



FACULDADE DE ENGENHARIA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA
TRABALHO DE LICENCIATURA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE BIOGÁS COM VISTA NA PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉCTRICA PARA ALIMENTAR UMA ÁREA EM
KATEMBE**

Autor:

Augusto Belmiro Nhantumbo Júnior

Supervisor:

Eng.º José Manuel Chissico

Maputo, Novembro de 2025



FACULDADE DE ENGENHARIA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA
TRABALHO DE LICENCIATURA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE BIOGÁS COM VISTA NA PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉCTRICA PARA ALIMENTAR UMA ÁREA EM
KATEMBE**

Autor:

Augusto Belmiro Nhantumbo Júnior

Supervisor:

Eng.º José Manuel Chissico

Maputo, Novembro de 2025

Augusto Belmiro Nhantumbo Júnior

**Estudo de Viabilidade de Implementação de um Sistema de
Biogás com Vista na Produção de Energia Eléctrica para Alimentar
uma Área em Katembe**

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado ao Departamento de
Engenharia Electrotécnica, da
Faculdade de Engenharia, da
Universidade Eduardo Mondlane
(UEM) - Maputo, como requisito para a
obtenção do grau de Licenciatura em
Engenharia Eléctrica.

DEDICATÓRIA

Dedico este relatório de Trabalho de Licenciatura, com todo o carinho e gratidão, ao meu pai, **Augusto Nhantumbo**, que sempre foi um exemplo de força, dedicação e perseverança. O seu apoio constante e a sua orientação ao longo da minha vida deram-me a coragem necessária para enfrentar cada desafio desta caminhada académica.

Dedico também, de forma especial e eterna, à memória da minha querida mãe, **Sônia Limeme**, que já não está fisicamente presente, mas cujo amor, sacrifício e ensinamentos permanecem vivos em mim. Este trabalho é igualmente fruto do seu esforço e das sementes de valores que plantou no meu coração.

Este é, acima de tudo, um tributo à minha família, que com amor e dedicação me deu a base sólida para alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e saúde que me permitiram chegar até aqui. Sem a Sua presença em minha vida, nada disso teria sido possível. Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Augusto Nhantumbo e Sônia Limeme, por todo amor, apoio e ensinamentos que moldaram quem sou hoje. Aos meus irmãos, agradeço por estarem sempre ao meu lado, pelo suporte incondicional e por me motivarem nos momentos mais desafiadores.

Ao meu supervisor, Engenheiro José Chissico, agradeço imensamente pela paciência, orientação e disponibilidade ao longo de todo este percurso. Sua dedicação foi essencial para que eu pudesse atingir os objectivos propostos.

Aos meus queridos amigos, deixo meu reconhecimento pelos conselhos, pelas palavras de motivação e por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis. Aos meus colegas de turma, desde o início da faculdade, agradeço pela parceria, troca de conhecimentos e apoio mútuo, que fizeram dessa jornada algo memorável.

À todos que talvez não tenha citado que de forma directa ou indirecta contribuíram na minha caminhada,

Muito Obrigado!

RESUMO

O presente trabalho propõe o estudo da viabilidade de implementação de um sistema de biogás para a geração de Energia Eléctrica destinado a atender uma área localizada em Katembe, utilizando resíduos alimentares de mercados locais e esterco bovino como matéria-prima. A ideia nasceu da necessidade de enfrentar os desafios energéticos da região, marcada por limitações na distribuição de energia e alto uso de fontes não renováveis, como geradores a diesel, que são prejudiciais ao meio ambiente.

A abordagem se baseia na utilização de resíduos alimentares provenientes dos mercados Zimpeto e Malanga, além de esterco bovino, como substratos principais. Foi projectado um sistema de colecta que assegura a entrega constante de matéria-prima ao biodigestor de lagoa coberta, seleccionado pela sua capacidade de atender ao volume diário estimado de 4.821,67 Nm³ de biogás. Este biogás será convertido em aproximadamente 7.149,7 kWh de energia eléctrica por dia, utilizando o motor de combustão interna Caterpillar CG132B-8, eficiente para operações contínuas em sistemas de geração distribuída. Em termos económicos, o projecto considerou o custo de instalação e operação, estimado em valores competitivos para sistemas deste porte, e demonstrou um potencial atractivo de retorno sobre o investimento. A venda de energia eléctrica para a EDM ajuda a amortizar custos ao longo do tempo.

As avaliações socioeconómica e ambiental mostraram múltiplos benefícios, incluindo geração de empregos, redução de custos com energia, alívio na rede eléctrica da EDM, melhor gestão de resíduos e redução de emissões de gases de efeito de estufa. Esses resultados confirmam que o projecto não só é viável como também sustentável, podendo servir de modelo para iniciativas semelhantes em outras regiões.

Palavras – Chaves: Biogás, Katembe, Energia renovável, Resíduos orgânicos, Socioeconómico, Ambiental, Eficiência energética.

ABSTRACT

This paper proposes a feasibility study for the implementation of a biogas system to generate electrical energy for an area located in Katembe. The system utilizes food waste from local markets and cattle manure as raw materials. The idea emerged from the need to address the region's energy challenges, characterized by limitations in energy distribution and a high reliance on non-renewable sources, such as diesel generators, which are costly and environmentally harmful.

The approach relies on food waste from the Zimpeto and Malanga markets, as well as cattle manure, as primary substrates. A collection and processing system was designed to ensure a constant supply of raw materials to the covered lagoon biodigester, chosen for its capacity to handle the estimated daily volume of 4,821.67 Nm³ of biogas. This biogas will be converted into approximately 7.149,7 kWh of electricity per day using the Caterpillar CG132B-12 internal combustion engine, which is efficient for continuous operations in distributed generation systems.

From an economic perspective, the project considered installation and operational costs, which are competitive for systems of this scale, and demonstrated an attractive return on investment potential. The sale of electricity to EDM I helps offset costs over time.

Socioeconomic and environmental assessments revealed multiple benefits, including job creation, reduced energy costs, relief for EDM's electrical grid, improved waste management, and lower greenhouse gas emissions. These findings confirm that the project is not only viable but also sustainable, serving as a model for similar initiatives in other regions.

Keywords: Biogas, Katembe, Renewable energy, Organic waste, Socioeconomic, Environmental, Energy efficiency.

Índice

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Formulação do Problema	2
1.2. Justificativa	2
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Geral	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Metodologia.....	3
1.5. Pergunta de Pesquisa	4
CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA	5
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Biomassa como Fonte de Energia	5
2.1.1. Definição e Principais Tipos	5
2.2. Produção de Biogás	8
2.2.1. O Biogás	8
2.2.2. Digestão Anaeróbia.....	10
2.2.3. Condições Ambientais e Operacionais.....	13
2.3. Substratos para a Produção do Biogás	16
2.3.1. Os Resíduos e suas Classificações	16
2.3.2. Matéria Seca e Conteúdo Orgânico	17
2.4. Colecta e Triagem da Biomassa	17
2.4.1. O Plano de Gerenciamento de Resíduos	18
2.5. Biodigestores e Purificação do Biogás	19
2.5.1. Biodigestores	19
2.5.2. Purificação e Tratamento do Biogás.....	21
2.6. Tecnologias de Conversão de Energia	27
2.6.1. Motor de Combustão Interna Ciclo Otto	27

CAPÍTULO III: MATERIAIS E METODOLOGIAS DE TRABALHO	30
3. MATERIAIS E METODOLOGIAS DE TRABALHO	30
3.1. Localização geográfica da área em estudo	30
3.1.1. Distrito Municipal Katembe	30
3.2. A Biomassa	31
3.2.1. Caracterização das Fontes de Biomassa	31
3.2.2. Classificação das Fontes de Biomassa	36
3.2.3. A Estratégia de Seleção e mistura de substratos	36
3.3. Parâmetros Operacionais do Biodigestor Lagoa Coberta	37
3.3.1. Tempo de Detenção Hidráulica	37
3.3.2. Carga Orgânica Volumétrica (COV)	38
3.3.3. Taxa de Produção de Biogás (<i>Gas Production Rate – GPR</i>)	38
3.3.4. Volume do Biodigestor	39
3.3.5. Cálculo da caixa de entrada e saída	41
3.3.6. Alimentação do Biodigestor	41
3.3.7. Estimativa do potencial energético do biogás produzido	41
CAPÍTULO IV: CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO	43
4. CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO	43
4.1. Geração de Resíduos Alimentares	43
4.1.1. Mercado Grossista do Zimpeto	43
4.1.2. Mercado Malanga	43
4.1.3. Resíduos Totais Disponíveis	44
4.2. Geração de Estercos Bovinos	44
4.3. A Colecta e a Triagem	45
4.3.1. Colecta e Triagem dos Resíduos Alimentares	45
4.3.2. Colecta e Triagem dos Estercos Bovinos	47
4.4. Dimensionamento do Biodigestor	49
4.4.1. Volume diário ocupado pela mistura	49
4.4.2. Volume do Biodigestor	50

4.5.	Dimensionamento da caixa de entrada e de saída	51
4.6.	Potencial de Geração do metano e Potencial Energético gerado	52
4.7.	Estimativa de Geração de Energia Eléctrica	52
4.8.	Dimensionamento e Selecção do Grupo Gerador	53
4.8.1.	O Dimensionamento	53
4.8.2.	Selecção do Grupo Gerador.....	56
4.9.	Processo de Limpeza do Biogás	57
4.9.1.	Secagem por Condensação (Compressão e Resfriamento).....	57
4.9.2.	Dessulfurização do Biogás por Absorção Química com Fe/EDTA.....	58
CAPÍTULO V: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		64
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
5.1.	Potencial Energético do Biogás e Combustíveis Fósseis.....	64
5.2.	Estimativa da área ocupacional.....	66
5.2.1.	Cálculo aproximado do Espaço a ocupar	66
5.3.	Avaliação Socioeconômica e Ambiental.....	66
5.3.1.	Análise Socioeconômica	66
5.3.2.	Análise Ambiental	69
5.4.	Análise Financeira.....	70
5.4.1.	Valor de Implementação do Sistema e Suas Implicações	71
5.4.2.	Análise das Potenciais Receitas do Sistema.....	71
5.4.3.	Estudo da Viabilidade Econômica	72
CAPÍTULO VI: CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		74
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
6.1.	Limitações	74
6.2.	Conclusão	75
6.3.	Recomendações	76
6.4.	Referências Bibliográficas.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>CH₄</i>	Metano
<i>C₂H₆</i>	Etano
<i>C₃H₈</i>	Propano
<i>C₄H₁₀</i>	Butano
<i>C₅H₁₂</i>	Pentano
<i>CO₂</i>	Gás Carbônico
<i>H₂</i>	Hidrogênio
<i>H₂S</i>	Gás Sulfídrico
<i>N₂</i>	Nitrogênio
<i>NH₃</i>	Amônia
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>Fe/EDTA</i>	Ferro/ Ácido etilenodiaminotetraacético

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Processos de conversão energética da biomassa.....	6
Figura 2-2: Atlas do Potencial de Biomassa em Moçambique	7
Figura 2-3: Processo de desenvolvimento da digestão anaeróbia.....	13
Figura 2-4: O Plano de Gerenciamento de Resíduos	18
Figura 2-5:Esquema da visão interna do reator modelo lagoa coberta	20
Figura 2-6: Esquema de um reator de fluxo pistonado	20
Figura 2-7:Uso do biogás e biometano	21
Figura 2-8: Tratamento do biogás conforme o seu uso final	22
Figura 2-9:Diagrama dos princípios utilizados pra remoção de H₂S do biogás ..	26
Figura 2-10: Grupo gerador a biogás de 120 kVA	28
Figura 2-11: Grupo gerador a biogás de 420 kVA	28
Figura 3-1:Distrito Municipal Katembe	30
Figura 3-2: Parâmetros bases utilizados nos modelos.....	40
Figura 4-1:Grupo Gerador Modelo CG132B – 8	56
Figura 4-2: Esquema típico para secagem do biogás por condensação	58
Figura 4-3: Layout do processo de purificação do Biogás por Absorção	62
Figura 5-1: Comparação do PCI do Biogás e Combustíveis fósseis.....	64
Figura 5-2: Volume/massa de Combustível necessário	65

LISTA DE TABELA

Tabela 2-1:Intervalo de composição de misturas gasosas combustíveis	9
Tabela 2-2: Equivalência Energética de 1 m ³ de biogás.....	10
Tabela 2-3: Etapas da Digestão Anaeróbia	10
Tabela 2-4: Parâmetros Ambientais.....	13
Tabela 2-5:Comparação das tecnologias para a remoção de humidade	25
Tabela 2-6: Consumo de biogás e produção diária de energia.....	29
Tabela 3-1: Caracterização Físico - Química dos Resíduos alimentares.....	32
Tabela 3-2: Caracterização Físico - Química do Esterco Bovino	32
Tabela 3-3: Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor (BLC).....	39
Tabela 4-1: Produção diária de esterco por animais de raças leiteiras.....	44
Tabela 4-2: Dimensões adotadas para o “r”, “p” e “L”.....	50
Tabela 4-3: Valores dos parâmetros calculados para o Biodigestor (BLC).....	51

Tabela 4-4: Resumo Comparativo dos Métodos de Remoção do H₂S59
Tabela 5-1: Estimativa do Custo de Implementação do Sistema71
Tabela 5-2: Indicadores Financeiros73

LISTA DE UNIDADES E GRANDEZAS

kWh	Quilowatt - hora
kg	Quilograma
kVA	Quilovolt – ampere
kW	Quilowatt
m	Metro
m²	Metro quadrado
m³	Metro cúbico
Nm³	Metro cúbico Normal
MJ	MegaJoule
L	Litro
kg/L e MJ/m³	Poder Calorífico
m/m	Percentagem mássica
r	Raio

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MS	Matéria Seca
SV	Sólidos Voláteis
ST	Sólidos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
COV	Carga Orgânica Volumétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GPR	<i>Gás Production Rate</i>
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
PPM	Partes Por Milhão
BLC	Biodigestor Lagoa Coberta
PVC	Policloreto de Vinila
EDM	Electricidade de Moçambique
PGR	Plano de Gerenciamento de Resíduos
OMR	Observatório do Meio Rural
MADER	Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por fontes de energia sustentáveis, impulsionada pelos desafios ambientais e sociais impostos pelo modelo energético vigente, é um tema central no século XXI. Em escala global, a necessidade de mitigar as mudanças climáticas e garantir o acesso universal à energia impulsiona a transição para fontes renováveis e limpas. A biomassa se destaca como uma fonte versátil, que pode ser utilizada tanto como combustível quanto como matéria-prima. Moçambique, país em desenvolvimento com vasto potencial em recursos naturais, apresenta um potencial significativo para a produção de biogás a partir dessa fonte. Os diversos recursos de biomassa e resíduos sólidos urbanos disponíveis para a produção de biogás incluem biomassa florestal, resíduos de usinas de açúcar e resíduos sólidos urbanos.

Na capital de Moçambique, Maputo, a gestão inadequada de resíduos orgânicos representa um desafio ambiental e de saúde pública. A gestão ineficiente desses resíduos agrava problemas ambientais e sanitários, impactando a qualidade de vida da população. Nesse contexto, a implementação de sistemas de biogás surge como uma alternativa promissora, capaz de transformar resíduos em energia limpa e promover o desenvolvimento local.

O biogás, resultante da fermentação anaeróbia de matéria orgânica é composto principalmente por metano, um gás com alto potencial energético. Sua produção a partir de resíduos orgânicos contribui para a redução da emissão de gases de efeito de estufa, a melhoria da gestão de resíduos e a geração de energia descentralizada.

Espera-se que os resultados deste trabalho contribuam para o desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis em Katembe e em outras regiões com características semelhantes, promovendo o acesso à energia limpa, a gestão eficiente de resíduos e o desenvolvimento socioeconômico local.

1.1. Formulação do Problema

A região de Katembe, em Maputo, enfrenta desafios críticos relacionados ao acesso limitado e insustentável à energia eléctrica, que impactam negativamente o desenvolvimento socioeconômico local. Além disso, a gestão ineficiente de resíduos orgânicos, como restos agrícolas, resíduos alimentares, estrume de animais e resíduos urbanos em toda capital, agravam problemas ambientais e sanitários. Nesse contexto, a implementação de um sistema de biogás representa uma solução potencial, mas enfrenta barreiras relacionadas à viabilidade técnica, econômica e à escolha da tecnologia apropriada.

Diante disso, este estudo busca responder à seguinte questão: **Como implementar um sistema de biogás em Katembe que converta resíduos orgânicos em energia eléctrica sustentável, para atender às necessidades energéticas locais e melhorando a gestão ambiental dos resíduos?**

1.2. Justificativa

A implementação de um sistema de biogás em Katembe é justificada pela necessidade urgente de soluções sustentáveis para os desafios energéticos que a região enfrenta. A falta de acesso à uma fonte confiável de energia eléctrica limita o desenvolvimento socioeconômico local, enquanto a gestão inadequada de resíduos orgânicos gera impactos ambientais negativos e de saúde pública em quase todos os cantos da capital. Transformar resíduos em biogás oferece uma alternativa sustentável, permitindo a geração de energia limpa e eficiente, além de promover a gestão responsável dos resíduos.

Ao abordar a questão de como implementar um sistema de biogás em Katembe, o estudo visa fornecer um modelo de solução integrada que possa ser replicado em outras regiões com desafios semelhantes. A pesquisa contribuirá para o desenvolvimento local, alinhando-se aos objectivos de promover energia acessível e sustentável, ao mesmo tempo em que melhora a qualidade ambiental e a saúde pública.

1.3. Objectivos

1.3.1. Geral

- ❖ Estudar a viabilidade de implementar um sistema de biogás com vista na produção de energia eléctrica para alimentar uma área em Katembe.

1.3.2. Específicos

- ❖ Caracterizar a Matéria Orgânica;
- ❖ Quantificar a Matéria Orgânica;
- ❖ Elaborar um procedimento eficiente de colecta e triagem da Matéria Orgânica;
- ❖ Dimensionar o sistema de biogás com base nos resultados obtidos;
- ❖ Avaliar o potencial energético do biogás produzido e sua capacidade de contribuir para a demanda eléctrica de Katembe;
- ❖ Examinar os impactos socioeconómicos e ambientais do sistema;
- ❖ Analisar a viabilidade económica do sistema.

1.4. Metodologia

A metodologia científica apresentada neste capítulo servirá de base para o desenvolvimento do presente estudo, definindo o enquadramento teórico e os procedimentos a serem seguidos para alcançar os objectivos propostos. Para tal, propõe – se:

a) Quanto à Natureza

A pesquisa será de natureza **aplicada**, uma vez que visa à solução prática de um problema real — a gestão e o aproveitamento energético de resíduos orgânicos.

b) Quanto à Abordagem

A abordagem da pesquisa será mista (Qualitativa e Quantitativa).

Na vertente **Qualitativa**, serão analisados os aspectos sociais, ambientais e organizacionais que envolvem a gestão de resíduos e o impacto da implantação do sistema de biogás na comunidade.

Na vertente **Quantitativa**, serão utilizados dados obtidos de estudos e publicações existentes, referentes à composição da biomassa, teor de humidade, sólidos

voláteis, potencial de geração de biogás e energia eléctrica, além da viabilidade econômica do sistema. Os resultados numéricos serão tratados de forma comparativa e analítica, utilizando métodos matemáticos e técnicos para a estimativa de produção energética e análise financeira.

c) Quanto aos Objectivos

A pesquisa será de natureza Descritiva e Explicativa.

Será **Descritiva**, pois buscará caracterizar os substratos disponíveis (resíduos alimentares e esterco bovino), bem como descrever os processos de colecta, produção e tratamento do biogás.

Será também **Explicativa**, pois procurará compreender e justificar as relações entre a composição da biomassa, o rendimento energético do biogás e os benefícios ambientais e socioeconômicos decorrentes da sua utilização, demonstrando o potencial de aproveitamento sustentável desses resíduos.

d) Quanto aos Procedimentos

Os procedimentos incluirão:

- ❖ **Pesquisa Bibliográfica:** Uso de manuais de origem electrónica, relatórios e catálogos;
- ❖ **Estudo de caso:** Exploração e descrição da situação real do Biogás em Moçambique;
- ❖ **Estratégias de recolha de dados:** Livros, artigos científicos, teses, dissertações, relatórios técnicos, relatórios de censos agropecuários e outras fontes relevantes para a implementação do projecto.

1.5. Pergunta de Pesquisa

Como implementar um sistema de biogás em Katembe que converta resíduos orgânicos em energia eléctrica sustentável, atendendo às necessidades energéticas locais e melhorando a gestão ambiental dos resíduos?

CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Biomassa como Fonte de Energia

2.1.1. Definição e Principais Tipos

Em linhas gerais, o termo biomassa é utilizado para denominar o grupo de produtos energéticos e matérias-primas renováveis, originados a partir da matéria orgânica de origem animal ou vegetal formada por via biológica que pode ser utilizado para produção de energia (SEYE, 2003).

A biomassa pode ser classificada em dois grandes grupos: (1) biomassa tradicional, composta essencialmente pela lenha e resíduos naturais e (2) biomassa moderna, produzida a partir de processos tecnológicos avançados e eficientes, para a produção de biocombustíveis líquidos, briquetes e *pellets*, cogeração (bagaço de cana) e os cultivos dedicados de espécies como o das florestas plantadas e o da cana-de-açúcar. A principal fonte para geração de energia da biomassa está nos resíduos, principalmente nos de origem vegetal. Por meio da biomassa é possível se obter diversas formas de energia. Os seus principais usos como insumo energético são: produção de biocombustíveis sólidos para geração de energia térmica (carvão e resíduos agroflorestais), biocombustíveis líquidos (álcool combustível e biodiesel utilizados em motores a combustão) e geração de energia eléctrica (combustão directa, gaseificação, queima de gases, entre outras tecnologias). A biomassa pode ser obtida de vegetais lenhosos, não-lenhosos e/ou de resíduos orgânicos, e transformada em energia mediante diferentes processos de conversão (Figura 2-1).

