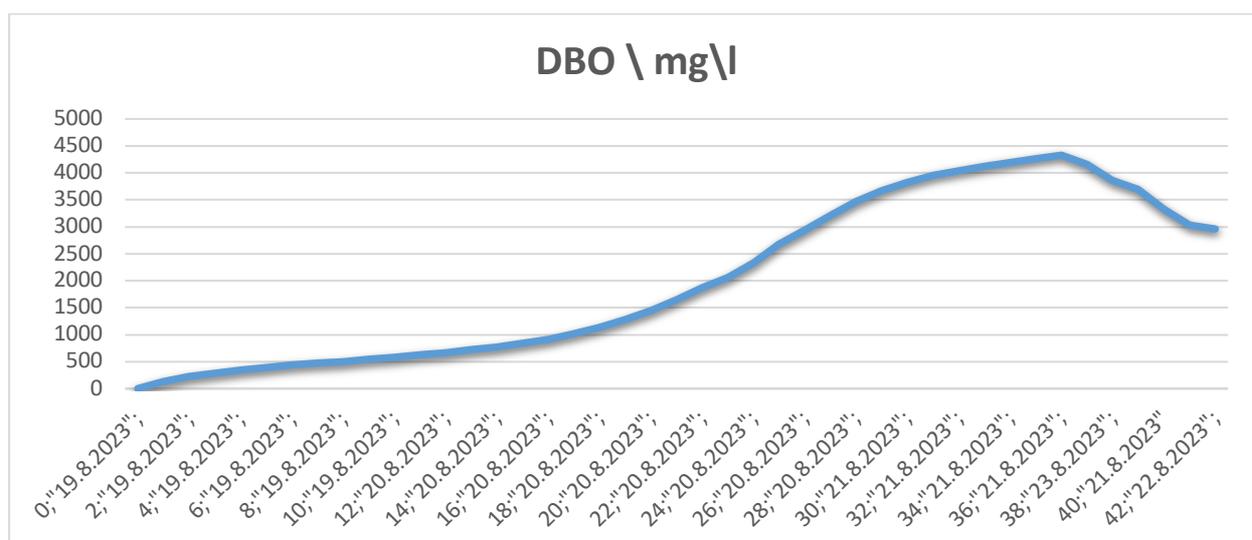
**Tabela 15: Resultados de DBO e DQO**

<b>Substrato</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	<b>DQO/DBO</b>
Esterco bovino e suíno	4328	9607	2,219

O autor Von Sperling (2014) considera que o dejetos é de alta biodegradabilidade quando a relação  $DQO/DBO_5$  está abaixo de 2,5 e é considerada intermedia de 2,5 – 4,0, isto é, a fração biodegradável não é elevada.

Entretanto, os dejetos em causa nesse trabalho tendo sido submetidos aos testes de DBO e DQO, chegou-se a conclusão que são altamente biodegradáveis por estarem abaixo de 2,5.

Figura 13: Resultados da análise de DBO.



#### 4.3. Composição do biogás

Tendo feito todas análises relativamente a composição do biogás, observou-se que a partir da 2ª semana o reactor já contia na sua composição de biogás quantidades de metano na ordem dos 50 - 60%, tendo alcançado quase 70% no final dessa mesma semana. Valores estes que apesar não ter encontrado na literatura trabalhos que tivesse sido uma mistura de dejetos suínos e bovinos não fogem do intervalo de valores encontrados por outros autores em outros tipos de substratos.

Experiência de (Kumar *et al.*, 2014) mostra que o teor de metano na mistura gasosa obtida de um biodigestor que opera usando resíduos orgânicos de cozinha foi em média 42,06%. Estudos similares como de (Agrahari e Tiwari, 2013) mostraram que o teor máximo de metano na mistura foi de 42 à 48%.

E na experiência feita por Collato e Langer (2012) foram obtidos os seguintes resultados:

**Tabela 16: Valores de conversão energética para alguns efluentes**

Origem do Material	Kg de esterco (dia.unidade geradora) <sup>-1</sup>	Kg de biogás Kg de esterco <sup>-1</sup>	Concentração de Metano
Suíno	2,25	0,062	66%
Bovinos	10	0,037	60%
Equinos	12	0,048	60%
Aves	0,18	0,055	60%
Abatedouro (Kg)	1	0,1	55%
Vinhoto (Kg)	1	0,018	60%

Fonte: Collato e Langer (2012)

Os dados supra apresentados só comprovam as potencialidades do substrato usado para a produção de biogás, tendo alcançado valores relativamente superiores aos encontrados na literatura. E pode se observar os valores alcançados na figura 14.