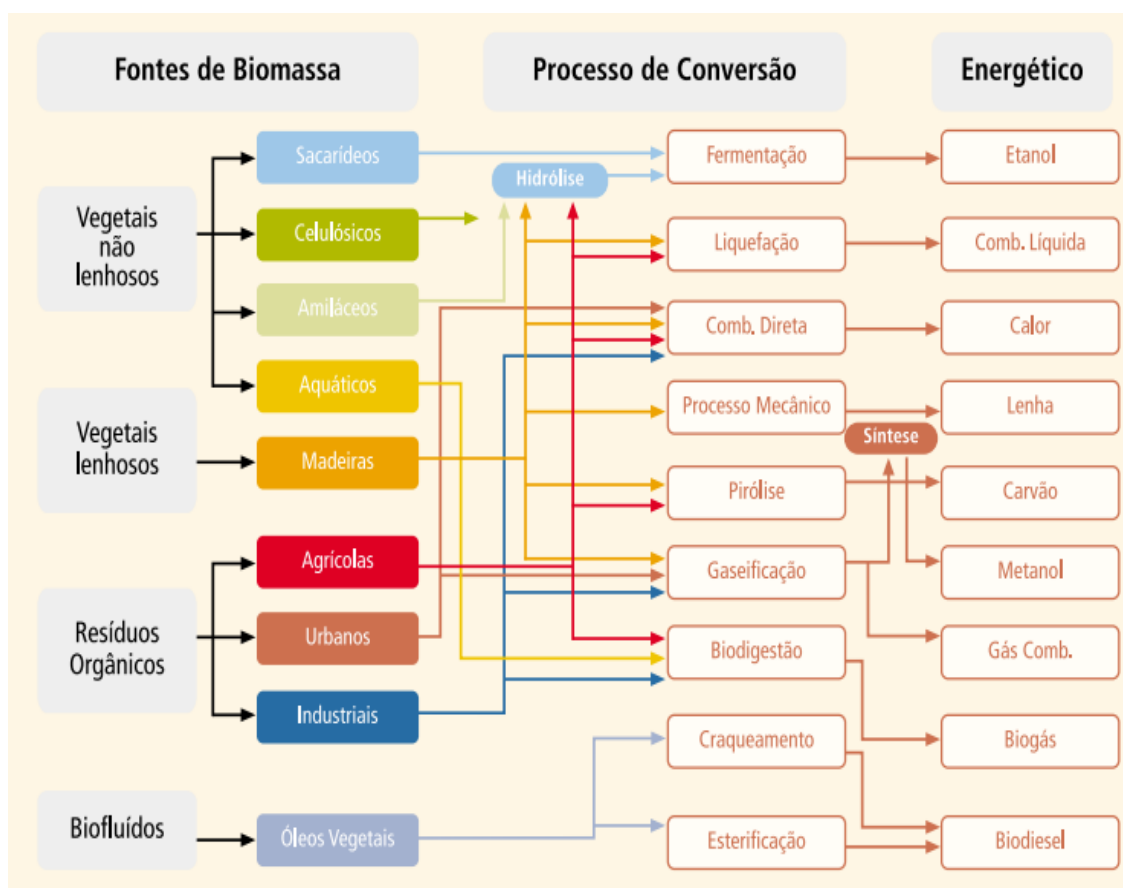


Figura 2-1: Processos de conversão energética da biomassa

Fonte: (1)

De acordo com o Atlas de Energias Renováveis de Moçambique (2020), o país possui um elevado potencial para a exploração energética da biomassa, estimado em mais de 1.800 MW, distribuídos entre diferentes fontes. O aproveitamento eficiente desses recursos representa uma oportunidade concreta para expandir o acesso à energia eléctrica em áreas urbanas e rurais, ao mesmo tempo em que se promove a redução da poluição e a valorização de resíduos locais. A Figura 2-2 mostra o potencial de Biomassa para cada região de Moçambique.

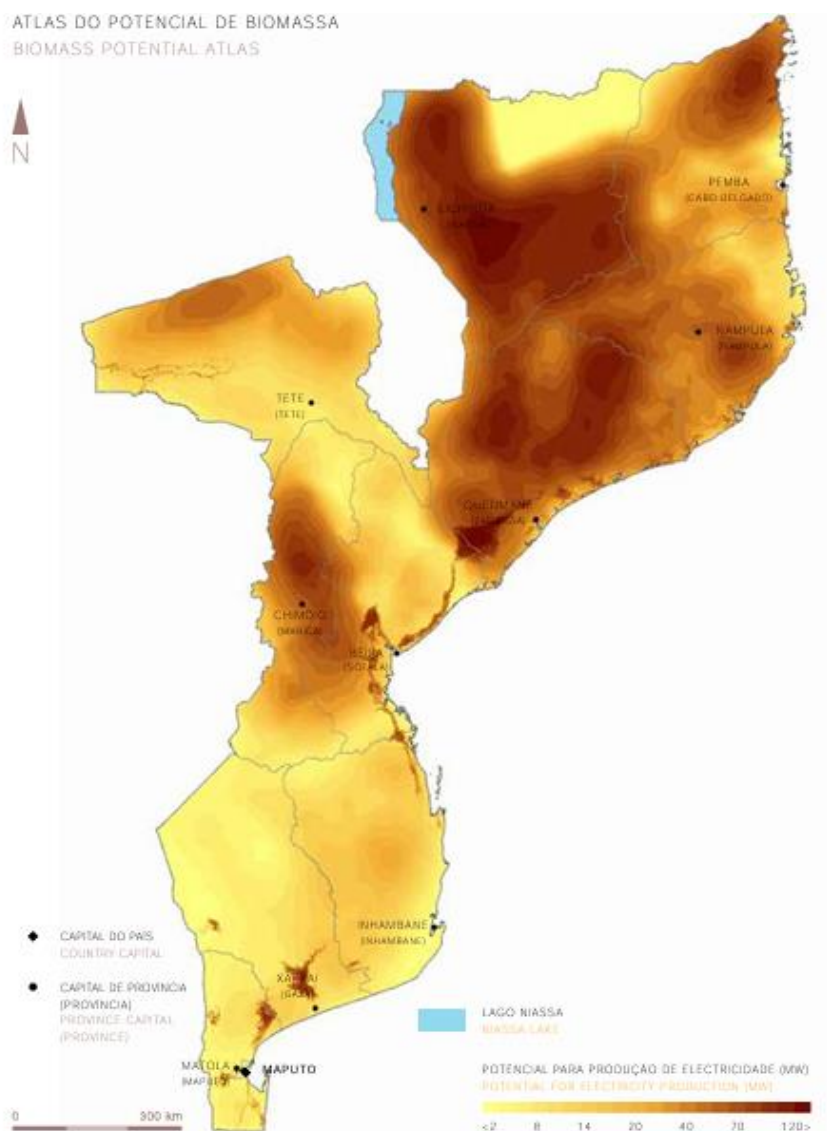


Figura 2-2: Atlas do Potencial de Biomassa em Moçambique

Fonte: (2)

Os principais tipos de biomassa disponíveis em Moçambique, com potencial para produção de energia, incluem:

- ❖ **Biomassa agrícola:** restos de colheitas, palha, bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz, amendoim e milho. As zonas agrícolas das províncias de Manica, Sofala, Tete e Zambézia são ricas nesses resíduos, frequentemente descartados a céu aberto ou queimados;
- ❖ **Resíduos alimentares urbanos:** provenientes de mercados como o Zimpeto, Malanga, Xipamanine e outros centros comerciais de Maputo e Matola. Incluem cascas, frutas estragadas, restos de hortícolas e alimentos vencidos de supermercados;

- ❖ **Esterco de animais:** a produção pecuária, presente em zonas periurbanas, gera quantidades significativas de esterco bovino, suíno e de aves, com elevado potencial metanogênico;
- ❖ **Resíduos florestais:** gerados pela exploração de madeira e pelo processamento de carvão vegetal, especialmente nas províncias de Niassa, Zambézia e Manica. Incluem serragem, galhos e restos de madeira;
- ❖ **Resíduos sólidos urbanos (RSU):** cerca de 60% dos resíduos sólidos gerados nos centros urbanos moçambicanos são de origem orgânica e, portanto, aproveitável energeticamente (Conselho Municipal de Maputo, 2023);
- ❖ **Resíduos agroindustriais:** provenientes de fábricas de processamento de alimentos, como moageiras, padarias, indústrias de óleos vegetais e abatedouros. Estes resíduos são muitas vezes descartados sem tratamento adequado, mas têm alto valor energético.

2.2. Produção de Biogás

2.2.1. O Biogás

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

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

A composição do biogás varia de acordo com o substrato a ser degradado e com as condições físicas e químicas que influenciam no processo da biodigestão anaeróbia. De acordo com Wereko-Brobby & Hagen (2000), a composição volumétrica típica do biogás é cerca de 60% CH_4 , 35% CO_2 e 5% de outros gases: nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono e oxigênio, entre outros.

A Tabela 2-1 apresenta o intervalo de composição do biogás geralmente encontrada, em relação à outras duas misturas gasosas de interesse: Gás Natural e Gás de Síntese (SynGas), proveniente do processo de gaseificação da biomassa.

Tabela 2-1: Intervalo de composição de misturas gasosas combustíveis

Compostos	Unidade	Concentração (%)		
		Biogás	Gás Natural	SynGas
Metano (CH_4)	Vol. %	55 - 70	91	0 - 15
Etano (C_2H_6)	Vol. %	0	5,1	0
Propano (C_3H_8)	Vol. %	0	1,8	0
Butano (C_4H_{10})	Vol. %	0	0,9	0
Pentano (C_5H_{12})	Vol. %	0	0,3	0
Gás Carbônico (CO_2)	Vol. %	25 - 40	0,61	25 - 35
Hidrogênio (H_2),	Vol. %	0	0	20 - 40
Gás Sulfídrico (H_2S)	Vol. %	0,5 - 1	<0,001	0
Nitrogênio (N_2)	Vol. %	<0,001	0,32	2 - 5
Amônia (NH_3)	Vol. %	<0,01	<0,001	<0,001
Monóxido de Carbono (CO)	Vol. %	<0,01	0	35 - 40

Fonte: (3)

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

2.2.1.1. Equivalência e Conversão energética do Biogás

O poder calorífico do biogás depende da concentração de metano existente. Normalmente, está situado na faixa entre (5 000 e 6 000) kcal/m³. A Tabela 2-2 compara a equivalência energética entre 1m³ de biogás e outras fontes de energia.

Tabela 2-2: Equivalência Energética de 1 m³ de biogás

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

Fonte: (4)

2.2.2. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste num processo em que os resíduos orgânicos sofrem uma degradação, por acção de microrganismos anaeróbios, na total ausência de oxigénio. O processo ocorre naturalmente quando as condições envolventes o proporcionam. A acção humana, através da construção de digestores anaeróbios, recria as condições naturais de forma controlada. Na Tabela 2-3, podem observar-se as várias etapas deste processo, assim como as bactérias envolvidas e os produtos formados.

Tabela 2-3.1: Etapas da Digestão Anaeróbia

Etapas	Bactérias	Produto
I Hidrólise	Bactérias hidrolíticas – fermentativas	Monossacarídeos, aminoácidos e ácidos gordos
II Acidogénese	Bactérias acidogénicas	Ácidos gordos voláteis, dióxido de carbono e hidrogénio
III Acetogénese	Bactérias acetogénicas	Ácido acético, dióxido de carbono, hidrogénio

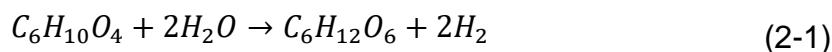
Tabela 2-4.2: Etapas da Digestão Anaeróbia

IV	Metanogénese	Bactérias metanogénicas	Metano, dióxido de carbono e água
-----------	--------------	-------------------------	-----------------------------------

Fonte: (5)

❖ **Hidrólise**

Na primeira etapa - **Hidrólise** - os compostos complexos, como os hidratos de carbono, proteínas e gorduras, são transformados/hidrolisados em compostos solúveis e mais simples: os ácidos gordos, monossacarídeos e aminoácidos. A equação (2-1) é o exemplo da reacção de hidrólise onde os resíduos orgânicos são decompostos num açúcar mais simples, a glicose.

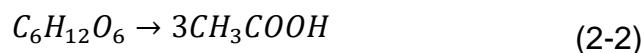


Esta etapa é muito importante para uma instalação de biogás, pois o material orgânico submetido ao processo de digestão deve ser quebrado em pequenas moléculas para que os microrganismos consigam se alimentar delas. As bactérias disponíveis no biodigestor também segregam enzimas que rompem as moléculas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

❖ **Acidogénese**

Na segunda etapa - **Acidogénese ou fermentação** – os subprodutos resultantes da etapa anterior são absorvidos pelas bactérias fermentativas e, após a acidogénese, convertidos em substâncias ainda mais simples que são excretadas na forma de ácidos gordos voláteis, cetonas, álcoois, dióxido de carbono e hidrogénio.

Os produtos desta fase são o ácido propanóico (CH_3CH_2COOH), Ácido butílico ($CH_3CH_2CH_2COOH$), Ácido fórmico ($HCOOH$), Ácido lácteo ($C_3H_6O_3$), Etanol (C_2H_5OH) e Metanol (CH_3OH), entre outros. O hidrogénio, dióxido de carbono e ácido acético saltam a 3ª etapa e são utilizados directamente pelas bactérias metanogénicas na fase final do processo. A equação (2-2) representa uma reacção típica da acidogénese onde a glicose é convertida em ácido acético.



❖ Acetogénese

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

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

❖ Metanogénese

Por fim, na Metanogénese, as bactérias concretizam a fase final do processo, convertendo o ácido acético, o hidrogénio e o dióxido de carbono em metano e outros compostos. A última fase do processo é a mais importante, sendo responsável pela produção directa de metano. Esta é a fase responsável pela velocidade e encadeamento das reacções. A Figura 2-3 ilustra o processo da digestão anaeróbia. A biomassa é decomposta pelas bactérias metanogénicas, produzindo-se assim o biogás.

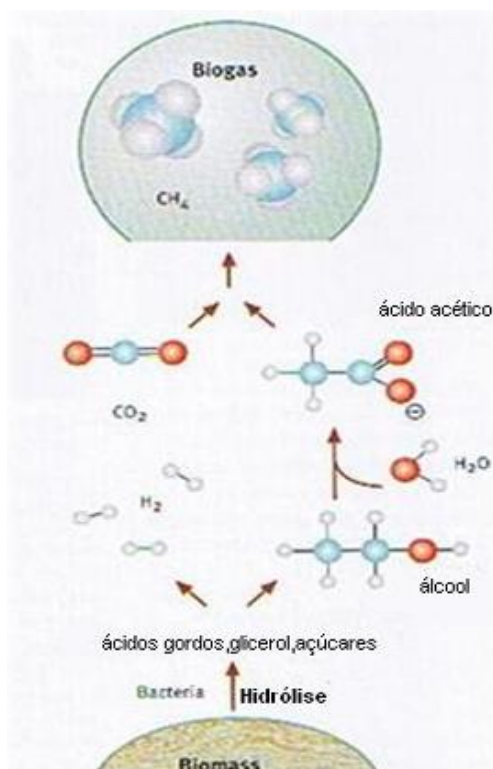


Figura 2-3: Processo de desenvolvimento da digestão anaeróbia

Fonte: (6)

2.2.3. Condições Ambientais e Operacionais

Os parâmetros ambientais e operacionais afetam o processo da digestão anaeróbia. Uma mudança de temperatura, ou mudanças do tipo de substratos, ou até da concentração pode levar à paragem da produção de biogás. A Tabela 2-4 apresenta as condições ambientais necessárias para se dar o processo. As melhores condições ambientais para todos os microrganismos envolvidos estão definidas em duas fases. Uma diz respeito à hidrólise/acidogénese e outra fase que diz respeito à metanogénese.

Tabela 2-5: Parâmetros Ambientais

Parâmetro	Hidrólise/Acidogénese	Formação Metano
Temperatura	25 – 35°C	Mesofílicas: 30 – 42°C Termofílicas: 45 – 60°C
pH	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
C:N	10 – 45:1	20 – 30:1
Quantidade Matéria Seca	<40%	<30%
C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3

Fonte: (7)

❖ Temperatura

A temperatura é um dos factores que mais influencia a digestão anaeróbia e, por sua vez, a produção de biogás, mesmo que sejam pequenas variações, como de 35°C para 30°C ou para 32°C. Normalmente, existem três intervalos de temperaturas na digestão anaeróbia: O intervalo com temperaturas mais baixas, temperaturas inferiores a 20°C – **temperaturas psicrófila**, intervalos de temperaturas entre os 20°C e os 45°C – **temperaturas mesofílica** e intervalos entre os 45°C e os 60°C- **temperaturas termofílica**.

A adição de celulose, ácidos voláteis, metanol e H_2/CO_2 estimulam a produção de metano a todas as temperaturas. H_2/CO_2 e metanol são directamente convertidos em metano em condições termofílicas, mas, em condições psicrófilas, estes substratos são convertidos em metano em dois passos, formando-se inicialmente acetato que, posteriormente é convertido em metano.

❖ pH e Alcalinidade

Uma vez que o pH afecta a taxa de crescimento dos microrganismos, as variações de pH podem causar importantes alterações na constituição microbiana.

Como o processo de digestão anaeróbia é uma sequência de degradações de diferentes bactérias, é importante saber qual o pH que maximiza a eficiência global do processo, embora os valores do pH não variem muito nos diferentes tipos de bactérias.

O pH óptimo para a hidrólise e a acidogénese é entre 5,5 e 6,5. As bactérias metanogénicas, responsáveis pela cinética do processo e mais sensíveis aos factores ambientais, apresentam um pH óptimo entre 6,6 e 7,6, considerando-se assim esta a gama ideal para o processo da digestão anaeróbia.

A produção de ácidos voláteis no processo da digestão anaeróbia pode provocar uma descida acentuada do pH do meio, se não existir uma alcalinidade suficiente. A alcalinidade é uma medida da capacidade tampão do processo, possibilitando determinar a tolerância em ácidos gordos voláteis para que o valor do pH se mantenha na gama pretendida, e está relacionada com a estabilidade do processo. Uma alcalinidade entre 2500 e 5000 mg C_aCO_3/L é suficiente para se obter um adequado poder tampão no sistema.

❖ Razão C/N e C/N/P/S

A razão de C/N da matéria-prima deve estar compreendida entre 16:1 e 25:1, sendo de 18:1 para chorume bovino. A razão C/N/P/S deve estar compreendida entre 500-1000:15- 20:5:3.

Uma elevada razão C/N indica um rápido consumo de azoto pela Metanogénese, havendo uma baixa produção de gás. Por outro lado, uma baixa razão C/N provoca uma acumulação de amónia e o valor do pH excede 8,5, que é tóxico para a bactéria metanogénica.

❖ Oligoelementos¹

Para os organismos do processo sobreviverem precisam de ter oligoelementos - Fe, Ni, Se, W e Mg, em concentrações baixas.

Como foi dito anteriormente existem, também factores operacionais, como o tempo de retenção, a agitação do reactor e a velocidade de carga orgânica do sistema que afectam o processo.

❖ Tempo de Retenção

É o tempo médio necessário para se dar a degradação completa da matéria orgânica e varia com os parâmetros do processo, como a temperatura e a composição da matéria prima, podendo variar entre 15 a 60 dias.

❖ Agitação

É necessária uma agitação regular para prevenir a sedimentação da matéria orgânica no digestor, a formação de espuma e manter o contacto com as bactérias, beneficiando a produção de biogás.

❖ Carga orgânica

É a quantidade de matéria orgânica por volume introduzida diariamente no biodigestor. Dependendo do tipo de biodigestor a matéria orgânica a ser introduzida pode

¹ **Oligoelementos:** (Microminerais) são elementos químicos essenciais para os seres vivos. Geralmente são encontrados em baixa concentração nos organismos, mas são essenciais aos processos biológicos por serem fundamentais para a formação de enzimas vitais para determinados processos bioquímicos como, por exemplo, a fotossíntese ou a digestão.

variar entre os 2 e 30 kg CQO/(m³.dia). Na bibliografia é frequente encontrar a matéria orgânica expressa em kg SV/(m³.dia) ou kg CQO/(m³.dia).

2.3. Substratos para a Produção do Biogás

O biogás pode ser produzido a partir de qualquer tipo de biomassa que se decomponha através de processos biológicos, tais como: chorume animal, resíduos vegetais, fracções orgânicas de resíduos sólidos urbanos, resíduos de indústria alimentar, águas residuais, etc. Para todos estes tipos de resíduos, a digestão anaeróbia pode ser aplicada desde que as condições ambientais e operacionais sejam as adequadas.

A escolha adequada dos substratos é um dos factores mais importantes para o bom desempenho de um sistema de produção de biogás. Os substratos são as matérias-primas biodegradáveis que servem de alimento para os microrganismos durante o processo de digestão anaeróbia. Sua composição química, grau de biodegradabilidade e disponibilidade local influenciam directamente na **quantidade** e na **qualidade** do biogás produzido (Cassini et al., 2014).

Em geral, substratos ricos em matéria orgânica facilmente degradável, como resíduos alimentares, esterco fresco e efluentes agroindustriais, são os mais utilizados em biodigestores, principalmente em regiões com baixo acesso à tecnologias sofisticadas.

2.3.1. Os Resíduos e suas Classificações

A correcta identificação e classificação dos resíduos sólidos é essencial para a sua gestão adequada, principalmente em projectos de valorização energética por meio de digestão anaeróbia. Em Moçambique, o Decreto n.º 13/2006, que aprova o Regulamento sobre a Gestão de Resíduos, define resíduos como "qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz ou tem intenção de se desfazer", e reconhece diferentes tipos de resíduos de acordo com sua origem e perigosidade.

Segundo este Decreto, os resíduos podem ser agrupados em:

❖ Classe I – Resíduos Perigosos:

Possuem características como inflamabilidade, corrosividade, reactividade, toxicidade ou patogenicidade. **Exemplo:** lodos industriais contaminados, solventes, metais pesados, baterias, entre outros.

❖ **Classe II – Resíduos Não Perigosos:**

Classe II A – Não Inertes: resíduos que não se enquadram como perigosos, mas apresentam características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade. **Exemplo:** resíduos alimentares, esterco animal, restos de cozinha.

Classe II B – Inertes: não sofrem alterações físicas, químicas ou biológicas significativas quando dispostos no ambiente. **Exemplo:** entulho, vidro, cerâmica.

2.3.2. Matéria Seca e Conteúdo Orgânico

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

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

SV: Sólidos Voláteis é a perda de matéria por combustão, ou seja, expressa o teor de matéria orgânica de um material que resulta na volatilização (transformação em gás). É calculado pela diferença entre o material seco e o peso após a queima das cinzas. O resultado geralmente é dado em função do percentual de matéria seca.

ST: Sólidos Totais são a soma dos materiais orgânicos e inorgânicos presentes em uma amostra líquida, incluindo os sólidos dissolvidos e os suspensos. No contexto da produção de biogás, esse parâmetro é essencial para avaliar a concentração de matéria presente no substrato e estimar o potencial de geração de energia

2.4. Colecta e Triagem da Biomassa

A colecta e a triagem da biomassa são etapas fundamentais na cadeia operacional de sistemas de digestão anaeróbia. Segundo o Manual de Gerenciamento de Resíduos da FIRJAN (2006), o gerenciamento correcto dos resíduos orgânicos desde sua origem permite não apenas o aproveitamento energético, mas também a prevenção

de impactos ambientais como contaminação do solo, proliferação de vectores e emissão descontrolada de metano.

Em termos conceituais, a colecta e triagem da biomassa deve garantir que:

- ❖ Os resíduos sejam identificados, separados e acondicionados de forma segura;
- ❖ A qualidade do substrato a ser introduzido no biodigestor seja compatível com as exigências do processo; e
- ❖ Os resíduos biodegradáveis sejam manipulados sem contaminação cruzada com resíduos perigosos.

2.4.1. O Plano de Gerenciamento de Resíduos

Desenvolver e implantar um Plano de Gerenciamento de Resíduos (PGR) é fundamental para qualquer que deseja maximizar as oportunidades e reduzir custos e riscos associados à gestão de resíduos sólidos.

Os mesmos preceitos da implantação de qualquer sistema de gestão devem ser aplicados no caso de um PGR. Isso significa adoptar os passos apresentados na Figura a seguir:



Figura 2-4: O Plano de Gerenciamento de Resíduos

Fonte: (8)

2.5. Biodigestores e Purificação do Biogás

2.5.1. Biodigestores

Biodigestores consistem em equipamentos herméticos e impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar anaerobicamente, ou seja, sem a presença de ar atmosférico (oxigênio), por um determinado tempo de retenção, no qual ocorre um processo bioquímico denominado biodigestão anaeróbia, que tem como resultado a formação de produtos gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono, além também de biofertilizante (Magalhães, 1986).

O biodigestor é constituído por um reservatório que armazena a biomassa por um determinado tempo, e por uma câmara (gasômetro) que armazena o biogás produzido. O biogás fica retido na parte livre do biodigestor e em seguida pode ser canalizado para ser utilizado em diversas aplicações, como processos de aquecimento, resfriamento, ou na geração de energia eléctrica.

Encontra-se na literatura classificações de biodigestores sob diversos aspectos, como por exemplo, quanto ao teor de sólidos, formas de alimentação e número de estágios, de acordo com suas características físicas e operacionais. Portanto, No caso dos Resíduos Alimentares acompanhados de Esterco, respectivamente, há uma segregação na fonte dos resíduos, sendo destinado para o reactor apenas resíduos orgânicos, o que sugere o uso de um biodigestor de digestão húmida e contínua ou batelada (BLC ou CSTR).

Este trabalho trata exclusivamente de Biodigestores de Lagoa Coberta (BLC). Para o critério de escolha do mesmo, vide anexo 11.

2.5.1.1. Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC)

O biodigestor de lagoa coberta é um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético (PVC, PEAD, etc.) caracterizado pela baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. Sua geometria é de base rectangular de seção trapezoidal com inclinação do talude variável de acordo com as características do solo (Figura 2-5).



Figura 2-5:Esquema da visão interna do reactor modelo lagoa coberta

Fonte: (9)

O BLC tem sido amplamente empregado no meio rural no gerenciamento dos efluentes da produção animal. É considerado de baixo nível tecnológico, com facilidade de construção e operação. Usualmente encontramos referências a esse modelo como “canadense” ou “biodigestor de lona”. Em geral, não possuem sistemas de aquecimento nem de agitação. Por isso, em alguns casos também encontramos referência a este modelo como “tubular”, onde as dimensões construtivas e o regime de alimentação semicontínuo acabam por gerar configurações de fluxo que variam entre laminar e pistonado (Figura 2-6). Outro aspecto deste modelo é a necessidade de elevado tempo de retenção hidráulica (TRH), o que aumenta o requisito de área para instalação.

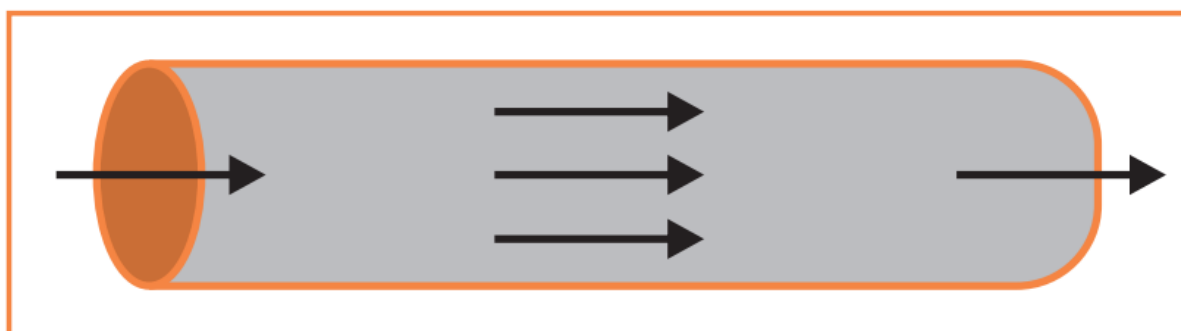


Figura 2-6: Esquema de um reator de fluxo pistonado

Fonte: (9)

A falta do sistema de aquecimento implica na variação da temperatura da biomassa do BLC em função da temperatura ambiente, ou seja, isto tem implicações

directas na capacidade de geração de biogás e será bastante afectada em regiões com inverno mais rigoroso.

Pelo regime hidráulico do reactor e, geralmente, pela não utilização de um sistema de remoção de sólidos previamente instalado ao BLC, haverá uma tendência de acúmulo de lodo no fundo do tanque (este, muitas vezes, é dificultado pelo desenho do biodigestor, impedindo um descarte eficiente de sólidos).

2.5.2. Purificação e Tratamento do Biogás

Para a utilização do biogás é necessário seleccionar tecnologias e projectar sistemas para tratar o biogás até o nível exigido pelo tipo de aproveitamento como mostra a Figura 2-7, o biogás, tendo sido removidas as maiores contaminações (principalmente o H_2S), pode ser utilizado para a produção de energia eléctrica (CHP) e energia térmica (aquecer, secar, resfriar). O biometano, por sua vez, resulta, de uma purificação muito mais exigente aplicada em grandes e constantes volumes de biogás, e possibilita o mesmo uso que o do gás natural. Vale ressaltar que a escolha de tecnologias para o tratamento e aproveitamento do biogás depende da composição, quantidade, continuidade de produção do biogás e das condições locais da planta e não do tipo de substrato utilizado.

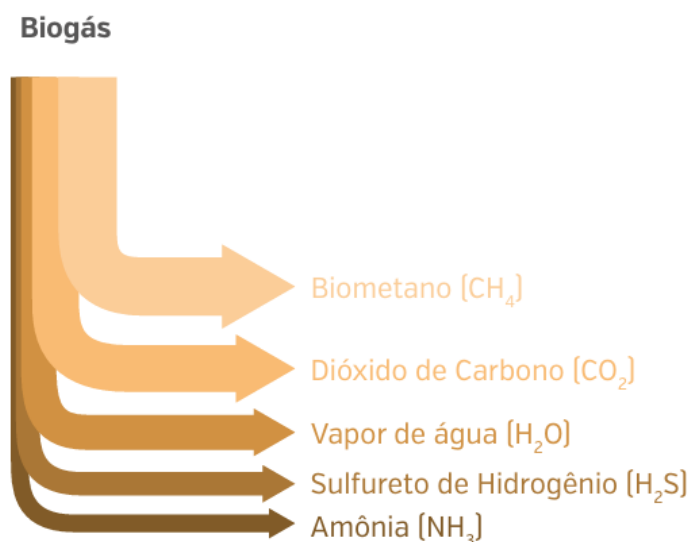


Figura 2-7: Uso do biogás e biometano

Fonte: (16)

O biogás, segundo Lobato (2011), pode atender a diversos fins, tais como: a utilização em caldeiras, fornos e estufas em substituição a outros combustíveis; a

geração de electricidade para uso local ou venda para concessionárias; a co-geração de electricidade e calor; e o uso como combustível alternativo na linha de gás ou em veículos.

Na selecção da tecnologia de conversão, além do poder calorífico e da composição do biogás, é necessário observar algumas propriedades, como a presença de humidade, pressão, contaminantes, gases inertes e gases ácidos, responsáveis por corrosão precoce dos equipamentos, além da emissão de poluentes. A depender do tipo de uso do biogás, será seleccionado o tipo de tratamento a ser realizado, podendo ser mais ou menos exigente, conforme apresentado na Figura 2-8.

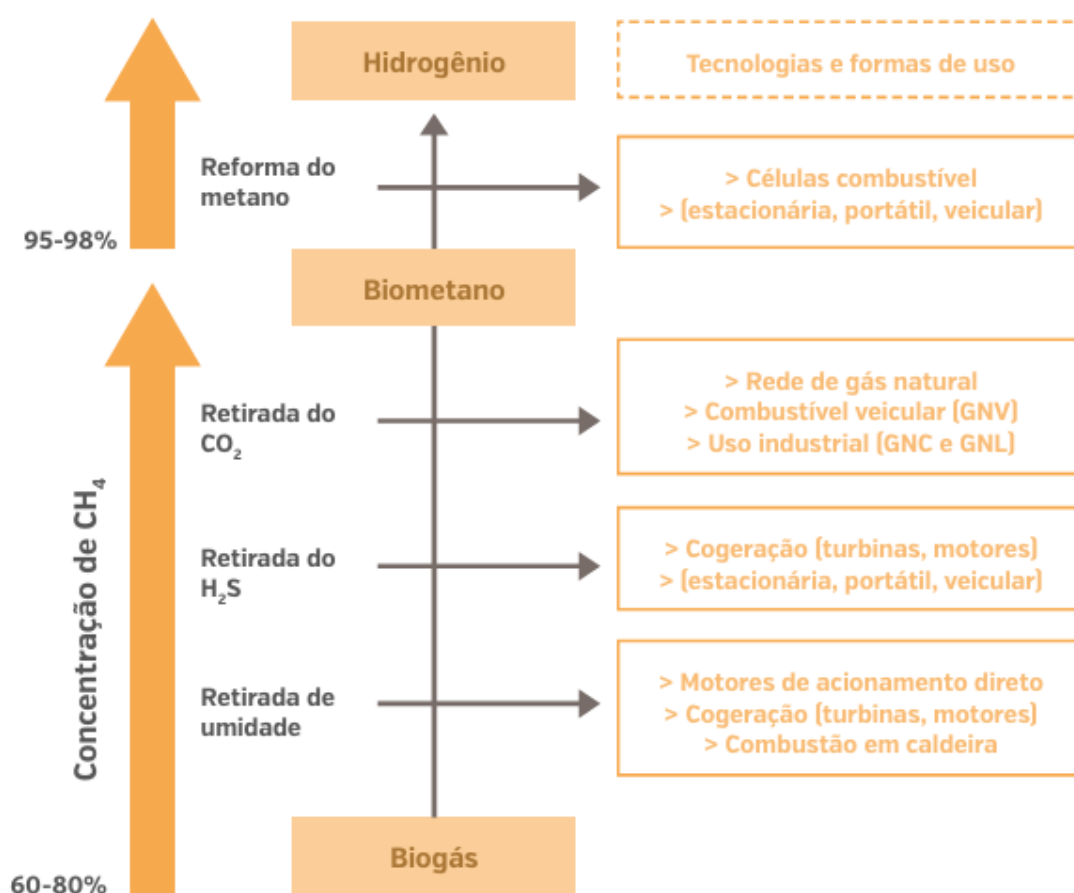


Figura 2-8: Tratamento do biogás conforme o seu uso final

Fonte: (16)

2.5.2.1. Tecnologias para a Limpeza do Biogás

De acordo com as características do biogás e das exigências tecnológicas de aproveitamento energético para a produção de energia eléctrica, são determinados os tipos de tratamento necessários e as combinações entre eles.

❖ **Tecnologias de Remoção de Humidade**

O processo da condensação do vapor de água ao longo de tubulações é responsável pela obstrução e corrosão das mesmas (Yang et al. 2014), particularmente em combinação com outros contaminantes, como os compostos que contêm enxofre. A água presente no biogás pode, também, comprometer a eficiência dos processos de remoção de outras impurezas e do processo de purificação do biogás (kadam, panwar, 2017). Portanto, a remoção de água deve ocorrer no estágio inicial do tratamento do biogás.

Para remover a água do biogás, três métodos podem ser aplicados: Condensação (compressão e resfriamento); Adsorção (gel de sílica, carvão activado) e Absorção (desidratação por glicol), sendo o processo de remoção por condensação o mais utilizado.

a) Secagem por Condensação

Para entender melhor o mecanismo da condensação, é necessário definir alguns conceitos, são eles: pressão de vapor, ar saturado, humidade absoluta e ponto de orvalho.

- ❖ **Pressão de vapor** é a pressão que o vapor de água exerce em um determinado volume de ar ou gás, quando esse vapor está em equilíbrio termodinâmico com o líquido que lhe deu origem;
- ❖ **Ar saturado** é uma mistura de ar seco e vapor de água saturado. A quantidade de vapor de água na mistura gasosa aumenta gradualmente com o aumento da temperatura, até atingir a pressão de vapor saturado;
- ❖ **Humidade absoluta** é a relação entre a massa de vapor d'água e o volume ocupado pelo gás; e
- ❖ **O ponto de orvalho** é quando a pressão de vapor da mistura gasosa torna-se igual à pressão de vapor saturado, devido ao seu resfriamento.

Sendo assim, a condensação ocorre quando a pressão de vapor do gás torna – se igual ou superior à pressão de vapor saturado, que é influenciado directamente pela temperatura, ou seja, se ocorrer o resfriamento do ar saturado até o ponto de orvalho, ocorrerá a condensação.

Ao mesmo tempo, quanto maior a temperatura do líquido, maior será a pressão de vapor saturado e, conseqüentemente, maior o número de moléculas de água estará presente no volume do gás.

Com esses conceitos definidos, em seguida será apresentado duas técnicas convencionais de secagem do biogás pelo método de condensação.

A remoção da humidade da corrente gasosa, pode acontecer no percurso que o biogás faz. Saindo do biodigestor até chegar em algum outro ponto qualquer. Para que a técnica funcione, é necessário que a tubulação de gás seja suficientemente longa para que ocorra a condensação. Neste caso, a tubulação deve ter certa inclinação para facilitar o escoamento e a remoção do condensado, assim como, purgadores nas partes baixas, para que o vapor condensado seja drenado. Esta técnica pode ser melhorada enterrando a tubulação de biogás no solo, pois diminuirá ainda mais o ponto de orvalho do vapor de água (Guia prático do Biogás, 2010).

Outra técnica de remoção de humidade, ainda pelo método da condensação, pode ser feita a jusante da tubulação. Neste caso, o biogás é direccionado para trocadores de calor, onde ocorrerá a troca térmica entre o fluido de refrigeração e o biogás, fazendo com que a condensação ocorra sendo que o frio necessário para a condensação da humidade é fornecido por um sistema de refrigeração, em alguns casos, similar ao de uma geladeira (Guia prático do Biogás, 2010).

b) Secagem por adsorção

Este método de remoção de humidade é geralmente conduzido em colunas de adsorção sob pressões entre 6 a 10 bar, visto que, à pressão ambiente, apenas uma pequena quantidade e humidade pode ser removida.

Materiais como sílica, carvão activado, substâncias químicas como óxido de alumínio ou óxido de magnésio são alguns adsorventes mais empregados pelo facto de que essas substâncias são hidrofílicas, ou seja, apresentam afinidade química ou física com as moléculas de H_2O .

No processo de secagem, o biogás é pressurizado e conduzido através de colunas de adsorção, onde se encontram os materiais adsorventes, chamados de recheio. Com esta técnica, é possível alcançar pontos de orvalho de -10 a -20 °C em pressão atmosférica. Normalmente duas colunas são usadas em paralelo, pois enquanto

uma coluna remove a humidade do biogás, a outra é regenerada fazendo com que a humidade seja evaporada (Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, 2011)

c) Secagem por absorção

Do mesmo modo que a remoção de humidade pelo método de adsorção, o processo de absorção também utiliza os mecanismos de atracção física molecular, entre o absorvente e a molécula de H_2O . Nele, o biogás flui em uma coluna absorvedora, em contracorrente à uma solução de glicol ou trietilenoglicol que absorve a humidade da corrente gasosa. Segundo Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, (2011) é possível atingir um ponto de orvalho de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sob altas pressões, enquanto sob pressão atmosférica, os pontos de orvalho variam entre -5 a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Tabela 2-5 apresenta de forma resumida as principais vantagens e desvantagens das tecnologias de remoção de humidade aqui discutidas.

Tabela 2-6.1: Comparação das tecnologias para a remoção de humidade

Tecnologia	Vantagem	Desvantagem
Condensação	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrocarbonetos, óleo e materiais particulados são removidos também; • Utilizada como técnica de pré-tratamento; • Processo simples e bem conhecido 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressão atmosférica: mínimo de ponto de orvalho 1°C; • Gás a alta pressão para atingir um ponto de orvalho mais baixo (mínimo de -18°C); • Pode ocorrer congelamento
Adsorção em Sílica ou Alumina	<ul style="list-style-type: none"> • Alta taxa de remoção - Ponto de orvalho de 10 até 20°C; • Baixo custo operacional; • Regeneração possível 	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento mais alto; • Pressão de operação: 6-10 bar; • Partículas e óleo precisam ser removidos antes
Adsorção em glicol	<ul style="list-style-type: none"> • Alta taxa de remoção 	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento mais alto; •

Fonte: (11)

❖ Remoção de Gás Sulfídrico (H_2S)

O processo de dessulfurização é necessário para a manutenção dos componentes do sistema que podem ser prejudicados através da acção corrosiva do ácido sulfuroso, resultante da reacção entre o sulfeto de hidrogênio e água.

Para a remoção de H_2S presente no biogás há um grande número de tecnologias comerciais. A selecção da melhor tecnologia depende do uso final do gás, da composição, da variabilidade do volume de gás a ser tratado e da concentração inicial e final de H_2S . Dependendo do uso final, dois ou mais processos podem ser combinados para obter a remoção de H_2S desejada.

No que tange às tecnologias para a remoção de H_2S , estas podem ser aplicadas durante o processo de biodigestão (*in situ*) ou após o processo de biodigestão. As tecnologias podem ser classificadas em dois grandes grupos de acordo com seu princípio: As físico – químicas e as biotecnológicas. As tecnologias físico – químicas são as que dominam o mercado actualmente, enquanto as biotecnológicas vêm ganhando espaço por apresentarem as mesmas eficiências que as tecnologias físico – químicas, mas com menor custo.

A Figura 2-9 apresenta o diagrama dos processos utilizados pelas tecnologias para remoção de gases de enxofre do biogás.

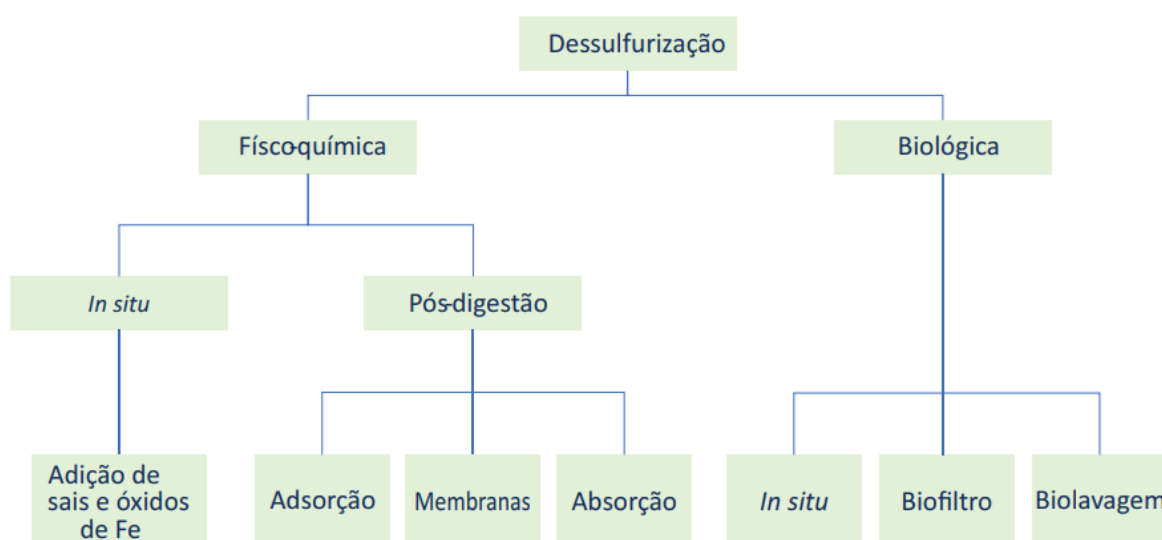


Figura 2-9:Diagrama dos princípios utilizados pra remoção de H_2S do biogás

Fonte: (11)

2.6. Tecnologias de Conversão de Energia

A conversão energética do biogás consiste na transformação da energia química do gás em energia térmica ou em mecânica, por meio do processo de combustão controlada. A energia mecânica produzida activa um gerador, que por sua vez a converte em energia eléctrica.

Dentre as tecnologias disponíveis e mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás, destacam-se os motores ciclo Otto e as microturbinas a gás. O biogás também pode ser utilizado para a geração de energia térmica por meio da sua queima directa em caldeiras ou fornos.

Esta secção destina-se a apresentar brevemente os motores ciclo Otto já comercializadas para conversão de biogás em energia eléctrica.

2.6.1. Motor de Combustão Interna Ciclo Otto

Os motores ciclo Otto são máquinas térmicas onde ocorre a transformação da energia química do combustível (neste caso o biogás) em energia mecânica por meio da combustão da mistura de ar e combustível.

Os motores de combustão interna do tipo ciclo Otto a gás operam em regime diferente dos motores a diesel. Segundo ER-BR, 2017, a conversão consiste em modificações não apenas nos cabeçotes para instalação de velas e rebaixamento dos pistões a fim de reduzir a pressão de combustão: exige, também, a industrialização total do motor por meio do redimensionamento do sistema de arrefecimento, turbina, ignição e injeção eletrônica para cada tipo de gás utilizado como combustível (biogás com alto, médio ou baixo teor de metano, ou ainda GNV ou gás de síntese). Por isso é importante que a industrialização do motor seja realizada conforme as características específicas de combustão e injeção do gás a ser utilizado.

As Figuras 2-10 e 2-11 apresenta um grupo gerador a biogás (motor ciclo Otto de combustão interna a biogás e gerador) de 120 kVA e 420KVA, respectivamente.

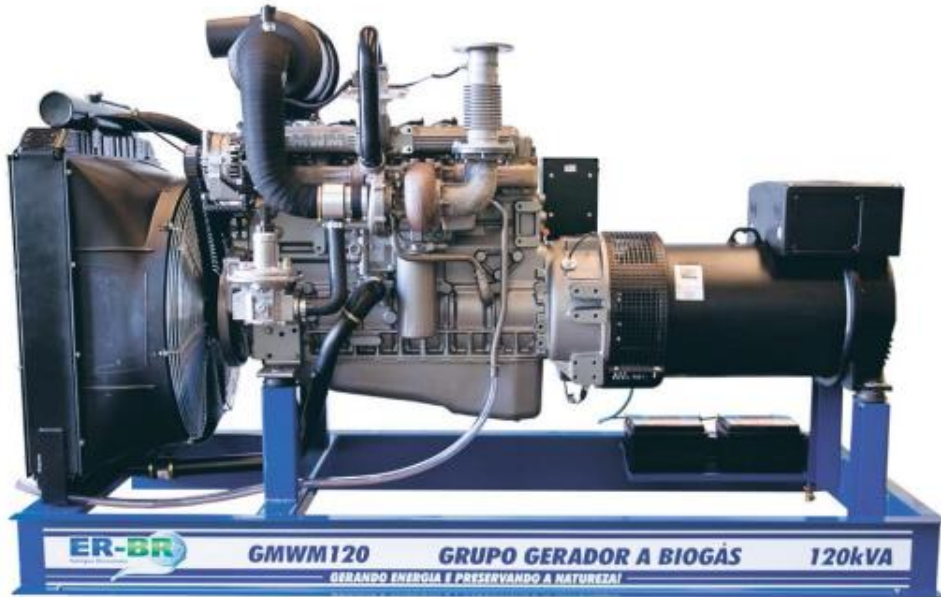


Figura 2-10: Grupo gerador a biogás de 120 kVA

Fonte: (11)



Figura 2-11: Grupo gerador a biogás de 420 kVA

Fonte: (11)

O motor ciclo Otto é uma das tecnologias disponíveis e mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás.