**Figura 14: Analisador de Biogás comprovando uma quantidade percentual superior a 70% de metano e o biogás produzido em combustão.**



## 4.4. Processo de remoção dos contaminantes

### 4.4.1. Remoção de H<sub>2</sub>S

O H<sub>2</sub>S é um gás que confere mau odor, além de ser corrosivo e tóxico (HENDRICKSON et al., 2004; Ni et al., 2000). Apesar de ser um gás inflamável que contribui no potencial energético do biogás, a presença do H<sub>2</sub>S causa corrosão nos tanques de armazenamento, tubulações metálicas e motores de combustão, e resulta na deterioração da infraestrutura de produção do biogás (GARCIA-ARRIAGA et al., 2010).

Foi na perspectiva de reduzir os problemas causados por este contaminante que se instalou ao lado biodigestor, um dessulfurizador para a remoção de H<sub>2</sub>S.

Figura 15: Dessulfurizador para a remoção de H<sub>2</sub>S.



### 4.4.2. Remoção da água

O biogás bruto obtido na saída do biodigestor apresenta-se saturado de umidade que deve ser efetivamente removida. Os métodos de remoção de água do biogás bruto geralmente permitem também a remoção simultânea de impurezas como o material particulado e a espuma (quando houver). A remoção da água é realizada para prevenir a corrosão de compressores e tubulações. Foi também instalado no trabalho realizado

um condensador para a remoção da água para poder evitar ou minimizar os malefícios que este elemento trás para todo o sistema de abastecimento do biogás.

**Figura 16: Imagem do condensador e dessulfurizador já instalados**



### **Vantagens e desvantagens do biogás**

As vantagens desse processo são:

- Fornecimento de combustível no meio rural mediante o biogás e adubo por intermédio do biofertilizante;
- Valorização dos dejetos para uso agronómico;
- Redução do poder poluente e do nível de patógenos;
- Exigência de menor tempo de utilização hidráulica e de área em comparação com outros sistemas anaeróbios e geração de créditos de carbonos.

### **Desvantagem**

As desvantagens são: processo de fermentação anaeróbia demorado que depende de bactérias metanogênicas cuja velocidade de crescimento é lenta.

### **Benefícios ambientais do uso do biogás**

Os créditos de carbono são certificados emitidos para um agente que reduziu a sua emissão de gases do efeito estufa (GEE) (PEREIRA, 2005).

Quando é despejados dejetos de origem animal em rios, lagos ou no meio ambiente, são liberados gases do efeito estufa para a atmosfera, como o dióxido de carbono. Uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) corresponde a um crédito de carbono. Utilizando a técnica de biodigestores o produtor estará contribuindo com o meio ambiente e ganhando créditos (crédito de carbono) dos quais podem ser negociados no mercado internacional, conforme o protocolo de Kyoto (PEREIRA, 2005).

Devido ao fato de não haver uma cadeia industrial internacional de biodigestores, o protocolo de Kyoto impulsionou a sua implantação a cerca de seis anos, o que possibilitou ao produtor a geração de créditos de carbono por intermédio da queima do biogás. A emissão mundial de CH<sub>4</sub>, originários da decomposição natural de dejetos suínos, chega a cerca de 1,3 milhões de toneladas de metano/ano, esses dejetos representam cerca de 50% das emissões/ano de CH<sub>4</sub>. Considerando-se apenas a digestão anaeróbica desses dejetos, a qual ocorre nos cursos d'água, lagos naturais ou artificiais, biodigestores ou lagoas de decantação, estas correspondem 58,2% do total, chegando a cerca de 10 milhões de toneladas anuais mundiais de metano. O Brasil, usando a mesma proporção a emissão do gás metano atingiria 792,5 mil toneladas/ano (IBGE, 2006).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

Diante da necessidade de obtenção e aperfeiçoamento de tecnologias económicas e ambientalmente sustentáveis para a geração de energia, a utilização de biodigestores para a produção de biogás como combustível representa um potencial expressivo nesse cenário, devido ao elevado poder calorífico do gás produzido e aos seus benefícios ambientais. O processo anaeróbio de produção do biogás com utilização de matéria orgânica como matéria-prima, requer condições específicas por se tratar de um sistema microbiológico, contudo, mantidas as condições operacionais otimizadas, este constitui um processo eficiente, conforme verifica - se nos estudos já realizados. E neste presente trabalho foram feitas análises laboratoriais dos parâmetros operacionais com objectivo de garantir que todos estivessem em conformidade para o pleno funcionamento do biodigestor estudado.