Conforme informações fornecidas pela empresa ER-BR Energias Renováveis, Ltda. (ER-BR,2017), a Tabela 2-6 apresenta as estimativas do consumo de biogás e produção diária de energia eléctrica em base – load (geração contínua – 24 horas – com potência total do grupo gerador) de acordo com a potência do motor. O Anexo 4 apresenta a relação entre o consumo de biogás e a eficiência do sistema.

Tabela 2-7: Consumo de biogás e produção diária de energia

Potência do Motor	Geração em base – load		65% de Metano presente no Biogás		75% de Metano presente no Biogás	
	Por hora	24 horas	Consumo de Biogás		Consumo de Biogás	
35 kVA	20 kW/h	480 kW	14m ³ /h	336m ³ /dia	12m ³ /h	288m ³ /dia
50 kVA	32 kW/h	768 kW	20m ³ /h	480m ³ /dia	17m ³ /h	408m ³ /dia
80 kVA	55 kW/h	1.320 kW	34m ³ /h	816m ³ /dia	29m ³ /h	693m ³ /dia
120 kVA	77 kW/h	1.848 kW	47m ³ /h	1.128m ³ /dia	40m ³ /h	960m ³ /dia
330 kVA	211 kW/h	5.064 kW	97m ³ /h	2.328m ³ /dia	82m ³ /h	1.968m ³ /dia
420 kVA	260 kW/h	6.240 kW	118m ³ /h	2.832m ³ /dia	100m ³ /h	2400m ³ /dia

Fonte: (11)

CAPÍTULO III: MATERIAIS E METODOLOGIAS DE TRABALHO

3. MATERIAIS E METODOLOGIAS DE TRABALHO

3.1. Localização geográfica da área em estudo

3.1.1. Distrito Municipal Katembe

O Distrito Municipal KaTembe, situa-se a Sul da Cidade de Maputo. É limitado a Norte e Leste pela Baía de Maputo, a Sul, pelo Distrito de Matutuine através da Avenida do Metical e a Oeste pelo Distrito de Boane através do Rio Tembe, como mostrado na Figura 3-1.

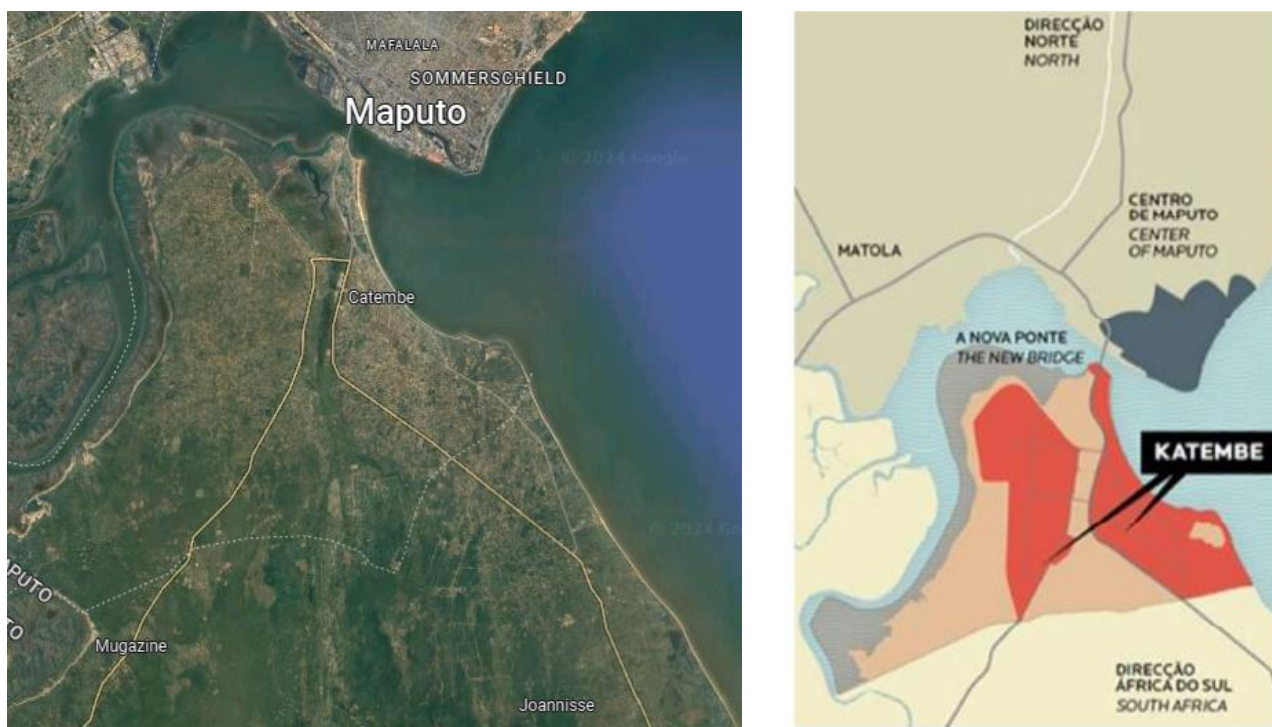


Figura 3-1: Distrito Municipal Katembe

Fonte: Google Maps & Artigo ref 6698

3.2. A Biomassa

3.2.1. Caracterização das Fontes de Biomassa

A correcta caracterização das fontes de biomassa é uma etapa essencial no planeamento e viabilidade de sistemas de produção de biogás. As propriedades físico-químicas dos substratos, bem como sua sustentabilidade, afectam directamente a estabilidade do processo de digestão anaeróbia, a eficiência na geração de metano e a capacidade energética do sistema como um todo.

Neste trabalho, foram analisadas duas fontes de biomassa:

- ❖ **Resíduos alimentares dos mercados grossistas do Zimpeto e da Malanga;**
- ❖ **Esterco bovino, proveniente de diferentes zonas de produção pecuária: Katembe, Moamba e Boane.**

Esses substratos foram escolhidos com base na sua abundância, disponibilidade, composição balanceada e viabilidade operacional. Essas fontes garantirão que o processo de co-digestão Anaeróbia seja eficiente, sustentável e capaz de gerar a maior quantidade de biogás possível para alimentar a área em questão.

3.2.1.1. Caracterização Físico-Química dos Substratos

A caracterização físico-química visa compreender a composição dos substratos e seu potencial para a digestão anaeróbia. Parâmetros como teor de humidade, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), relação carbono/nitrogênio (C/N), pH e poder calorífico são determinantes para prever a produção de biogás.

❖ Resíduos Alimentares

Os resíduos alimentares são constituídos principalmente por restos de frutas, hortaliças, cascas, talos e folhas que são descartados diariamente nos mercados. Tais resíduos apresentam elevada humidade e concentração de matéria orgânica facilmente biodegradável e ricos em açúcares e carboidratos solúveis. Do ponto de vista técnico, apresentam:

Tabela 3-1: Caracterização Físico - Química dos Resíduos alimentares

Parâmetro técnico	Valor médio estimado	Fonte de referência
Humidade	80–90%	Leme et al. (2014)
Sólidos Totais (ST)	10–20%	Deublein & Steinhauser (2008)
Sólidos Voláteis (SV)	85–90% dos ST	Cassini et al. (2014)
Relação C/N	30:1 – 40:1	Weiland (2010)
pH	4,5 – 6,0	FAO (2013)
Poder Calorífico	4,5 – 6,5 kWh/kg SV	Leme et al. (2014)

Fonte: (Autor)

❖ Esterco de Bovinos

O esterco bovino é uma biomassa de composição estável, geralmente composta por dejectos misturados com urina, restos de alimentação e pequenas quantidades de palha ou serragem. É um dos substratos mais utilizados mundialmente na produção de biogás. Apresentam as seguintes características:

Tabela 3-2: Caracterização Físico - Química do Esterco Bovino

Parâmetro técnico	Valor médio estimado	Fonte de referência
Humidade	75–80%	Deublein & Steinhauser (2008)
Sólidos Totais (ST)	15–25%	Leme et al. (2014)
Sólidos Voláteis (SV)	70–80% dos ST	Cassini et al. (2014)
Relação C/N	15:1 – 25:1	Anastácio (2010)
pH	4,5 – 6,0	FAO (2013)
Poder Calorífico	3,5 – 5,0 kWh/kg SV	Weiland (2010)

Fonte: (Autor)

3.2.1.2. Sustentabilidade da Utilização das Fontes de Biomassa

A escolha dos substratos utilizados neste trabalho vai além da viabilidade técnica e energética. A sustentabilidade do sistema de biogás está directamente relacionada à forma como os resíduos são colectados, manipulados e inseridos na cadeia de valorização energética. Para este estudo, analisaram-se os seus impactos ambientais e sociais da utilização dos resíduos alimentares e do esterco bovino, conforme detalhado a seguir.

a) Resíduos Alimentares

❖ Ambiental

A deposição inadequada dos resíduos alimentares em mercados a céu aberto contribui significativamente para a emissão espontânea de metano (CH_4), gás com potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2). Além disso, há contaminação visual, proliferação de vectores (moscas, ratos) e escoamento de líquidos orgânicos para o solo.

A sua utilização como substrato para biogás:

- Evita emissões directas de GEE;
- Reduz o volume de resíduos orgânicos enviados a aterros;
- Previne a poluição local em áreas urbanas densas;
- Transforma um passivo ambiental em fonte renovável de energia e fertilizante.

❖ Social

A utilização dos resíduos alimentares apresenta **potencial significativo de impacto social positivo**, especialmente em comunidades urbanas e periurbanas de Maputo. A gestão inadequada desses resíduos representa, actualmente, um desafio sanitário e logístico para o município, refletindo-se em acúmulo de lixo, odores desagradáveis e riscos à saúde pública.

A adopção de um sistema de colecta selectiva voltado ao aproveitamento energético dos resíduos pode:

- Melhorar as condições de higiene e salubridade nos mercados, beneficiando directamente comerciantes, vendedores informais, consumidores e trabalhadores de limpeza;
- Promover práticas de educação ambiental, incentivando feirantes e a população local a separar resíduos orgânicos e compreender seu valor energético e agrônômico;
- Gerar novas oportunidades de trabalho, especialmente nas fases de separação, transporte, triagem e operação do sistema de biodigestão;

- Fortalecer redes comunitárias e cooperativas, por meio da organização de grupos para gestão local dos resíduos e distribuição do biofertilizante resultante;
- Além disso, o reaproveitamento desses resíduos contribui para reduzir a estigmatização social associada ao lixo urbano, mostrando que os resíduos, quando bem geridos, podem se transformar em recursos estratégicos para o desenvolvimento sustentável das comunidades.

b) Esterco Bovino

❖ Ambiental

O descarte inadequado de esterco bovino em currais, pastagens e solos expostos representa um desafio ambiental significativo, especialmente em zonas periurbanas e rurais onde não há infraestrutura de saneamento rural ou sistemas de tratamento de resíduos orgânicos.

Quando deixado a céu aberto, o esterco sofre decomposição anaeróbia natural e libera metano (CH_4) directamente para a atmosfera, contribuindo para o agravamento das emissões de gases de efeito de estufa. Além disso, o escoamento de líquidos provenientes do esterco pode:

- Contaminar corpos d'água superficiais e subterrâneos com nitrogênio e fósforo;
- Prejudicar a qualidade do solo, aumentando a salinidade ou promovendo proliferação de patógenos;
- Favorecer a proliferação de insectos e vectores de doenças, como moscas e mosquitos.

Ao ser utilizado como substrato em biodigestores, o esterco bovino passa por um processo controlado de degradação, que oferece diversos benefícios ambientais concretos:

- Redução directa das emissões espontâneas de metano, uma vez que o gás é capturado e aproveitado como fonte de energia;
- Estabilização dos nutrientes presentes no resíduo, permitindo seu reaproveitamento seguro como biofertilizante agrícola;

- Eliminação de odores e redução da carga patogênica, contribuindo para o controle sanitário das unidades de produção pecuária;
- Prevenção da eutrofização² de lagos e rios por excesso de matéria orgânica e nitrogênio.

❖ Social

O aproveitamento energético do esterco bovino por meio da digestão anaeróbia apresenta impactos sociais significativos, especialmente em regiões rurais e periurbanas de Moçambique. Segundo o Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural (MADER), a pecuária bovina constitui uma das principais actividades económicas familiares e comunitárias.

Nestes contextos, o esterco é tradicionalmente descartado de forma improvisada, acumulando-se em currais ou sendo espalhado no solo sem tratamento, o que traz riscos sanitários e ambientais. Ao ser integrado a sistemas de produção de biogás, esse resíduo ganha nova funcionalidade, resultando em benefícios sociais expressivos:

- Melhoria da higiene e saúde comunitária, ao reduzir o acúmulo de dejectos e a proliferação de vectores de doenças como moscas, mosquitos e vermes;
- Valorização da pecuária familiar, ao transformar um subproduto antes ignorado em insumo energético e agronômico;
- Acesso à energia limpa em zonas com abastecimento limitado ou instável, o que pode beneficiar habitações, pequenas agroindústrias e escolas rurais;
- Geração de oportunidades de capacitação técnica, incentivando o conhecimento sobre biotecnologia, fertilização orgânica e gestão sustentável dos recursos naturais;
- O biofertilizante resultante do processo, além de ser utilizado nas próprias propriedades, pode também ser partilhado ou comercializado entre membros da comunidade, promovendo autonomia productiva e integração social em cadeias curtas e sustentáveis.

² A **eutrofização** é um processo ambiental que ocorre quando há excesso de nutrientes — especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P) — em corpos d'água como rios, lagos, lagoas ou baías. Esses nutrientes geralmente vêm de esgotos, fertilizantes agrícolas ou dejectos animais, como o esterco bovino.

3.2.2. Classificação das Fontes de Biomassa

Os **resíduos alimentares** provenientes dos mercados Municipais do Zimpeto e da Malanga, são classificados como resíduos **Classe II A – Não Inertes**, por apresentarem alta biodegradabilidade e potencial energético. São compostos por cascas, polpas, talos, sementes, restos de frutas e vegetais, etc.

Os dejectos de origem animal, como o **esterco bovino**, também são classificados como resíduos **Classe II A – Não Inertes**. São altamente biodegradáveis, ricos em matéria orgânica e nitrogênio, e apresentam risco de contaminação ambiental caso não sejam adequadamente tratados.

3.2.3. A Estratégia de Seleção e mistura de substratos

A co-digestão anaeróbia é a prática de utilizar dois ou mais substratos distintos de forma combinada em um único sistema de biodigestão. Essa técnica tem se mostrado eficaz para otimizar o processo de produção de biogás, melhorar o desempenho microbiológico e aumentar a eficiência energética do sistema (Kusch et al., 2008; Leme et al., 2014).

No contexto deste trabalho, a co-digestão foi adoptada como estratégia técnica, visando equilibrar os parâmetros químicos dos substratos disponíveis. Essa combinação foi escolhida com base em três critérios principais:

a) Complementaridade Química (Relação C/N)

Cada substrato possui uma composição específica que, isoladamente, pode não atender às exigências do processo de digestão anaeróbia. Resíduos alimentares, por exemplo, são ricos em carbono mas pobres em nitrogênio, o que pode resultar em baixa actividade microbiológica e acúmulo de ácidos voláteis. Por outro lado, o esterco bovino tem boa concentração de nitrogênio, mas produção limitada de metano se utilizado sozinho.

Ao combinar esses substratos, obtém-se uma relação C/N próxima do ideal (20:1 a 30:1), criando um ambiente estável e propício para a actividade dos microrganismos metanogênicos (Deublein & Steinhauser, 2008).

b) Estabilidade Operacional

A mistura de substratos com características físico-químicas diferentes também contribui para a estabilidade do processo, reduzindo riscos de:

- ❖ Acidificação do reator;
- ❖ Inibição por amônia;
- ❖ Formação de crostas ou camadas flutuantes;
- ❖ Variações bruscas de carga orgânica.

Além disso, a co-digestão melhora a fluidez da mistura, facilitando o bombeamento e o escoamento no interior do biodigestor.

c) Aumento da Eficiência Energética

Estudos demonstram que a co-digestão pode aumentar significativamente a produção de biogás em comparação ao uso isolado dos substratos, graças à sinergia microbológica entre as diferentes matérias orgânicas (Leme et al., 2014). No caso deste trabalho, espera-se que esta combinação permita um rendimento energético mais elevado e constante.

d) Disponibilidade Local e Sustentabilidade

Ambos os substratos escolhidos são resíduos abundantes e subutilizados no contexto local. A co-digestão promove não apenas a geração de energia, mas também uma solução integrada para o aproveitamento de resíduos urbanos e agropecuários, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental.

3.3. Parâmetros Operacionais do Biodigestor Lagoa Coberta

3.3.1. Tempo de Detenção Hidráulica

O tempo de detenção hidráulica (TDH) é o tempo em que o substrato permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do biodigestor. Ele pode ser obtido através da relação entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação, como mostrado na Equação 3.1:

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad 3.1$$

Onde:

TDH = Tempo de detenção hidráulica, em (dias);

V = Volume útil do reator, em (m^3);

Q = Vazão afluyente do substrato, em (m^3 /dia).

3.3.2. Carga Orgânica Volumétrica (COV)

A carga orgânica volumétrica (COV) apresenta quantos quilos de matéria orgânica devem ser carregados no biodigestor diariamente por m^3 de volume, como apresentado na Equação 3.2. A concentração do substrato pode ser dada pela DQO, ST ou SV. Assim, pode-se escrevê-la como:

$$COV = \frac{Q \times S}{V} \quad 3.2$$

Onde:

COV = Carga orgânica volumétrica, em (kg substrato) / (m^3 xdia);

Q = Vazão afluyente de substrato, em (m^3 /dia);

S = Concentração do substrato no afluyente, em ($kg \cdot m^{-3}$);

V = Volume útil do reactor, em (m^3).

3.3.3. Taxa de Produção de Biogás (Gas Production Rate – GPR)

Esse parâmetro descreve a razão entre o gás produzido por unidade de volume de reactor, em um determinado espaço de tempo, como mostrado na Equação 3.3.

$$GPR = \frac{Q_{biogás}}{V} \quad 3.3$$

Onde:

GPR = Taxa de produção de gás, em (m^3 biogás) / (m^3 reactor x dia);

$Q_{biogás}$ = Vazão de biogás, em (m^3 /dia);

V = Volume útil do reator, em (m³).

3.3.4. Volume do Biodigestor

O tamanho do biodigestor pode ser calculado multiplicando-se a carga diária e o tempo de detenção hidráulica, conforme mostrado na Equação 3.4.

$$VB = VC \times TDH \quad 3.4$$

Onde:

VB = Volume do biodigestor, em (m³);

VC = Volume da carga diária (biomassa + água), em (m³/dia);

TDH = Tempo de detenção hidráulica, em (dias).

Os parâmetros operacionais descritos permitem dimensionar o biodigestor desejado. A partir das fórmulas descritas na Tabela 3-3 e tendo o volume do biodigestor é possível determinar o biodigestor a ser utilizado (RIBEIRO, 2011).

Tabela 3-3.1: Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor (BLC)

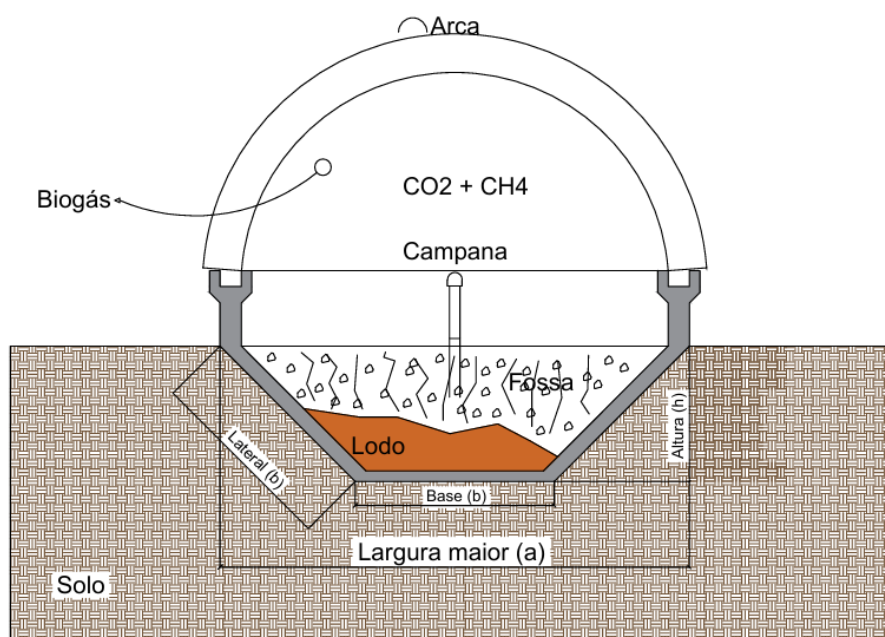
Fórmula	Descrição
$P = C = 2\pi r$	P = Perímetro total transversal (campana mais fossa) C = circunferência da bolsa r = raio da bolsa plástica
$A\% = 0,621p^2 - 0,042p + 0,352$	A% = percentagem do perímetro transversal destinado ao arco p = proporção da fase gasosa desejada ($p \leq 0,4$)
$b = \left(-\frac{1}{3}A\% + \frac{1}{3}\right)C$	b = lateral, base ou largura menor da fossa
$a = 1,618b$	a = largura maior da fossa
$h = 0,951b$	h = profundidade da fossa
$Af = 0,4755(a + b)b$	Af = área transversal da fossa

Tabela 3-4.2: Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor (BLC)

$At = \frac{Af}{1 - p}$	At = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana
$Ag = At - Af$	Ag = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana menos a área transversal da fossa
$Vt = At \times L$	Vt = volume total do biodigestor (campana mais gás) L = comprimento do biodigestor
$Vf = Af \times L$	Vf = volume total da fossa
$Vg = Ag \times L$	Vg = volume total do gás

Fonte: (13)

Para iniciar o modelo conceitual, buscou-se relacionar os parâmetros iniciais detalhados na Figura 3-2: Arco, Lateral (b), Altura (h), Base (b), Largura maior (a) com a proporção gás/fase líquida desejada (RIBEIRO, 2011). Portanto, relacionar quanto do corte transversal da bolsa de plástico será destinada à formação do Arco da campana (Lona) para as possíveis proporções gás/fase líquida. Com as informações definidas anteriormente, já é possível realizar o processo de definição das equações para calcular as dimensões da fossa.

**Figura 3-2:** Parâmetros bases utilizados nos modelos

Fonte: (Autor)

Para utilização dessas equações, deve-se seleccionar os parâmetros iniciais, comprimento (L), raio da bolsa (r) e a proporção de fase gasosa (p), que deve ser menor ou igual à 0,4. Esses parâmetros são escolhidos condicionados ao volume estimado do biodigestor da equação 3.4 (RIBEIRO, 2011).

3.3.5. Cálculo da caixa de entrada e saída

As dimensões da caixa de entrada necessitam ser suficientes para que seu volume suporte o volume de carga por dia e para a caixa de saída o dimensionamento é feito para um volume, de no mínimo, três vezes o volume da caixa de entrada, para que dessa forma o biofertilizante seja armazenado (OLIVER, 2008).

3.3.6. Alimentação do Biodigestor

A alimentação inicial do biodigestor se dá pela introdução do inóculo, que neste caso, é uma mistura dos esterco dos bovinos, considerando-se uma produção otimizada de metano no biogás, uma proporção de 40% de resíduo alimentar dos mercados para 60% de esterco bovino (NEVES; CARNEIRO; BERNI, 2015). Após esse início, é colocado na caixa de entrada, os resíduos alimentares provenientes dos mercados, triturados e misturados com água, respeitando a proporção definida de 15% (PROBIOGÁS, 2015).

3.3.7. Estimativa do potencial energético do biogás produzido

Em posse da quantidade teórica de biogás gerado por dia, há como estimar o potencial energético do biogás que vai ser gerado como descrito na Equação 3.5.

$$Pot_{biogás} = Q_{biogás} \times PCI_{biogás} \times \eta \quad 3.5$$

Onde:

$Pot_{biogás}$ = Potencial energético do biogás, em kWh/dia;

$Q_{biogás}$ = Quantidade de biogás gerado por dia, em m³/dia ;

$PCI_{biogás}$ = Poder calorífico inferior, em kWh.m⁻³;

η = Eficiência de conversão, em %.

A geração de energia depende do poder calorífico do biogás e do rendimento do conjunto motor – gerador, que será utilizado para fazer a conversão do biogás em energia eléctrica. O poder calorífico inferior (PCI) do metano, em condições normais de temperatura e pressão (CNTTP) é de $9,88 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ (LIMA; PASSAMANI, 2012), e a eficiência de conversão do biogás em energia eléctrica do conjunto motor – gerador (motores ciclo-Otto) é de aproximadamente 25%, (CCE, 2000).

CAPÍTULO IV: CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO

4. CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO

4.1. Geração de Resíduos Alimentares

Os mercados Zimpeto e Malanga, localizados na região de Maputo, são grandes produtores de resíduos alimentares devido ao intenso fluxo de actividades comerciais e a variedade de produtos comercializados (maioritariamente orgânicos). Abaixo, são detalhadas as estimativas de produção diária de resíduos alimentares, com foco na fracção orgânica que pode ser utilizada como substrato para o biodigestor.

4.1.1. Mercado Grossista do Zimpeto

Segundo a Agrolink/Macauhub Moçambique, o Mercado Grossista do Zimpeto, o maior da cidade, produz uma média diária de sete toneladas de lixo (incluindo o não – orgânico). Relatórios do Conselho Municipal de Maputo, com foco nos mercados, indicam que aproximadamente 65% a 70% dos resíduos gerados no mercado são orgânicos, provenientes de alimentos como frutas, vegetais, cascas, e outros produtos perecíveis.

Desta feita, estima – se que a quantidade de resíduos alimentares disponíveis seja de: $65\% \times 7.000 \text{ kg} = 4.550 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}$.

4.1.2. Mercado Malanga

Segundo a autora Leida Tinga (2022), depois do Mercado Grossista do Zimpeto, o Mercado da Malanga é o segundo que mais produz resíduo orgânico com uma média diária de 3 à 4 toneladas de lixo (incluindo o não orgânico). Baseando, portando, no pior dos casos de produção média diária de 3 toneladas com produção de resíduos orgânicos à uma percentagem de 65%, tem – se uma produção diária de aproximadamente:

$65\% \times 3.000 \text{ kg} = 1.950 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}}$.

4.1.3. Resíduos Totais Disponíveis

Ao considerar os dois mercados, a estimativa de resíduos orgânicos disponíveis para o biodigestor seria de: $4.550 \frac{Kg}{dia} + 1.950 \frac{Kg}{dia} = 6.500 \frac{Kg}{dia}$.

4.2. Geração de Estercos Bovinos

A Tabela 4-1 apresenta os dados de quantificação e composição química do esterco bovino produzido, sendo os dados variáveis e influenciados por parâmetros como espécie e raça do animal, idade, tipo de alimentação, material utilizado e o tratamento dado ao esterco (SANTOS; NOGUEIRA, 2012). Avaliando a Tabela 4-1 é possível observar que tanto a produção diária de esterco, como o percentual de nutrientes presentes nele é directamente proporcional ao peso do animal. Segundo Salomon e Lora (2009), a quantidade de esterco produzido varia de acordo com o peso dos animais vivos. Por outro lado, a água ingerida influenciará na produção de urina, variando, assim, a quantidade de excreta líquida.

Tabela 4-1: Produção diária de esterco por animais de raças leiteiras

Peso do animal (Kg)	Produção total de esterco (m ³ /dia)	Conteúdo em nutrientes (g/dia)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
68	0,005	27,2	10,4	21,8
113	0,009	45,4	20,8	38,2
227	0,019	90,7	37,4	76,5
454	0,037	186,0	75,9	147,5
635	0,052	285,5	106,0	207,6

Fonte: (14)

Segundo dados do Observatório de Meio Rural (OMR), de Julho de 2024, em 2023 existiam **2.406.285 cabeças de gado** bovino de corte no país. Os distritos da Capital do País que possuíam, em 2023, mais efectivos bovinos, são os seguintes: Magude (cerca de 106 mil cabeças), Moamba (77 mil), Matutuine e Namaacha (com entre 71 mil e 73 mil cabeças), que representam perto de 24% do efectivo nacional. Deste efectivo, apenas 0,2% é de vacas leiteiras, portanto, a Capital possuía em 2023 aproximadamente

225.000 cabeças de gado (OMR, 2024), sendo o efetivo de vacas leiteiras correspondentes a 0,2%, ou seja, 510 cabeças.

A média de peso do gado bovino considerada é de 300 kg e produção diária de 15 kg/cabeça de esterco, o que totaliza $7.650 \frac{kg}{dia}$ de esterco bovino leiteiro produzido em Maputo.

Para efectuar os cálculos, foi considerado um percentual de 75% de sólidos voláteis para um volume de esterco bovino, baseando-se em pesquisa realizada sobre caracterização de esterco bovino húmido (WAN et al., 2013).

4.3. A Colecta e a Triagem

4.3.1. Colecta e Triagem dos Resíduos Alimentares

A eficiência do sistema de biogás proposto para Katembe depende de uma logística de colecta bem estruturada, capaz de transformar resíduos alimentares em energia limpa e fertilizante orgânico. Para isso, foi desenvolvido um modelo inovador que promove a participação comunitária por meio da troca de resíduos por tickets em espaços designados como Pontos de Troca Verde.

Esses pontos funcionam como centros de recolha acessíveis, onde qualquer cidadão pode entregar resíduos alimentares separados e, em troca, receber *tickets*. Com essa abordagem, fomenta-se uma cultura de reaproveitamento, redução de desperdícios e inclusão social.

As etapas descritas a seguir delineiam todo o procedimento de colecta e triagem, desde a mobilização da comunidade até a logística de transporte dos resíduos, assegurando organização, rastreabilidade e sustentabilidade ambiental.

Etapa 1: Sensibilização e Divulgação:

- ❖ Promover campanhas abertas para comerciantes e comunidade vizinha aos mercados;
- ❖ Ensinar a separação correcta dos resíduos alimentares;
- ❖ Informar sobre o funcionamento do Ponto de Troca Verde, benefícios dos *tickets* e sua relação com a produção de biogás.

Etapa 2: Instalação dos Pontos de Troca Verde

- ❖ Seleccionar locais estratégicos dentro e ao redor dos mercados para instalação;
- ❖ Disponibilizar recipientes próprios para resíduos alimentares;
- ❖ Garantir acessibilidade para toda a comunidade dos mercados.

Etapa 3: Recepção e Pesagem dos Resíduos

- ❖ Operadores recebem e pesam os resíduos entregues;
- ❖ Avaliam a qualidade (limpos e sem contaminantes);
- ❖ Registram o peso total por entrega para emissão dos *tickets*.

Etapa 4: Armazenamento Temporário nos Pontos de Troca Verde

- ❖ Os resíduos recebidos são colocados em recipientes fechados e apropriados, evitando odores e presença de animais;
- ❖ Local deve ser sombreado, ventilado e com piso impermeável;
- ❖ Resíduos permanecem armazenados até a colecta diária no horário estabelecido;
- ❖ Durante o armazenamento, faz – se a triagem para retirar possíveis contaminantes (Vide Anexo 2).

Etapa 5: Emissão e Entrega dos *Tickets*:

- ❖ Entregar *tickets* equivalentes à quantidade e qualidade dos resíduos entregues.

Tickets funcionam como:

- ❖ Moeda de troca por produtos e serviços.

Etapa 6: Transporte Diário para Katembe:

- ❖ Transporte imediato dos resíduos do Ponto de Troca Verde para Katembe em horários estabelecidos.
- ❖ Rota otimizada e veículos adequados para transporte seguro e higiênico.

Etapa 7: Monitoramento e Avaliação

- ❖ Registro diário de volumes colectados e *tickets*;
- ❖ Relatórios mensais para avaliação do desempenho e ajustes necessários.
- ❖ Divulgação dos resultados para manter a transparência e incentivar a participação.

4.3.2. Colecta e Triagem dos Estercos Bovinos

Assim como tratado nos Resíduos alimentares, a colecta e triagem do esterco bovino constituem uma etapa fundamental para garantir a qualidade do substrato utilizado na produção de biogás. Sendo assim, torna-se necessário estabelecer um procedimento padronizado que assegure a eficiência logística, a manutenção das características físico-químicas do material e a prevenção de contaminantes.

A implementação de boas práticas desde o momento da retirada do esterco nas quintas até a sua chegada à unidade de produção é essencial para maximizar o rendimento energético e prolongar a vida útil do sistema. Nesse contexto, as etapas a seguir descrevem de forma sistemática o processo de colecta e triagem que asseguram processo de biodigestão.

Etapa 1 – Sensibilização e Acordos com Produtores

- ❖ Reuniões com os criadores de gado para explicar:
 - Objectivo do projecto;
 - Benefícios ambientais e possíveis incentivos (monetários, insumos, etc.).
- ❖ Formalização de acordos para entrega regular do esterco.

Etapa 2 – Preparação e Disponibilização de Contentores

- ❖ Instalação de contentores ou caixas colectoras adequadas nas zonas de produção pecuária;
- ❖ Contentores devem ser:
 - De material resistente à corrosão e fácil higienização.
 - Com tampa para evitar odores e moscas.
- ❖ Definição de locais estratégicos dentro da propriedade para facilitar a deposição.

Etapa 3 – Colecta no Local

- ❖ Retirada do esterco directamente das áreas de confinamento ou pasto;
- ❖ Uso de ferramentas adequadas (pás, ancinhos, carrinhos de mão),
- ❖ Depósito imediato nos contentores designados para evitar contaminação com solo, pedras e lixo;

Etapa 4 – Triagem Inicial

- ❖ Remoção de materiais indesejados:
 - Pedras, plásticos, metais, madeira;
 - Resíduos que possam comprometer a biodigestão.
- ❖ Separação de esterco excessivamente misturado com areia ou solo.

Etapa 5 – Armazenamento Temporário na Propriedade

- ❖ Esterco armazenado em local sombreado, ventilado e protegido da chuva;
- ❖ Piso impermeável para evitar infiltração no solo;
- ❖ Drenagem adequada para evitar acúmulo de chorume no entorno;
- ❖ Armazenamento por no máximo 48 horas antes do transporte, para preservar a umidade e a carga bacteriana.

Etapa 6 – Pesagem e Registro

- ❖ Pesagem do esterco antes do transporte para controle de volumes;
- ❖ Registro de:
 - Data da colecta;
 - Quantidade (kg ou toneladas);
 - Origem (nome da quinta/localidade);
 - Observações de qualidade.

Etapa 7 – Transporte até a Unidade de Produção de Biogás

- ❖ Uso de veículos adequados ao transporte de material orgânico;
- ❖ Rota otimizada entre Katembe, Moamba e Boane para reduzir custo e tempo.

4.4. Dimensionamento do Biodigestor

Para garantir uma condição otimizada do percentual de sólidos voláteis ao realizar a alimentação do biodigestor, sendo composto pela mistura dos resíduos alimentares dos Mercados já referidos e do Esterco bovino, estima-se que um percentual de sólidos voláteis na mistura seja na faixa de 15%, pois a presença excessiva de impurezas pode ocasionar danos ao equipamento (PROBIOGÁS, 2015).

4.4.1. Volume diário ocupado pela mistura

Para a determinação do volume ocupado pela mistura (resíduo sólido orgânico + água) considerou-se a densidade de cálculo no valor de 1 kg/L (densidade da água). Como a densidade da mistura é superior ao valor considerado, o valor obtido será superior ao calculado, fazendo com que esse volume adicional seja utilizado como margem de utilização e demanda do biodigestor.

Para a quantidade diária de 6.500 kg de resíduos alimentares e o percentual de 23% m/m de sólidos voláteis, tem-se o seguinte peso diário de sólidos voláteis:

$$\text{Peso Diário de Sólidos Voláteis} = 6.500 \times 0,23 = \mathbf{1.495 \text{ kg SV/dia}}$$

Considerando o valor de sólidos voláteis e levando-se em consideração o percentual estimado de 15% na mistura total para evitar danos na estrutura interna do biodigestor (PROBIOGÁS, 2015), faz-se necessário adicionar a seguinte quantidade de água na mistura:

Peso de Água Adicionado

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{1.495 \text{ kg}}{15\%} \times 85\% \right) - \text{Peso restante dos resíduos} \\ &= \left(\frac{1.495 \text{ kg}}{15\%} \times 85\% \right) - (6500 \text{ kg} - 1495 \text{ kg}) = \mathbf{3.466,67 \text{ kg}} \end{aligned}$$

Dessa forma, o volume de carga diário de mistura adicionado diariamente no biodigestor é de:

$$\begin{aligned} \text{Volume Diário de Sólidos Voláteis} = VC &= \frac{6.500 \text{ kg} + 3.466,67 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} \\ &= \mathbf{9,97 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

4.4.2. Volume do Biodigestor

Com o volume diário da mistura de resíduos (sólidos voláteis), $9,97 \text{ m}^3$, admitindo-se o tempo de detenção de 40 dias e utilizando a Equação (3.4), tem-se:

$$VB_1 = VC \times TDH$$

$$VB_1 = 9,97 \text{ m}^3 \times 40 = \mathbf{398,8 \text{ m}^3}$$

Considerando-se uma proporção de 40% de resíduo alimentar diário para 60% de esterco bovino, obtém-se o seguinte volume do esterco:

Volume do esterco abastecido

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Volume Diário da Mistura de Resíduos Alimentares}}{40} \times 60 \\ &= \frac{9,97 \text{ m}^3}{40} \times 60 = \mathbf{14,955 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Assim, o volume total será a base de comparação para o cálculo das dimensões do biodigestor, ou seja:

$$V_t = 398,8 \text{ m}^3 + 14,955 \text{ m}^3 = \mathbf{413,755 \text{ m}^3}$$

Com as equações da Tabela 3-3, calcula-se com o auxílio do Microsoft Excel, as dimensões que melhor se encaixam a fim de obter um volume próximo ao encontrado acima. Para início dos cálculos, adopta-se os valores para o raio da bolsa plástica “r”, a proporção de fase gasosa desejada “p” onde (Junqueira, 2014), recomenda que se use 0,4 e o comprimento do biodigestor “L”, indicados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Dimensões adotadas para o “r”, “p” e “L”.

Dimensões	Valores adoptados
r	3,0 m
p	0,40
L	16 m

Fonte: (Autor)

O valor do raio “r = 3,0 m” foi escolhido para não ultrapassar a profundidade da fossa; a proporção “p” foi adoptada com 40% utilizada para armazenar biogás e manter

o biodigestor cheio de gás, já que não é prático e viável por condições físicas, uma instalação de biodigestores com proporção “p” que sejam maiores a 40%, pois o volume da fase líquida não será suficiente para manter a campânula cheia de gás, ou seja, elevada dentro do período de detenção, fazendo com que a campânula colapse sobre a fase líquida; e o comprimento “L” é escolhido iterativamente otimizando as dimensões do biodigestor (BOTERO, 2008).

Abaixo segue a Tabela que resume as dimensões do Biodigestor de acordo com as equações especificações anteriores:

Tabela 4-3: Valores dos parâmetros calculados para o Biodigestor (BLC)

Parâmetro	Descrição	Valores
P	Perímetro total transversal (campânula mais fossa)	18,85m
A%	Percentagem do perímetro transversal destinado ao arco	43,46%
b	Lateral, base ou largura menor da fossa	3,55m
a	Largura maior da fossa	5,75m
h	Profundidade da fossa	3,38m
Af	Área transversal da fossa	15,71m ²
At	Área total transversal da fossa mais área transversal da campana	26,19m ²
Ag	Área transversal da campana	10,47m ²
Vt	Volume total do biodigestor (campana mais gás)	418,98m ³
Vf	Volume total da fossa	251,39m ³
Vg	Volume total do gás	167,59m ³

Fonte: (Autor)

4.5. Dimensionamento da caixa de entrada e de saída

As dimensões da caixa de entrada necessitam ser suficientes para que seu volume suporte o volume de carga por dia e este, segundo o (Junqueira, 2014), a caixa de entrada de dejectos deve ter um volume igual ou superior ao da carga diária (9,97 m³), nesse caso a caixa será de **11 m³**. E a caixa de saída deve ter volume igual a três vezes o volume da caixa de entrada, a fim de conseguir conter possíveis acúmulos de biofertilizantes, ou seja, terá um volume de $(9,97 \times 3) = \mathbf{30 \text{ m}^3}$

4.6. Potencial de Geração do metano e Potencial Energético gerado

Como uma tonelada de sólidos voláteis produz cerca de 400 m³ de CH₄ em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), segundo Ferreira (2015), a produção diária de sólidos voláteis é de:

$$\begin{aligned} \text{Volume de CH}_4 &= [(Peso \text{ de resíduos alimentares} \times 0,23) \\ &+ (Peso \text{ de esterco bovino} \times 0,75)] \times 0,4 \\ &= [(6.500 \times 0,23) + (7.650 \times 0,75)] \times 0,4 = \mathbf{2.893 Nm^3 \text{ de CH}_4} \end{aligned}$$

Segundo (CETESB, 2011), há em média 60% de metano no biogás, portanto a produção diária de biogás no biodigestor é de:

$$\begin{aligned} \text{Volume de Biogás} &= \frac{\text{Volume de CH}_4}{60} \times 100 = \frac{2.893}{60} \times 100 \\ &= \mathbf{4.821,67 Nm^3 \text{ de Biogás}} \end{aligned}$$

Assim, o PCI do Biogás considerando 60% de CH₄ dá – se por:

$$\begin{aligned} PCI(\text{Biogás}) &= PCI(\text{CH}_4) \times 0,6 \\ PCI(\text{Biogás}) &= 9,8855 \times 0,6 = \mathbf{5,9313 kWh/m^3} \end{aligned}$$

4.7. Estimativa de Geração de Energia Eléctrica

Como calculado anteriormente, o biodigestor produzirá, em média, 4.821,67 m³ de biogás por dia. Tem-se que a estimativa da conversão de biogás em energia é:

$$\begin{aligned} Pot_{\text{biogás}} &= Q_{\text{biogás}} \times PCI_{\text{biogás}} \times \eta = 4.821,67 \frac{m^3}{Dia} \times \frac{5,9313 kWh}{m^3} \times 0,25 \\ &= \mathbf{7.149,7 kWh/Dia} \end{aligned}$$

Para saber a quantidade de energia eléctrica que será gerada por mês, foi considerado que um mês tem, em média, 30 dias. Dessa forma, encontra-se:

$$Pot_{\text{biogás}} = \frac{7.149,7 kWh}{Dia} \times 30 Dias = \mathbf{214.491 kWh/mês}$$

4.8. Dimensionamento e Selecção do Grupo Gerador

Para seleccionar o grupo gerador adequado, é necessário considerar diversos factores, incluindo a capacidade de produção de biogás, a eficiência de conversão do biogás em energia eléctrica e as perdas que podem ocorrer no processo. O dimensionamento também deve levar em conta o perfil de consumo de energia, com foco em atender a demanda constante e garantir que a energia gerada seja suficiente para abastecer a rede de forma contínua.

A escolha do tipo de motor gerador e a sua eficiência, bem como o cálculo da quantidade necessária de biogás para atingir a produção estimada de energia, são aspectos centrais do dimensionamento. Além disso, a análise de factores como a potência de saída e a consideração de eventuais picos de demanda devem ser feitas para assegurar o bom funcionamento do sistema.

Neste contexto, o dimensionamento do grupo gerador levará em consideração a produção de **7.149,7 kWh/dia**, calculando o consumo de biogás necessário e escolhendo o equipamento ideal para converter esse biogás em energia eléctrica de maneira eficiente.

4.8.1. O Dimensionamento

1. Dados do Sistema:

- ❖ Produção de Biogás: **4.821,67m³**
- ❖ Energia Produzida Estimada: **7.149,7kWh/Dia**
- ❖ Horas de Operação: **24 horas/Dia**
- ❖ Factor de Potência (FP): **0,8**

Como dito anteriormente, a análise e a consideração de eventuais inconveniências devem ser feitas para assegurar o bom funcionamento do sistema. Dois quais, destacam – se:

a) Perdas no Sistema:

As perdas incluem eficiência da conversão do biogás, perdas na geração eléctrica e no sistema de distribuição. Considera – se, em média, **10% de perdas totais** no sistemas.

b) Aumento na Demanda de Energia:

Estima – se um crescimento adicional para um período de 5 anos de cerca de 35% na demanda, que é um valor razoável para expansão futura.

Assim sendo, aplicando estes ajustes, obtemos:

$$\text{Energia Útil} \left(\frac{kWh}{\text{Dia}} \right) = \text{Energia Estimada} \times (1 - \text{Perdas})$$

$$\text{Energia Útil} \left(\frac{kWh}{\text{Dia}} \right) = \frac{7.149,7kWh}{\text{Dia}} \times (1 - 0,10) = \mathbf{6.434,73kWh/Dia}$$

Com o crescimento esperado na demanda, temos que:

$$\text{Energia Requerida} \left(\frac{kWh}{\text{Dia}} \right) = \text{Energia Útil} \times (1 + \text{Crescimento})$$

$$\begin{aligned} \text{Energia Requerida} \left(\frac{kWh}{\text{Dia}} \right) &= \frac{6.434,73kWh}{\text{Dia}} \times (1 + 0,35) \\ &= \mathbf{8.686,9kWh/Dia} \end{aligned}$$

2. Dimensionamento**❖ Cálculo da Potência Média:**

Com base na energia requerida, temos que:

$$\text{Potência Média}(kW) = \frac{\text{Energia Requerida}(kWh/Dia)}{\text{Horas de Operação}}$$

$$\text{Potência Média}(kW) = \frac{\frac{8.686,9kWh}{\text{Dia}}}{\frac{24h}{\text{Dia}}} = \mathbf{361,95kW}$$

Como o factor de potência considerada é de 0,8, temos que a Potência Aparente vale:

$$\text{Potência Aparente}(kVA) = \frac{\text{Potência Média}(kW)}{\text{Factor de Potência}}$$

$$\text{Potência Aparente}(kVA) = \frac{361,95kW}{0,8} = 452,44kVA$$

❖ **Cálculo da Potência do Biogás:**

Considerando um motor com uma eficiência de 42,9%, a potência de biogás necessária para gerar **361,95 kW** de electricidade seria:

$$\text{Potência necessária do biogás} = \frac{361,95kW}{0,42} = 861,78kW$$

Portanto, para gerar a potência necessária de **361.95 kW** com um motor gerador de 42,9% de eficiência, o Sistema precisará de **861.78 kW** de potência de biogás.