Os parâmetros analisados neste trabalho comprovaram um elevado potencial para a produção de biogás a partir da decomposição de dejetos suínos e bovinos. De acordo com as análises feitas a nível laboratorial, os sólidos totais resultarão num valor em torno de 23,30% e os sólidos voláteis resultarão em valores em torno de 91,94% respetivamente, valores que se encaixam nas condições mínimas para a produção do biogás e também estão relativamente próximos dos valores encontrados por outros autores que estudaram temas similares a este trabalho.

No que diz respeito ao potencial de produção de biogás também se comprovou uma elevada capacidade de geração do gás tendo sido alcançado valores superiores as 70% de quantidade do metano, elevando assim o poder calorífico do biogás produzido.

Tendo em conta os danos ambientais causados pela emissão directa do metano, os biodigestores aparecem como solução para mitigar ou minimizar os danos causados por este gás que causa 21 vezes mais danos em relação as CO<sub>2</sub> nos gases de GEE.

## 5.2. Recomendações

Monitorar a composição e a produção de biogás nos diferentes sistemas de criação de modo a trazer mais alternativas para a produção de biogás. Ao mesmo tempo, fazer o monitoramento físico-químico do afluente e do efluente do biodigestor, principalmente em relação à demanda química e bioquímica do oxigênio e aos sólidos voláteis, por serem os parâmetros chaves na determinação do potencial da produção de biogás.

Monitorar o processo de alimentação do biodigestor de modo a garantir que nenhum elemento estranho seja introduzido interior do mesmo porque observa-se que em casos de inserção de materiais inertes, estes irão se depositar no fundo do biodigestor causando o assoreamento e reduzindo o potencial produtivo do biodigestor.

Aprimorar as tecnologias de purificação do biogás, removendo com eficiência os contaminantes como Água,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc. de modo a torna-lo comercialmente atrativo e viável para a sua introdução em linhas de abastecimento tanto do gás para diversos fins.

Valorizar a produção de biogás como alternativa energética e como energia renovável, divulgando a sua importância e seus benefícios, e ao mercado em geral, e às indústrias de equipamentos, em particular, de modo a entenderem a importância da fabricação de equipamentos de medição de biogás precisos e de baixo custo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABATZOGLOU, N.; BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009.
2. ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Lei no 9.427. Brasília, DF, 1996.
3. ANGELIDAKI, I., ELLEGAARD, L., AHRING, B. A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas. *Biotechnol. Bioeng.* 63 (3), 1999
4. BEIL, M.; BEYRICH, W. Biogas upgrading to biomethane. In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) **The biogas handbook: science, production and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 342–377.
5. BEUX, S. **Avaliação do tratamento de efluentes de abatedouro em biodigestores anaeróbicos de duas fases**. 2005. 99p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos, Universidade de Ponta Grossa – UEPG/PR, Ponta Grossa, 2005.
6. BITTENCOURT, Claudia; PAULA, Maria A. S. de. Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos. 1 ed. São
7. Bolzonella, David. 2011. Monitoring Parameters In Anaerobic Digestion Processes. University of Verona. Department of Biotechnology. Verona.
8. Bolzonella, David. 2011. Monitoring Parameters In Anaerobic Digestion Processes. University of Verona. Department of Biotechnology. Verona.
9. CHANDRA, R; TAKEUCHI, H; HASEGAWA, T. Methane prodction from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in contexto to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 3, p.1462-1476, 2012.
10. COLATTO, L; LANGER, M. Unoesc & Ciência – ACET, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119- 128, jul./dez. 2011
11. DE BARCELOS beatriz rodrigues. dissertação de mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos universidade de brasília faculdade de tecnologia. Brasília 2009
12. DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resour- ces: an introduction**. Wiley-VCH, 2011.