❖ **Cálculo do consumo de biogás para alimentar o grupo gerador:**

Agora, para determinar quanto de biogás seria necessário para gerar **861.78 kW** de potência de biogás, considerando um Poder Calorífico Inferior de **5,9313kWh/m³** como mencionado nas secções anteriores, temos que:

$$\text{Quantidade de Biogás necessário (m}^3\text{)} = \frac{\text{Potência necessária do biogás}}{PCI}$$

$$\text{Quantidade de Biogás necessário (m}^3\text{)} = \frac{861,78kW}{\frac{5,9313kWh}{m^3}} = 145,3m^3/h$$

Ou seja, será necessário consumir **145,3 m³** de biogás por hora para alimentar o sistema gerador com a potência necessária. Portanto, este cálculo mostra que com o volume de **4.821,42 m³** de biogás por dia (equivalente à **200,9 m³** de biogás por hora) é mais do que suficiente para suprir a demanda do gerador.

4.8.2. Selecção do Grupo Gerador

Existem vários tipos de Grupo Gerador que podem atender à esta demanda que usam o Biogás como combustível para a sua alimentação, na qual, por meio de pesquisas e comparações entre várias tecnologias, recomenda – se o Grupo Gerador da CATERPILLAR, o modelo **CG132B – 8**. A Figura 4-1 representa uma imagem do modelo seleccionado.

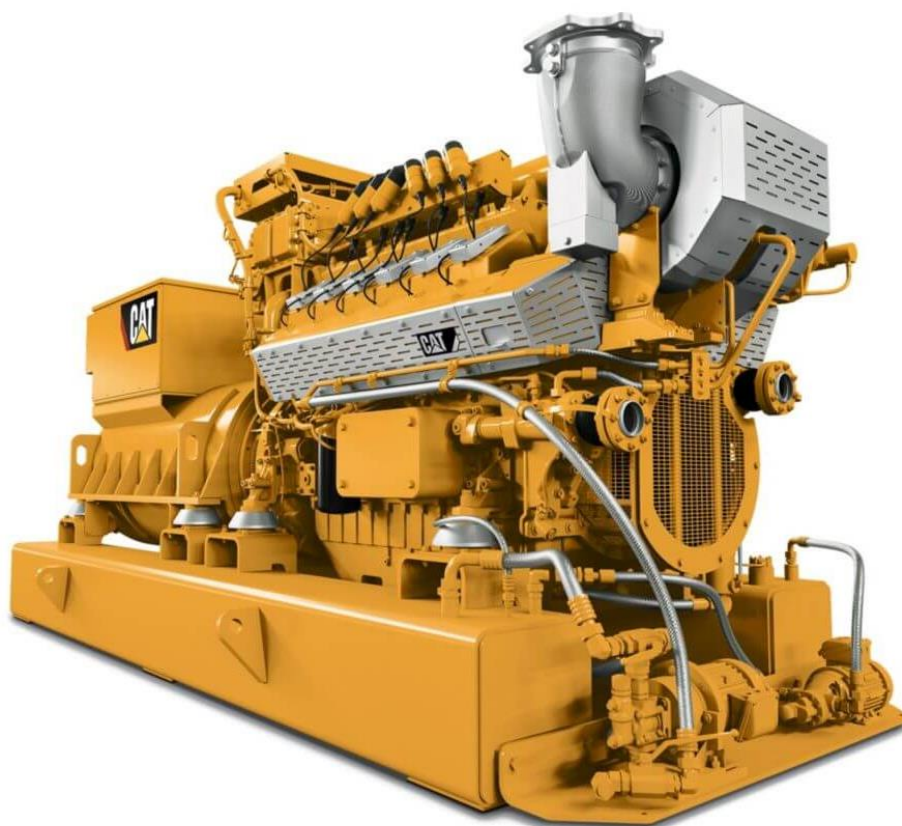


Figura 4-1:Grupo Gerador Modelo CG132B – 8

Fonte: (15)

O **CG132B – 8** é um modelo de grupo gerador projectado para fornecer uma potência confiável em uma variedade de configurações. A tensão gerada por este modelo, de forma padrão, é de **400/230 V** Trifásica, que é uma configuração comum para grupos geradores em escalas industriais. Para as especificações técnicas e parâmetros deste grupo gerador, vide anexo 8.

4.9. Processo de Limpeza do Biogás

Conforme mencionado no capítulo 2, a qualidade do biogás é determinante para a sua aplicação segura e eficiente em sistemas de geração de energia eléctrica. Assim, faz-se necessário integrar ao sistema etapas de tratamento e condicionamento do biogás, com foco na remoção da humidade (secagem) e de contaminantes como o sulfeto de hidrogênio (H_2S).

A seguir são apresentados os métodos escolhidos para o presente estudo, com base na relação entre eficácia, custo, simplicidade operacional e aplicabilidade local.

4.9.1. Secagem por Condensação (Compressão e Resfriamento)

Como visto anteriormente, a secagem por condensação consiste na compressão do biogás à uma pressão moderada (geralmente entre 3 – 8 bar), seguida de um processo de resfriamento controlado que reduz a temperatura do gás até abaixo do seu ponto de orvalho. Esse resfriamento provoca a condensação do vapor de água presente, que é então separado do fluxo de gás. Escolhe – se este método pelos seguintes factores:

- ❖ **Simplicidade e baixo custo de operação**, com equipamentos disponíveis localmente (compressor, trocador de calor, dreno de condensado);
- ❖ **Alta eficiência de remoção de humidade**, especialmente para fluxos médios como os esperados neste sistema;
- ❖ **Redução da corrosividade do biogás**, protegendo componentes metálicos do sistema;
- ❖ **Viabilidade técnica para pequena escala**, sem necessidade de insumos químicos ou materiais importados.

Considerando que o biogás será utilizado em gerador, a secagem é essencial para evitar condensação nas tubulações, corrosão e perda de eficiência. Este método garante humidade residual muito baixa, sem complexidade operacional adicional.

A seguir, mostra – se uma proposta de um sistema de secagem por condensação que visa realizar este mesmo procedimento, com base no compressor e no trocador de calor.

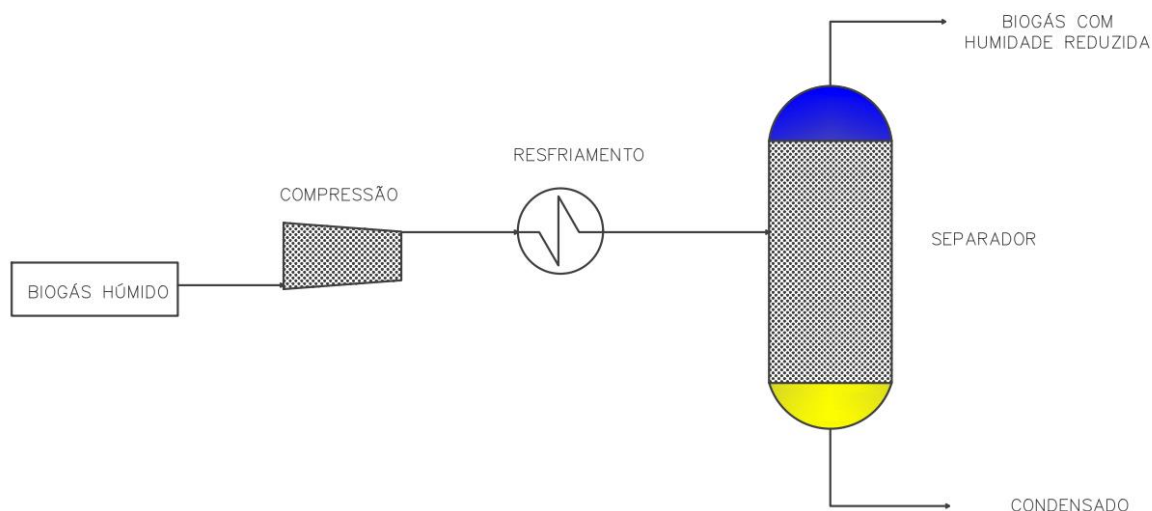


Figura 4-2: Esquema típico para secagem do biogás por condensação

Fonte: (Autor)

4.9.2. Dessulfurização do Biogás por Absorção Química com Fe/EDTA

Conforme visto no capítulo 2, a purificação do biogás é uma etapa crítica para sua valorização energética e ambiental. Dentre os diversos contaminantes presentes, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) destaca-se por sua alta toxicidade, odor desagradável e, principalmente, pela ação corrosiva sobre equipamentos metálicos, como motores de combustão, válvulas e tubulações. Por essa razão, sua remoção é essencial para o uso seguro e durável do biogás.

Dentre os métodos de purificação disponíveis, o processo de absorção química com íons férricos complexados com EDTA ($Fe^{3+}/EDTA$) apresenta-se como uma solução tecnológica de alto desempenho, com viabilidade técnica comprovada de acordo com a Tabela 4-4.

Tabela 4-4.1: Resumo Comparativo dos Métodos de Remoção do H₂S

Critério/ Método	Absorção com Fe/EDTA	Adsorção (Carvão Activado)	Oxidação com Limalha de Ferro	Oxidação Biológica	Lavagem com Solução Alcalina
Eficiência de Remoção	> 99%	70–90%	80–90%	> 95%	70–85%)
Regeneração da Solução/Suporte	Sim, com oxigênio	Não (suporte descartável)	Parcial (reativação limitada)	Sim (meio biológico autorregulado)	Parcial
Subproduto Gerado	Enxofre elementar (útil)	Carvão saturado (resíduo sólido)	Lama sulfatada (descartável)	Enxofre elementar ou sulfatos	Solução residual com sulfetos
Reagente Principal	Fe ³⁺ /EDTA (complexo regenerável)	Carvão activado impregnado	Ferro metálico	Micro-organismos sulfo-oxidantes	Hidróxido de sódio ou similar
Complexidade Operacional	Moderada	Baixa	Baixa	Alta (controle biológico rigoroso)	Baixa
Custo de Operação	Médio (reagente regenerável)	Alto (substituição frequente)	Baixo	Médio	Médio

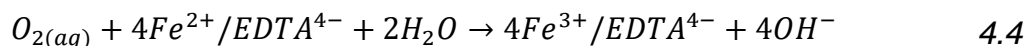
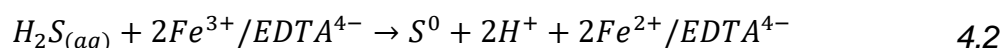
Tabela 4-5.2: Resumo Comparativo dos Métodos de Remoção do H₂S

Aplicabilidade em Pequena Escala	Média (requer controle de pH, O ₂ e recirculação)	Alta (uso simples)	Alta	Média (requer condições ambientais estáveis)	Alta (sistemas compactos)
Aplicabilidade em Média/Grande Escala	Alta	Média	Média	Alta	Média
Impacto Ambiental	Baixo (ciclo fechado + subproduto útil)	Médio (resíduos sólidos contaminantes)	Médio (resíduo ferroso contaminado)	Baixo (processo biológico natural)	Alto (efluente corrosivo com sulfetos)
Requer tratamento de efluentes?	Mínimo (enxofre é sólido e separado)	Sim	Sim	Não (em muitos casos)	Sim
Segurança Operacional	Alta (química controlada)	Alta	Alta	Média (risco de falhas microbiológicas)	Média

Fonte: (Autor)

❖ Princípios Químicos do Processo

O processo de dessulfurização com Fe/EDTA baseia – se numa **reacção de oxidação-redução controlada**, na qual o H_2S presente no biogás é oxidado a **enxofre elementar (S^0)** pela acção do **Fe^{3+} complexado com EDTA** em meio aquoso de acordo com as seguintes equações fundamentais:



Na equação 4.1 está representada a etapa onde ocorre a transferência de massa do componente a ser removido da fase gasosa para a fase líquida. Na equação 4.2, o H_2S já na forma aquosa reage com a solução de $Fe/EDTA$ (Ferro/ Ácido etilenodiaminotetraacético) e o enxofre é convertido para a forma insolúvel. O elemento ferro, inicialmente com carga +3, é levado à uma carga igual a +2, ou seja, é reduzido e se torna inactivo. O composto $Fe^{2+}/EDTA$ é regenerado e o elemento ferro é convertido em forma férrica pela oxidação da solução com oxigênio de acordo com as reacções apresentadas nas equações 4.3 e 4.4.

Assim, o quelato de ferro ($Fe/EDTA$) pode ser considerado um pseudocatalisador na reacção do H_2S com o oxigênio. O enxofre produzido é facilmente recolhido e pode ser comercializado.

A imagem a seguir, adaptada de (Frare, L.M. et al, 2009) apresenta o layout operacional do processo de purificação do biogás por meio da absorção.

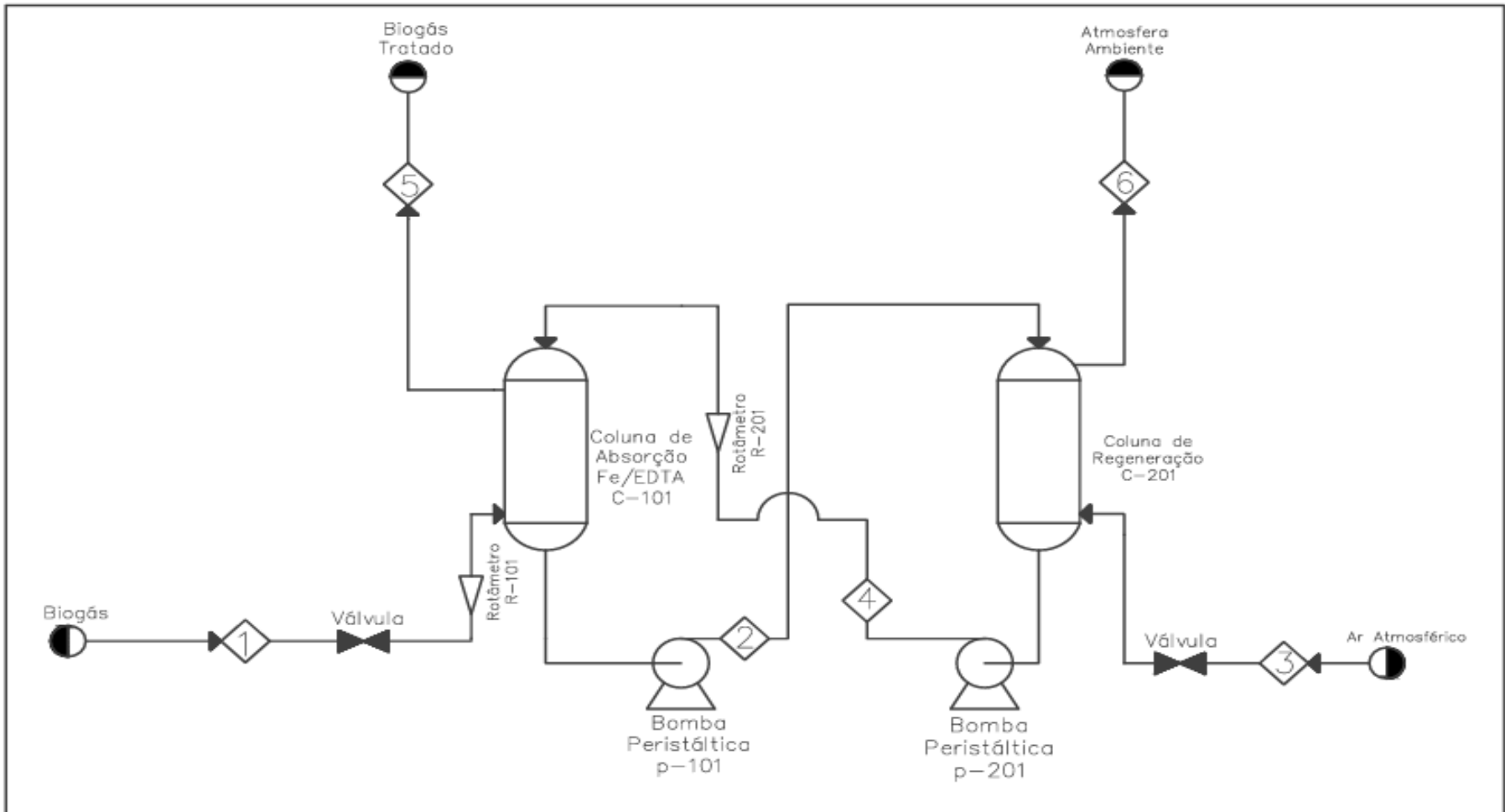


Figura 4-3: Layout do processo de purificação do Biogás por Absorção

Fonte: (Adaptado de Frare, L.M. et al, 2009)

A etapa de absorção com reacção química para a remoção do ácido sulfídrico ocorre na coluna de absorção $Fe/EDTA$ C-101 onde o biogás reage com a solução de $Fe^{3+}/EDTA$ devido ao contacto das correntes em fluxo. Tanto a corrente de biogás (corrente 1) quanto a de solução reagente (corrente 4) possuem as mesmas vazões controladas pelas válvulas e quantificadas pelos rotâmetros R-101 e R-201, respectivamente. Para realizar a solubilização do biogás na fase líquida, foi instalado um dispersor de gás na base da coluna C-101.

Após o processo reaccional, no topo da coluna C-101 é obtido o biogás tratado sem a presença de ácido sulfídrico (corrente 5) e, na base da coluna, a solução $Fe^{2+}/EDTA$ (corrente 2) que deve ser regenerada para ser novamente utilizada é enviada para a coluna de regeneração C-201 onde passa pelo processo de regeneração pelo contacto em contra-corrente com o ar atmosférico proveniente de um compressor instalado na base da sua coluna com as mesmas características do instalado na base da coluna C-101 para realizar a dispersão do ar atmosférico na solução. O recalque das soluções $Fe^{3+}/EDTA$ e $Fe^{2+}/EDTA$ contidas nas correntes 2 e 4 é realizado com o auxílio das bombas peristálticas P-101 e P-201.

CAPÍTULO V: RESULTADOS E DISCUSSÕES

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Potencial Energético do Biogás e Combustíveis Fósseis

Com uma produção estimada de **4.821,67 m³** de biogás por dia, equivalente a **7.149,7 kWh/dia** de energia eléctrica, torna-se essencial comparar o desempenho energético e a viabilidade ambiental do biogás com combustíveis fósseis tradicionais, como gás natural, diesel, gasolina e etc.

A análise do poder calorífico inferior (PCI) evidencia que o biogás com teor de 60% de metano apresenta um PCI médio de 22 MJ/Nm³, o que corresponde a cerca de 55–75% do valor energético do gás natural ou biometano (≈ 39 MJ/Nm³). Embora à primeira vista pareça menos vantajoso em termos energéticos por unidade de volume para entregar a mesma energia, a sustentabilidade e a economia no longo prazo colocam o biogás em uma posição estratégica para geração de energia eléctrica. A Figura 5-1 ilustra a comparação directa entre o PCI do biogás e o de diferentes combustíveis fósseis.

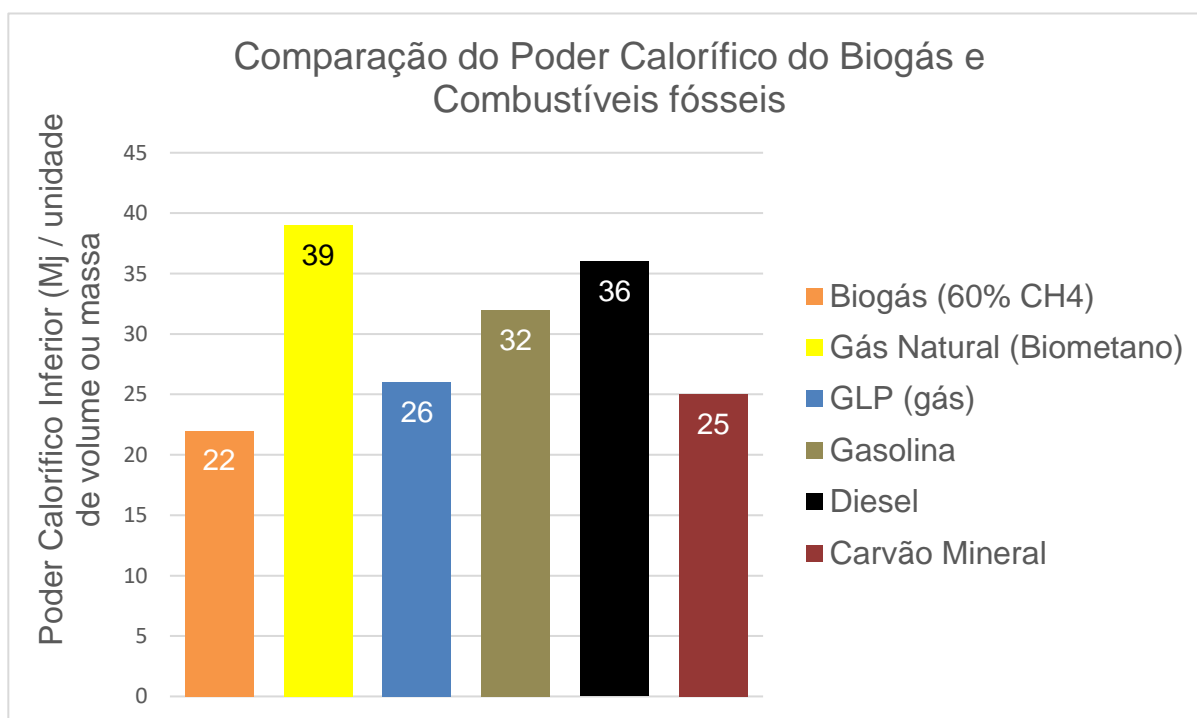


Figura 5-1: Comparação do PCI do Biogás e Combustíveis fósseis

Fonte: (Autor)

Ambientalmente, o biogás é a escolha mais sustentável. Enquanto combustíveis fósseis contribuem significativamente para emissões de CO₂ e outros gases de efeito de estufa, o biogás reaproveita metano, reduzindo seu impacto ambiental. Adicionalmente, a produção e utilização do biogás têm emissões líquidas quase nulas, enquanto diesel e gasolina têm impacto elevado em termos de carbono.

Economicamente, o biogás oferece vantagens a longo prazo. Seu custo inicial de instalação é compensado por menores despesas operacionais e maior estabilidade de preços em comparação com combustíveis fósseis, que são influenciados por factores globais. Além disso, o biogás promove benefícios sociais, como geração de empregos e redução de resíduos em áreas urbanas e rurais. A Figura 5-2, trás uma comparação entre esses combustíveis para a mesma quantidade de energia eléctrica gerada.

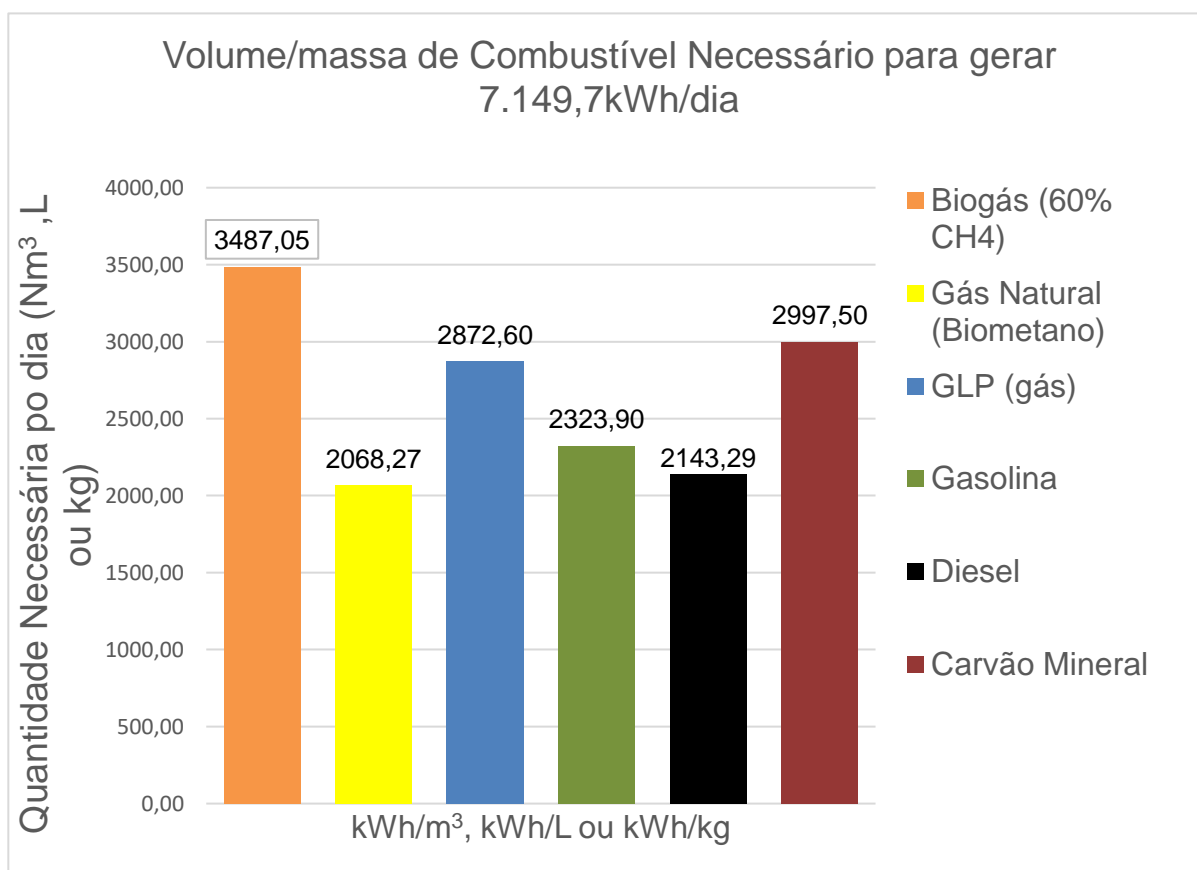


Figura 5-2: Volume/massa de Combustível necessário

Fonte: (Autor)

5.2. Estimativa da área ocupacional

O espaço necessário para instalar um biodigestor de 413,77m³ depende de vários factores, incluindo o *design*, a profundidade e a largura da lagoa coberta. Geralmente, a área ocupada é calculada considerando o volume do biodigestor, a proporção de profundidade e o espaço adicional para a infraestrutura e operações.

5.2.1. Cálculo aproximado do Espaço a ocupar

Com base nos dados da Tabela 4-3, temos que a profundidade da fossa é de **h = 3,38 m**, portanto, a área da base necessária pode ser calculada dividindo o volume do biodigestor pelo valor da profundidade:

$$\text{Área base (m}^2\text{)} = \frac{\text{Volume (m}^3\text{)}}{h} = \frac{413,77\text{m}^3}{3,38\text{m}} \cong \mathbf{122\text{m}^2}$$

Deve – se adicionar espaços para:

- ❖ Acesso e canais de alimentação e descarga;
- ❖ Infraestrutura de suporte, como cobertura, sistema de colecta de gás, lagoas de tratamento secundário e casa de máquina.

Portanto, um biodigestor de 413,77m³, com profundidade de 3,38m pode ocupar uma área total de aproximadamente **150 à 200m²**.

5.3. Avaliação Socioeconômica e Ambiental

5.3.1. Análise Socioeconômica

A análise socioeconômica da implementação deste sistema leva em conta vários aspectos, dos quais, são discutidos a seguir:

1. Geração de Energia Eléctrica e Redução de Custos

❖ Situação Actual:

Em Katembe, o acesso à energia eléctrica é limitado e, em muitos casos, intermitente. Famílias frequentemente dependem de geradores a diesel, que têm altos custos operacionais e impacto ambiental negativo. A EDM (Electricidade de Moçambique) enfrenta desafios para atender à toda a demanda, especialmente em regiões em desenvolvimento como Katembe.

❖ **Situação Pós-Implementação:**

A média de consumo diário de energia eléctrica por família em Moçambique pode variar bastante dependendo da categoria tarifária e do perfil de uso. Pelos dados disponíveis da Electricidade de Moçambique (EDM), famílias de baixa renda que utilizam a tarifa social têm um limite de consumo de até 125 kWh por mês, o que equivale a aproximadamente 4,17 kWh por dia. Já para consumidores domésticos comuns, o consumo médio mensal pode alcançar até 300 kWh (10 kWh/dia), com variações dependendo do número de equipamentos e do uso da electricidade em cada residência.

Portanto, com uma capacidade de geração de **214.491 kWh/mês**, o sistema de biogás pode atender diretamente cerca de **1.715 famílias** (considerando um consumo médio de **125 kWh/mês** por família). Isso não apenas reduz a dependência das famílias por combustíveis fósseis, mas também alivia a pressão sobre a rede da EDM, permitindo uma distribuição mais eficiente para outras áreas.

2. Criação de Empregos

A implementação do sistema gera oportunidades em várias fases:

- ❖ **Construção e Instalação:** Empregos temporários para técnicos, engenheiros e trabalhadores da construção civil.
- ❖ **Operação e Manutenção:** Criação de postos fixos para operadores do sistema e manutenção do biodigestor.
- ❖ **Logística de Resíduos:** Empregos para a colecta e transporte de resíduos alimentares e esterco bovino.

3. Desenvolvimento Local e Iluminação Pública

❖ **Impacto na Iluminação Pública:**

A energia gerada permitirá expansão da rede de iluminação em bairros, aumentando a segurança e incentivando actividades económicas noturnas.

❖ **Promoção de Negócios Locais:**

O fornecimento estável de energia impulsionará pequenos negócios, como oficinas, mercearias e estabelecimentos de serviços.

4. Substituição de Alternativas Não Renováveis

❖ Geradores a Diesel:

A substituição do diesel pelo biogás reduz emissões de CO₂, diminui os custos operacionais para os moradores e melhora a qualidade do ar.

❖ Acessibilidade Energética:

Casas que anteriormente usavam soluções precárias, como lanternas a querosene, terão acesso à energia eléctrica limpa e confiável.

5. Benefícios da Gestão de Resíduos

❖ Valorização dos Resíduos:

Mercados como Zimpeto e Malanga passam a ter maior interesse na separação e fornecimento de resíduos, que ganham valor como matéria-prima para o sistema de biogás. Isso incentiva uma economia circular, beneficiando vendedores e operadores de mercados e o público em geral.

❖ Redução da Poluição:

A destinação adequada de resíduos diminui a poluição do solo e água, melhorando a qualidade de vida na região.

6. Benefícios Adicionais

❖ Educação Ambiental:

Campanhas de conscientização incentivarão práticas de descarte sustentável, beneficiando a comunidade a longo prazo.

❖ Capacitação Profissional:

Treinamentos para operação do sistema e colecta de resíduos criarão mão-de-obra especializada.

❖ Economia Regional:

O biogás pode ser usado em outras aplicações, como aquecimento, gerando novos mercados em Katembe.

5.3.2. Análise Ambiental

A implementação de um sistema de biogás em Katembe apresenta significativos benefícios ambientais, promovendo práticas sustentáveis e mitigando os impactos negativos associados ao descarte inadequado de resíduos orgânicos e à dependência de combustíveis fósseis. A seguir, serão abordados os principais aspectos ambientais relacionados a esta iniciativa, avaliando tanto os impactos positivos quanto os potenciais desafios associados.

1. Redução da Emissão de Gases de Efeito de Estufa

A utilização de biogás para a geração de energia Eléctrica reduz consideravelmente as emissões de metano (CH_4) provenientes da decomposição Anaeróbia de resíduos orgânicos em aterros. O metano é um gás com um potencial de aquecimento global 28 a 34 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO_2) em um horizonte de 100 anos. Ao capturar e utilizar este gás para produção energética, o sistema contribui para mitigar as mudanças climáticas. Além disso, a substituição de combustíveis fósseis, como diesel e gasolina, pelo biogás reduz a emissão de dióxido de carbono derivado da queima desses combustíveis, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar.

2. Gestão Sustentável de Resíduos

A implementação do sistema auxilia na gestão eficiente dos resíduos alimentares provenientes de mercados e dos esterco dos bovinos. Em vez de serem descartados de maneira inadequada, os resíduos alimentares e esterco bovinos são transformados em recursos valiosos, como energia e fertilizantes naturais (biofertilizantes).

Essa prática reduz a pressão sobre aterros sanitários, minimizando a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Ademais, evita-se a proliferação de vectores de doenças e o mau cheiro decorrente do acúmulo de resíduos orgânicos.

3. Produção de Biofertilizantes

O sistema gera biofertilizantes como subproduto, que podem ser utilizados para enriquecer os solos da região, promovendo a agricultura sustentável. O uso de biofertilizantes contribui para a redução da necessidade de fertilizantes químicos, que são associados à degradação do solo e à contaminação de corpos hídricos por lixiviação.

4. Conservação de Recursos Naturais

Ao substituir o uso de lenha e carvão por energia eléctrica gerada pelo biogás, o projecto contribui para a preservação das florestas ao diminuir o desmatamento, prática comum para obtenção desses combustíveis. Essa preservação é crucial para a biodiversidade e para a manutenção dos ciclos hídricos locais.

5. Potenciais Riscos e Medidas Mitigadoras

Embora o sistema de biogás apresente diversos benefícios, é essencial considerar possíveis desafios ambientais, como:

- ❖ **Odor:** Durante a colecta e o transporte de resíduos orgânicos, pode haver emissão de odores desagradáveis. Medidas como a vedação adequada podem minimizar esse problema.
- ❖ **Contaminação Acidental:** O manejo inadequado do digestato ou vazamentos podem causar contaminação ambiental. Um plano de gestão rigoroso e a construção de infraestruturas seguras são fundamentais.
- ❖ **Uso de Água:** O sistema demanda uma quantidade significativa de água, especialmente na fase de digestão Anaeróbia. Soluções como o reaproveitamento de águas residuais podem mitigar esse impacto.

Deste modo, a implementação do sistema de biogás em Katembe transcende a geração de energia eléctrica. Ele promove desenvolvimento econômico, sustentabilidade ambiental e impacto social directo, posicionando Katembe como um exemplo de integração energética e gestão de resíduos no contexto de Moçambique. O projecto beneficia famílias, negócios e infraestrutura, criando um modelo replicável em outras áreas do país.

5.4. Análise Financeira

- ❖ **Investimento Inicial:** O investimento inicial inclui os custos de construção da Central, aquisição de equipamentos, capital de giro e outros custos pré-operacionais;
- ❖ **Custos de Produção:** Os custos de produção incluem os custos variáveis (matéria-prima, mão de obra directa) e os custos fixos (salários indirectos, depreciação, aluguel);

- ❖ **Receitas:** As receitas serão geradas pela venda da energia eléctrica. A projecção de receitas deve considerar o preço de venda, a capacidade de produção e a demanda de mercado
- ❖ **Fluxo de Caixa:** O fluxo de caixa projectará as entradas e saídas de caixa do Sistema de Biogás ao longo do tempo, permitindo avaliar a capacidade de gerar caixa para cobrir os custos e gerar lucro.

5.4.1. Valor de Implementação do Sistema e Suas Implicações

A implementação do sistema de biogás em Katembe requer investimentos significativos em infraestrutura, equipamentos e logística. Estes custos, também denominados custos de capital (CAPEX – Capital Expenditure), são fundamentais para avaliar a viabilidade do projecto e devem ser devidamente detalhados. A Tabela 5-1 apresenta uma estimativa dos principais componentes do investimento, expressos em dólares norte-americanos (USD) e em meticais (MZN).

Tabela 5-1: Estimativa do Custo de Implementação do Sistema

Item	Custo (USD)	Custo (MZN)*
Infraestrutura civil e acessos	39.375,00	2.520.000,00
Biodigestor e Tecnologias de conversão	176.625,00	11.304.000,00
Unidade de purificação e condicionamento	23.437,5	1.500.000,00
Colecta e logística	106.250,00	6.680.000,00
Sub - Total	343.812,5	22.004.000,00
Projecto e Engenharia (10%)	34.381,25	2.200.400,00
TOTAL	378.193,75	24.204.400,00

Fonte: (Autor, Câmbio usado na conversão: 1 USD = 64 MZN)

5.4.2. Análise das Potenciais Receitas do Sistema

❖ Venda de Energia Eléctrica

A tarifa de energia eléctrica doméstica em Moçambique, conforme os últimos dados, varia conforme o consumo mensal e é categorizada em três faixas de consumo. Para o consumo de até 300 kWh por mês, a tarifa é de 6,00 MT/kWh. Para consumo entre 301 e 500 kWh, o valor sobe para 8,49 MT/kWh, e para consumos superiores a 500 kWh, a tarifa chega a 8,91 MT/kWh. Em sistemas pré-pagos, os valores podem ser

um pouco mais altos, variando de 7,64 MT/kWh a 9,32 MT/kWh, dependendo da faixa de consumo.

Dessa forma, a geração mensal de energia eléctrica (considerando uma tarifa de 7,64 MT/kWh) representaria um retorno financeiro mensal de:

$$\text{Retorno Mensal (MT)} = \frac{214.491kWh}{\text{mês}} \times \frac{7.64MT}{kWh} = \mathbf{1.638.711,24MT}$$

Geralmente, para projectos de energias renováveis, a percentagem que um produtor pode ganhar no contrato com a EDM dependerá das negociações do PPA (Power Purchase Agreement) , mas os termos do contracto são frequentemente confidenciais e podem ser ajustados conforme os interesses de ambas as partes. Desta feita, considerando um caso mais crítico seja estabelecido uma percentagem de 65% do retorno mensal, assim sendo:

$$\text{Retorno Mensal (MT)} = 1.638.711,24MT \times 0,65 = \mathbf{1.065.162,15MT}$$

Anualmente, o Sistema teria como retorno um valor de:

$$\text{Retorno Anual (MT)} = 1.065.162,15MT \times 12 = \mathbf{12.781.946MT}$$

❖ **Potenciais Receitas Indirectas (não monetizadas no fluxo de caixa)**

- Biofertilizante usado como moeda de troca garante fornecimento estável de esterco sem custo directos para o projecto.
- Redução de emissões de metano em aterros: pode ser incorporada em projectos de sustentabilidade municipal.
- Parcerias institucionais (municípios, ONGs ambientais) podem trazer subsídios ou isenções fiscais.

5.4.3. Estudo da Viabilidade Económica

O estudo da viabilidade económica pode ser encontrada no anexo 9, no qual, é possível obter os seguintes indicadores financeiros para o estudo da sua viabilidade:

Tabela 5-2: Indicadores Financeiros

Indicadores	
VAL	23.286.789,00 MZN
TIR	24,78%
RBC	1,96
PAYBACK	4 Anos

Fonte: (Autor)

❖ **Valor Actual Líquido (VAL): 23.286.789,00 MZN**

O VAL positivo e elevado indica que o projecto gera retorno adicional acima do custo de oportunidade (10%) e isso mostra que o investimento não só se paga, mas também cria valor para o investidor.

❖ **Taxa Interna de Retorno (TIR): 24,78%**

A TIR indica a rentabilidade anual esperada do projecto. Como é superior à taxa mínima de atractividade (10%), o investimento é considerado com alta rentabilidade

❖ **Razão Benefício-Custo (RBC): 1,96**

Para cada 1 MZN investido, há retorno de quase 2 MZN em benefícios líquidos. Valores de RBC acima de 1 indicam viabilidade econômica; um valor próximo de 2 mostra uma margem de segurança confortável.

❖ **Payback: 4 anos**

O investimento será recuperado em 4 anos. Este prazo é compactível com a vida útil do projecto, garantindo que os recursos aplicados retornem em tempo adequado.

CAPÍTULO VI: CONSIDERAÇÕES FINAIS

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentam-se as limitações do estudo, as conclusões resultantes da investigação, bem como um conjunto de recomendações que visam orientar futuras iniciativas semelhantes e o aprimoramento do projecto. Por fim, são elencadas as referências bibliográficas que sustentaram o desenvolvimento deste trabalho, garantindo a fundamentação teórica, técnica e científica das análises realizadas.

6.1. Limitações

Apesar da robustez metodológica e dos resultados favoráveis obtidos, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na sua interpretação e na aplicação prática das conclusões:

- ❖ **Dados de Disponibilidade e Caracterização da Biomassa:** As estimativas de geração de resíduos alimentares e esterco bovino foram baseadas em levantamentos prévios e em informações disponíveis na literatura. Entretanto, a ausência de medições contínuas ao longo de vários anos limita a precisão na caracterização da sazonalidade da biomassa;
- ❖ **Escassez de dados laboratoriais locais:** A caracterização físico-química dos substratos (teor de sólidos totais, sólidos voláteis, poder calorífico, entre outros) baseou-se, em parte, em valores de referência internacionais, devido à limitação de análises laboratoriais locais. Isso pode introduzir pequenas variações nos cálculos de potencial de biogás e de energia;
- ❖ **Infraestrutura e custos de implantação:** Embora a análise econômica tenha sido realizada com valores adaptados à realidade moçambicana, os custos efectivos de equipamentos e infraestrutura podem sofrer variações devido à volatilidade cambial, políticas de importação, taxas alfandegárias e logística de transporte, que não foram considerados em detalhe.
- ❖ **Resistência dos stakeholders:** Criadores de gado e mercados têm resistência à mudanças e podem não estar dispostos a colaborar plenamente com o projecto, o que impacta a eficácia da colecta de resíduos;

6.2. Conclusão

O estudo demonstrou a viabilidade técnica, ambiental, social e econômica da implementação de um sistema de biogás em Katembe, a partir da co-digestão de resíduos alimentares dos mercados de Zimpeto e Malanga com esterco bovino proveniente de Boane, Magude e Marracuene. Verificou-se que os substratos apresentam composição adequada e disponibilidade suficiente, assegurando a estabilidade do processo de digestão anaeróbia e um potencial energético de cerca de 7.149,7 kWh/dia.

A análise da sustentabilidade mostrou benefícios ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito de estufa e a valorização do digestato; impactos sociais positivos, com geração de empregos e inclusão comunitária; e vantagens econômicas na gestão de resíduos e redução de custos agrícolas.

Os métodos de purificação propostos — secagem por condensação e dessulfurização por absorção com Fe/EDTA — foram considerados adequados pela eficiência e simplicidade de operação. Do ponto de vista financeiro, os resultados confirmaram a atractividade do projecto, com VPL de 23.286.789 MZN, TIR de 24,87%, Payback de 4 anos e RBC de 1,96, comprovando que o investimento é sustentável e competitivo.

Conclui-se, portanto, que a adopção do sistema de biogás representa uma alternativa estratégica para a gestão de resíduos orgânicos e a produção de energia eléctrica renovável em Moçambique.

6.3. Recomendações

Para melhorar a implementação do projecto de geração de energia através de biogás, diversas abordagens podem ser adoptadas. As recomendações a seguir visam otimizar a eficiência do processo, garantir a sustentabilidade e potencializar os benefícios sociais e ambientais.

- ❖ **Gestão da Colecta:** É essencial estruturar pontos de colecta organizados nos mercados, com logística definida para transporte e armazenamento temporário, de modo a assegurar eficiência e qualidade da biomassa colectada;
- ❖ **Outras fontes Orgânicas:** Recomenda – se a exploração de outras fontes orgânicas disponíveis, além dos considerados neste trabalho. Substratos como esterco suíno, os resíduos aviários, agroindustriais e resíduos de outros mercados municipais apresentam elevado potencial de produção de biogás e podem ser incorporados neste sistema, ampliando a eficiência e a produtividade do processo.
- ❖ **Capacitação Técnica:** Recomenda-se a realização de treinamentos regulares para operadores e técnicos locais, com foco em boas práticas de manejo da biomassa, operação dos biodigestores e manutenção dos sistemas de purificação (secagem por condensação e absorção com Fe/EDTA);
- ❖ **Sustentabilidade Econômica:** Sugere-se a busca activa por linhas de financiamento voltadas para energias renováveis e parcerias público-privadas, de forma a reduzir o peso do investimento inicial. Além disso, a venda da energia eléctrica deve ser formalizada em contractos com a EDM ou outras instituições consumidoras, assegurando receita estável;
- ❖ **Educação e Sensibilização:** Recomenda-se a implementação de campanhas de sensibilização ambiental junto à comerciantes, consumidores e comunidades locais, destacando a importância da separação de resíduos e os ganhos colectivos com o aproveitamento energético da biomassa.

Sugere-se a replicação do modelo em outras regiões de Moçambique com disponibilidade de biomassa, adaptando a escala de produção conforme a realidade local, para maximizar os benefícios ambientais e sociais.

6.4. Referências Bibliográficas

- (1) ANEEL. Balanço Energético Nacional – BEN, Brasília: MME, 1982 - adaptado por CENBIO;
- (2) ATLAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS DE MOÇAMBIQUE (2020);
- (3) Coelho, Suani. 2018 -Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano, Brasil, São Paulo;
- (4) Júnior, Zeferino. 2022 – Análise das propriedades do biogás produzido através de diferentes substratos provenientes do mercado grossista do Zimpeto. Moçambique, Maputo;
- (5) Anastácio, Mércia. 2010 – Produção de Energia na Forma de Biogás a partir de Resíduos Animais para o Desenvolvimento Rural, Tese de Mestrado. Porto;
- (6) Renneberg, Reinhard. Biotechnology for beginners.AP ,páginas:173-179;
- (7) Steinhauer, Dieter Deublein and Angelika. 2008 – BIOGAS from Waste and Renewable Resources. Wiley-vch, páginas:9-13,100-119;
- (8) Maroun, Christianne. 2006 – Manual de Gerenciamento de Resíduos: Guia de Procedimento passo a passo. Rio de Janeiro: GMA;
- (9) Airton, Kunz; et al. 2019 – Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato, Concórdia;
- (10) Cassini, S. T; Coelho, S. T; Pecora, V – Biogás – Biocombustíveis ANP. In: Carlos Augusto G. Perlingeiro. (Org.). Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspect;
- (11) Vanessa Pecora Garcilasso, Antônio Djalma Nunes Ferraz Junior, Marilyn Mariano dos Santos e Caio Luca Joppert. 2018 – Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano : Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo: IEE-USP;
- (12) Cesar, Paulo. 2021 – Dimensionamento e avaliação do potencial energético de um biodigestor anaeróbio do tipo canadense a partir de resíduos alimentares do restaurante de uma indústria e do lodo da ETE, Recife;
- (13) Tommy, Karlsson. 2014 - Manual Básico de Biogás, Lajeado;
- (14) Tolêdo, Talles José. 2023 – Potencial energético do biogás produzido a partir de esterco bovino e bagaço da cana-de-açúcar no estado de alagoas, Rio Largo;
- (15) CAT Gas Power. 2024 – Smarter energy Solutions;

- (16) Neves, g. N., carneiro, t. F., berni, m. 2015 – Desempenho do reator anaeróbico mesofílico seco de resíduo alimentar como perspectiva de aproveitamento energético. Porto Alegre: Agrener;
- (17) Probiogás. 2015 – Tecnologias de Digestão Anaeróbia com Relevância para o Brasil, 1ª edição, Ministério das Cidades, Brasília;
- (18) Pereira, I. A. S. P. S. S. 2017 – Estudo, Modelagem e Caracterização de Processos de Biodigestão com Monitoramento e Controle de Temperatura. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Ilha Solteira, p. 102;
- (19) Tinga, Leida Fernando. 2022 – Gestão e tratamento de Resíduos Orgânicos Provenientes do Mercado Grossista do Zimpeto, Maputo;
- (20) Mosca, João. 2024 – Produção Bovina: Causas dos Sucessos e Desafios. Moçambique, Maputo;
- (21) Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental. 2012 – Estratégias de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos em Moçambique. Maputo;
- (22) Bonturi, G, Van Dijk, M. 2012 – Instalação de Biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. Revista Ciências do Ambiente, V.8, P. 88 – 95.