13. GARCIA-ARRIAGA, V.; ALVAREZ-RAMIREZ, J.; AMAYA, M.; SOSA, E. H<sub>2</sub>S and O<sub>2</sub> influence on the corrosion of carbon steel immersed in a solution containing 3M diethanolamine. **Corrosion Science**, v. 52, p. 2268–2279, 2010.
14. HENDRICKSON, R. G.; CHANG, A.; HAMILTON, R. J. Co-Worker fatalities from hydrogen sulfide. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 45, p. 346–350, 2004. DOI: 10.1002/ajim.10355.
15. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
16. JARDIM, W.F.; CANELA, M.C. Caderno temático volume 1: fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes remediação de solos. Campinas, 2004. Disponível em: < <http://lqa.iqm.unicamp.br/cadernos/caderno1.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2023
17. Labatut, Rodrigo A. E Gooch, C. A. 2012. Monitoring of Anaerobic Digestion Process To Optimize Performance And Prevent System Failure. Cornell University. Department of Biological and Environmental Engineering. Ithaca, New York.
18. LOUZADA, A. G. Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + BFs. 2006. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro tecnológico, Vitória, 2006.
19. MATA-ALVAREZ e CECCHI, 1990; GRIFFIN *et al.*, 1998; ANGELIDAKI *et al.*, 1999; CHANDRA *et al.*, 2012 potencial de produção de biogás a partir de resíduos lignocelulósicos
20. MATA-ALVAREZ, J., CECCHI, F. A review of kinetic models applied to the anaerobic biodegradation of complex organic matter. Kinetics of the biomethanization of organic fractions of municipal solid waste. In: Kamely, D., Chackrobordy, A., Ommen., G.S. (Ed.), *Biotechnology and Biodegradation*. Portfolio Publ. Comp., pp. 27-54. 1990.
21. MAZZUCCHI, O. A. J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980. 29p.
22. MEYSTRE, J. A. Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
23. MSDS. **Material Safety Data Sheet for Hydrogen Sulfide**. New Jersey, 1996.
24. OSTREM, KARENA E THEMELIS, NICKOLAS J. 2004. Greening Waste: Anaerobic Digestion For Treating The Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. Submitted in partial fulfillment of requirements for M.S. thesis in Earth Resources Engineering. Columbia University. Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia.
25. PEREIRA M. L. Biodigestores: opção tecnológica para a redução dos impactos ambientais na suinocultura. São Paulo, SP, 2005

26. RICARDO, AIRTON KUNZ. TEINMETZ, LUIS RADIS S. DO AMARAL, ANDRÉ CESTONARO. 2019. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.
27. Seadi, Teodorita Al; Rutz, Dominik; Prassl, Heinz; Kottner, Michael; Finsterwalder, Tobias; Volk, Silke; Janssen, Rainer. 2008. Biogas handbook. University of Southern Denmark Esbjerg. Denmark.
28. YADVIKA; Santosh; Sreekrishnan T.R.; Kohli, S. & Rana, V. (2004) Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review, *Bioresource Technology* 95: 1–10
29. ZUPANCIC, GREGOR D. E GRILC, VIKTOR. 2012. Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste. [Ed.] Dr. Sunil Kumar. *Management of Organic Waste*.
30. Zupancic, Gregor D. e Grilc, Viktor. 2012. Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste. [Ed.] Dr. Sunil Kumar. *Management of Organic Waste*.

# ANEXOS

**Tabela:** Realização das análises sólidos totais

<b>Cadinhos Vazios</b>	<b>Cadinhos com amostra</b>	<b>Peso da amostra</b>	<b>Estufa a 110°C</b>	<b>Mufla a 550°C</b>
<b>C<sub>1</sub> = 27,4305 g</b>	C <sub>1</sub> = 37,6440g	C <sub>1</sub> = 10,2135g	C <sub>1</sub> = 29,8112g	C <sub>1</sub> = 27,6223g
<b>C<sub>2</sub> = 28,0445 g</b>	C <sub>2</sub> = 37,9719g	C <sub>2</sub> = 9,9274g	C <sub>2</sub> = 29,4658g	C <sub>2</sub> = 28,1418g
<b>C<sub>3</sub> = 25,2334 g</b>	C <sub>3</sub> = 36,4508g	C <sub>3</sub> = 11,2174g	C <sub>3</sub> = 28,9821g	C <sub>3</sub> = 25,3070g

**Tabela:** Dados da análise dos sólidos sem o peso dos cadinhos

<b>Cadinhos Vazios</b>	<b>Cadinhos com amostra</b>	<b>Peso da amostra</b>	<b>Estufa a 110°C</b>	<b>Mufla a 550°C</b>
<b>C<sub>1</sub> = 27,4305 g</b>	C <sub>1</sub> = 37,6440g	C <sub>1</sub> = 10,2135g	C <sub>1</sub> = 2,3807g	C <sub>1</sub> = 0,1918g
<b>C<sub>2</sub> = 28,0445 g</b>	C <sub>2</sub> = 37,9719g	C <sub>2</sub> = 9,9274g	C <sub>2</sub> = 1,4213g	C <sub>2</sub> = 0,0973g
<b>C<sub>3</sub> = 25,2334 g</b>	C <sub>3</sub> = 36,4508g	C <sub>3</sub> = 11,2174g	C <sub>3</sub> = 3,9487g	C <sub>3</sub> = 0,0736g

### **Cálculos demonstrativos dos valores percentuais dos sólidos totais, voláteis e fixos**

Para proceder com o cálculo percentual dos sólidos foram usadas as seguintes equações:

$$\text{Sólidos totais (\%)} = \frac{(P_1 - P)}{P_0} \times 100\%$$

Onde:

P<sub>1</sub> = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

P<sub>0</sub> = Peso da amostra

$$\text{Sólidos totais (\%)} = \frac{(29,8112-27,4305)}{10,2135} \times 100\% = 23,30 \%$$

$$\text{Sólidos voláteis (\%)} = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1 - P} \times 100\%$$

Onde:

$P_1$  = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

$P_2$  = Peso pós-mufla

$$\text{Sólidos voláteis (\%)} = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1 - P} \times 100\% = \frac{(29,8112-27,6223)}{29,8112-27,4305} \times 100\% = \frac{2,1889}{2,3807} \times 100\% = 91,94\%$$

$$\text{Sólidos fixos (\%)} = \frac{(P_2 - P)}{P_1 - P} \times 100\% = \frac{(27,6223-27,4305)}{29,8112-27,4305} \times 100\% = 8,056\%$$

Onde:

$P_1$  = Peso pós-estufa

P = Peso do cadinho vazio

$P_2$  = Peso pós-mufla

### Detalhes das medições de DBO

ID da cabeça: "2015-11-00046"

Nome : "Mácio Pelembe"

Medição concluída: "Sim"

Autostart: "Sim"

Gama de medição: "0-4000 mg/l"

Volume amostra/ATH: "21

7 ml/1 gts. ";;;"

Duração da medição: "5 dias"

### Evolução da medição: "42/42";

Medição	Data	Hora	CBO (mg/l)
0	19.8.2023	12:51:15	0
1	19.8.2023	13:51:15	130

2	19.8.2023	14:51:15	222
3	19.8.2023	15:51:15	284
4	19.8.2023	16:51:15	348
5	19.8.2023	17:51:15	391
6	19.8.2023	18:51:15	437
7	19.8.2023	19:51:15	473
8	19.8.2023	20:51:15	500
9	19.8.2023	21:51:15	545
10	19.8.2023	22:51:15	580
11	19.8.2023	23:51:15	622
12	20.8.2023	0:51:15	660
13	20.8.2023	1:51:15	717
14	20.8.2023	2:51:15	767
15	20.8.2023	3:51:15	835
16	20.8.2023	4:51:15	916
17	20.8.2023	5:51:15	1020
18	20.8.2023	6:51:15	1135
19	20.8.2023	7:51:15	1273
20	20.8.2023	8:51:15	1440
21	20.8.2023	9:51:15	1651
22	20.8.2023	10:51:15	1876
23	20.8.2023	11:51:15	2060
24	20.8.2023	12:51:15	2331
25	20.8.2023	14:51:15	2677
26	20.8.2023	16:51:15	2936
27	20.8.2023	18:51:15	3211"
28	20.8.2023	20:51:15	3470
29	20.8.2023	22:51:15	3665
30	21.8.2023	0:51:15	3830
31	21.8.2023	2:51:15	3949
32	21.8.2023	4:51:15	4039
33	21.8.2023	6:51:15	4121
34	21.8.2023	8:51:15	4187
35	21.8.2023	10:51:15	4260
36	21.8.2023	12:51:15	4328
37	22.8.2023	21:1:7	4158
38	23.8.2023	12:51:15	3858
39	24.8.2023	12:51:15	3698
40	21.8.2023	10:51:15	3325
41	21.8.2023	12:51:15	3032
42	22.8.2023	21:1:7	2955



**Processo de alimentação do biodigestor**



**Preparação e mistura do substrato**



**Demonstração do potencial do biogás entrando combustão**



**Ilustração do balão no seu limite máximo de armazenamento**



**Demonstração do potencial do biogás entrando combustão**