ANEXOS

Anexo 1 - Fluxograma das Etapas e Fases de Produção do Biogás

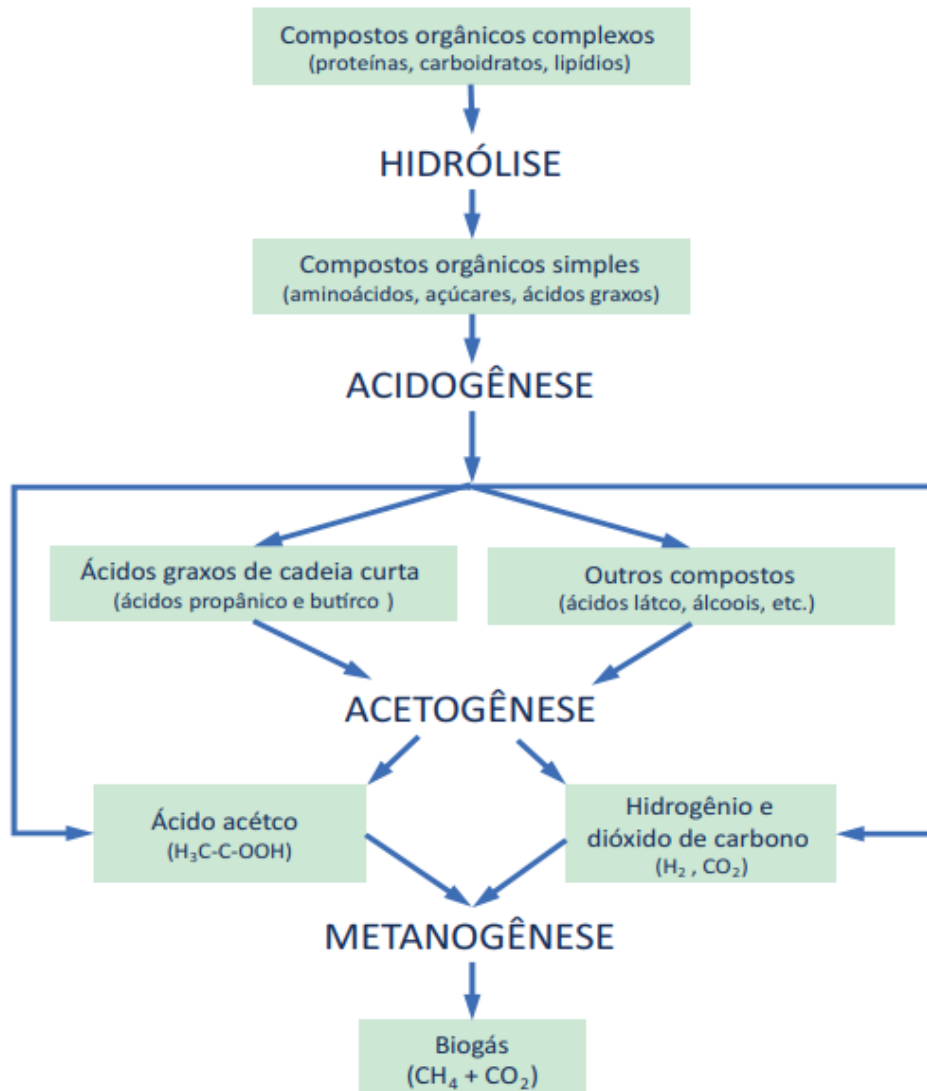


Figura A1-1: Etapas da Produção do Biogás

Fonte: (5)

Anexo 2 - Fluxograma de Triagem de Resíduos Sólidos

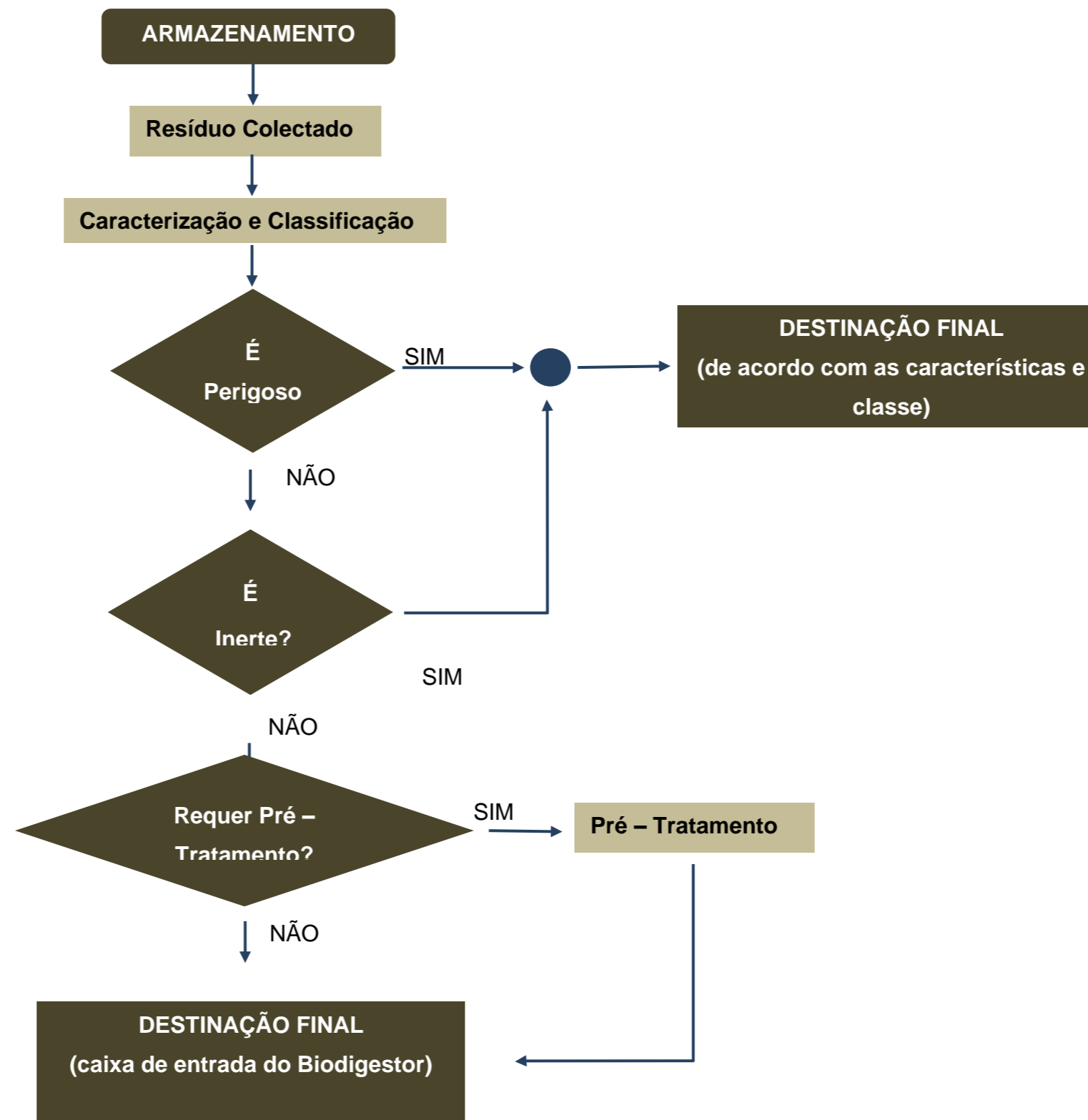


Figura A2-2: Fluxograma de Triagem de Resíduos Sólidos

Fonte: Autor

Anexo 3 – Cores das Lixeiras recicláveis CONANA 275/01











PADRÃO DE CORES CONAMA 275/01		AMARELO	Metal		MARROM	Resíduos Orgânicos
		AZUL	Papel / Papelão		PRETO	Madeira
		BRANCO	Resíduos Ambulatoriais e de Serviços de Saúde		ROXO	Resíduos Radioativos
		CINZA	Resíduo Geral*		VERDE	Vidro
		LARANJA	Resíduos Perigosos		VERMELHO	Plástico

Figura A3-3: Padrão das Cores

Fonte: (8)

Anexo 4 - Relação entre o consumo de biogás e a eficiência do sistema

Tabela A4-4: Relação entre o consumo do biogás e a eficiência do sistema

Potência do Motor (kVA)	Potência do Motor (kW)	75% de Metano – PCI 6.500 kcalN/m ³		75% de Metano – PCI 6.000 kcalN/m ³		65% de Metano – PCI 5.500 kcalN/m ³		60% de Metano – PCI 5.500 kcalN/m ³		53% de Metano – PCI 4.500 kcalN/m ³	
		Consumo Nm ³ /h	Eficiência a kWh/Nm ³	Consumo Nm ³ /h	Eficiência a kWh/Nm ³	Consumo Nm ³ /h	Eficiência a kWh/Nm ³	Consumo Nm ³ /h	Eficiência a kWh/Nm ³	Consumo Nm ³ /h	Eficiência a kWh/Nm ³
30	20	12	1,69	13	1,56	14	1,43	15	1,30	17	1,17
50	32	17	1,87	19	1,72	20	1,58	22	1,44	24	1,29
80	55	29	1,90	31	1,75	34	1,60	38	1,45	42	1,31
120	77	40	1,95	43	1,80	47	1,65	51	1,50	57	1,35
250	160	63	2,53	69	2,33	75	2,14	82	1,94	91	1,75
330	211	82	2,58	89	2,38	97	2,18	106	1,99	118	1,79
420	260	100	2,59	709	2,40	118	2,20	130	2,00	145	1,80

Fonte: (Autor)

Anexo 5 – Relação dos Mercados por Distrito Municipal

Tabela A5-5: Relação dos Mercados por Distrito Municipal

Distrito Municipal Ka Nhlamankulu		Distrito Municipal Ka Maxaquene	
Nº	Mercado	Nº	Mercado
1	Xipamanine Formal	1	Mazambane
2	Xipamanine Informal	2	Khalene Formal
3	Xipamanine Bazuca	3	Khalene Informal
4	Malanga Formal	4	1º de Maio
5	Malanga Informal	5	Chai
6	Fajardo Formal	6	Mafalala
7	Fajardo Informal	7	Feira de Maxaquene
8	Lhanguene	8	Maxaquene
9	Vulcano	9	1º de Agosto
10	7 de Abril	10	Peixe
Distrito Municipal Kamavota		Distrito Municipal Kamubukwana	
Nº	Mercado	Nº	Mercado
1	Praça dos Combatentes	1	Grossista do Zimpeto
2	Muchapo	2	Matendene
3	Hulene	3	Malhazine
4	Laulane I	4	George Dimitrov
5	Laulane II	5	Inhagoia
6	Ferroviário	6	Jardim
7	Polana Caniço	7	Luis Cabral
8	1 de Junho	8	Mbuzine
9	Romão	9	10 de Novembro
10	Albasine	10	Unidade 7
11	Magoanine A	11	Drive in
12	Magoanine B	12	25 de Junho
		13	Volante 6

Fonte: Autor

Anexo 6 - Efectivos bovinos do sector familiar por classes em 2013 e 2023

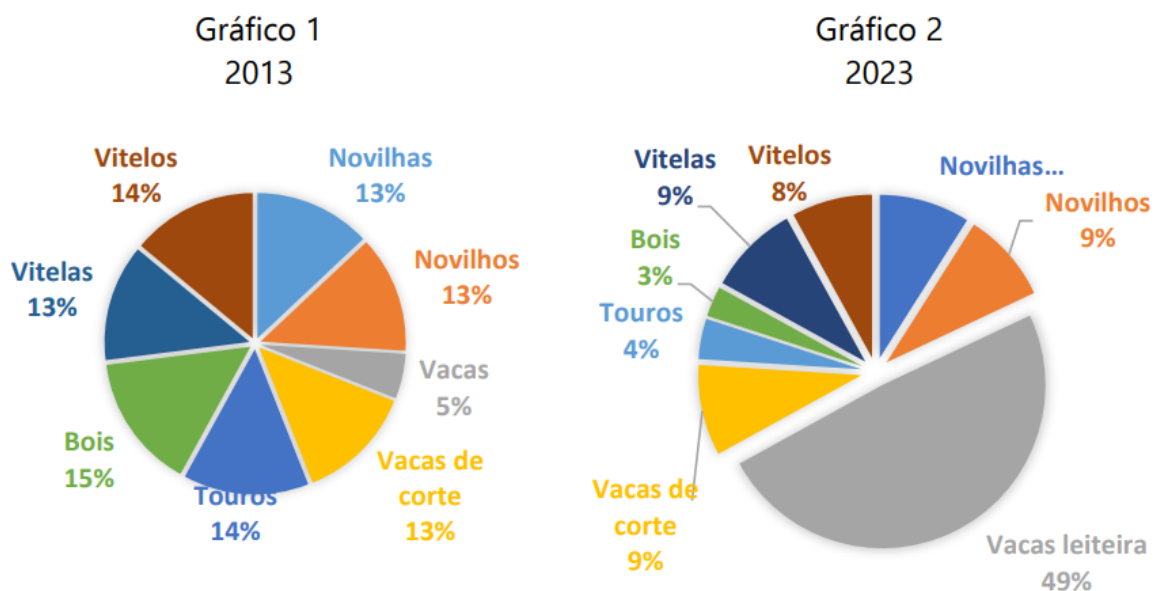


Figura A6-6: Efectivos bovinos do sector familiar por classes em 2013 e 2023

Fonte: MADER, Direcção Nacional de Pecuária (2024). Boletim de Estatísticas Pecuárias. Maputo.

Anexo 7 - Projecção da Quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos Produzidos Diariamente

Tabela A7-7: Quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos Produzidos Diariamente

Área	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Zona Urbana	107	109	110	112	113	114	116
Zona Suburbana	764	786	808	831	854	877	901
Mercados e feiras	103	105	107	109	111	114	116
Resíduos comerciais	84	86	87	89	91	93	95
Resíduos de Construção	73	74	75	77	79	80	82
Resíduos Industriais	86	88	89	91	93	95	97

Fonte: Equipa de Peritos da JICA (Agência Japonesa de Cooperação Internacional, 2017), quantidade expressos em ton/dia.

Anexo 8: Especificações do Grupo Gerador

Tabela A8.1-8: Potência - Biogás

50 Hz, 174-1105 ekW - BIOGÁS

ekW Contínuo*	Modelo do Grupo Gerador
1500 rpm	
174	G3412
400	CG132B-8
600	CG132B-12
800	CG132B-16
1000	CG170-12
1041	G3516
1105	G3516

*Todas as potências com fator de potência de 0,8

Fonte: CAT – Guia de Classificação de Potência eléctrica

Tabela A8.2-8: Biogás, Gás de aterro, Gás de Esgoto

50 Hz Biogás, Gás de Aterro, Gás de Esgoto 1)

Modelo	rpm	Nível de Emissão (NOx)		Temperatura do Pós-resfriador		Potência Eléctrica I @ 1,0 pf kWe	Eficiência %		
		mg/Nm ³	g/bhp-hr	°C	°F		Eléctrica %	Térmica %	Total %
G3412	1500	7051	19.9	-	-	174	27.4	62.0	89.4
CG132B-8	1500	500	1.0	45	113	400	42.8	42.2	85.0
CG132B-12	1500	500	1.0	45	113	600	42.9	42.8	85.7
CG132B-16	1500	500	1.0	45	113	800	43.1	42.6	85.7
CG170-12	1500	500	1.0	60	140	1000	42.6	44.1	86.7
G3516A	1500	500	1.0	54	130	1041	32.1	47.0	79.1
G3516A	1500	500	1.0	54	130	1105	36.8	41.5	78.3
CG170-12	1500	500	1.0	50	122	1200	43.0	42.7	85.7
CG170B-12	1500	500	1.0	45	113	1380	43.6	42.7	86.3
CG170-16	1500	500	1.0	50	122	1560	42.6	42.9	85.5
CG170B-16	1500	500	1.0	45	113	1840	43.6	42.7	86.3
G3520C	1500	500	1.0	54	130	1984	39.4	41.4	80.5
CG170-20	1500	500	1.0	50	122	2000	43.0	43.2	86.2
CG170B-20	1500	500	1.0	50	122	2300	43.6	42.6	86.2
CG260-16	1000	500	1.0	40	104	3770	43.0	39.8	82.8

Fonte: CAT – Guia de Classificação de Potência eléctrica

Anexo 8: Especificações do Grupo Gerador

Tabela A8.3-9: Aplicações do Biogás

APLICAÇÕES DE BIOGÁS

NO, ≤ 500 mg/Nm³/NO, ≤ 500 mg/Nm³; 1 g/bhp-h ²⁾

Gás de esgoto (65% CH₄/35% CO₂)

Biogás (60% CH₄/32% CO₂, Resto N₂)

Gás de aterro (50% CH₄/ 27% CO₂, Restante N₂)

Poder calorífico mínimo Hu = 5,0 kWh/Nm³

Poder calorífico mínimo Hu = 18 MJ/Nm³ ou 457 Btu/scf.

TIPO DE MOTOR	CG132B		V08		V12		V16	
Configuração			X ²⁾		X ²⁾		X ²⁾	
Potência elétrica 3)	kW kW		400	400	600	600	800	800
Pressão média efetiva	polegadas cúbicas		18.9	274.1	18.9	274.1	18.8	272.7
Potência térmica 4)	kW MBTU/h		394	1,345	599	2,045	791	2,701
Eficiência elétrica 3)	%		42.8	42.8	42.9	42.9	43.1	43.1
Eficiência térmica 3)	%		42.2	42.2	42.8	42.8	42.6	42.6
Eficiência total)	%		85.0	85.0	85.7	85.7	85.7	85.7

Fonte: CAT – Guia de Classificação de Potência elétrica

Tabela A8.4-9: Especificações do Produto para CG132B-8

Especificações do produto para CG132B-8		GATO
Especificações do conjunto gerador		
Classificação Contínua	400 ekW @1,0pf	
Combustível	Gás natural, biogás, gás de carvão, mistura de hidrogénio (até 25%)	
Eficiência Elétrica Máxima	43.1% / 42.1%	
Frequência	50 / 60 Hz	
RPM	1500 ou 1800 rpm	
Especificações do motor		
Modelo do motor	CG132-8	
Deslocamento	106.79 pol ³	
Aspiração	—	
Perfuração	5,2 pol.	
Golpe	6,3 pol.	
Dimensões do conjunto gerador		
Comprimento	122 pol.	
Largura	70 pol.	
Altura	85 pol.	
Peso Seco - Grupo Gerador	12.610 libras	

Fonte: CAT – Guia de Classificação de Potência elétrica

Anexo 9: Estudo da Viabilidade Econômica do Sistema

❖ Custo de Investimento:

Tabela A9.1-10: Custo do Investimento

Item	Custo (USD)	Custo (MZN)*
Infraestrutura civil e acessos	39.375,00	2.520.000,00
Biodigestor e Tecnologias de conversão	176.625,00	11.304.000,00
Unidade de purificação e condicionamento	23.437,5	1.500.000,00
Colecta e logística	106.250,00	6.680.000,00
Sub - Total	343.812,5	22.004.000,00
Projecto e Engenharia (10%)	34.381,25	2.200.400,00
TOTAL	378.193,75	24.204.400,00

Fonte: (Autor)

❖ Custos com Pessoal e Administração:

Tabela A9.2-10: Custos com Pessoal e administração

Descrição	Qtd	Custo Unitário (MZN/Mês)	Salário Total (MZN/Ano)
Engenheiro	1	50.000,00	600.000,00
Operadores de Planta	3	30.000,00	1.080.000,00
Técnicos de manutenção	2	20.000,00	480.000,00
Supervisor dos Pontos de Colecta	1	15.000,00	180.000,00
Recebedores/Pesagem	2	10.000,00	240.000,00
Auxiliar de triagem	2	10.000,00	240.000,00
Pessoal de Colecta do esterco	3	10.000,00	360.000,00
Marketing	1	20.000,00	240.000,00
Finanças	1	25.000,00	300.000,00
Recursos Humanos	1	20.000,00	240.000,00
Guardas	2	8.000,00	192.000,00
TOTAL			4.152.000,00

Fonte: (Autor)

Anexo 9: Estudo da Viabilidade Econômica do Sistema

❖ Custos com Manutenção Preventiva e Correctiva:

Tabela A9.3-11: Custo com Manutenção

Descrição	Frequência	Custo Estimado (MZN)
Inspecção e Manutenção do Biodigestor + Gerador	1 x por ano	155.000,00
Serviços externos especializados	Conforme Necessário	50.000,00
Outros imprevistos técnicos	Conforme Necessário	50.000,00
Total		255.000,00

Fonte: (Autor)

❖ Custos com Insumos Químicos:

Tabela A9-4-11: Insumos Químicos Fe/EDTA e Consumíveis

Descrição	Consumo médio	Custo Unitário (MZN/kg ou L)	Custo Anual (MZN)
Solução de Fe/EDTA	3.000 L/ano	150	450.000,00
Lubrificantes e Óleos Técnicos	500 L/ano	390	195.000
Reagentes e consumíveis diversos	-	-	50.000
Total			695.000,00

Fonte: (Autor)

Anexo 9: Estudo da Viabilidade Econômica do Sistema

❖ Custos com Energia Auxiliar:

Tabela A9.5-12: Custos com Energia auxiliar

Descrição	Consumo médio (kWh/Mês)	Tarifa (MZN/kWh)	Custo Anual (MZN)
Bombas e Compressores	2.000	7,8	187.200,00
Sistema de Resfriamento	1.000	7,8	93.600,00
Iluminação/monitoramento	500	7,8	46.800,00
Total			327.600,00

Fonte: (Autor)

❖ Custos com Transporte e Logística:

Tabela A9-6-12 Custo com Transporte e Logística

Descrição	Frequência	Custo Unitário (MZN/viagem)	Custo Anual (MZN)
Colecta dos Resíduos no Zimpeto	3x por semana	1.500,00	216.000,00
Coolecta dos Resíduos na Malanga	2x por semana	750,00	72.500,00
Colecta dos Estercos	2x por semana	3.000,00	288.000,00
Deslocamnetos Administrativos	Mensal	1.000,00	12.000,00
Manutenção dos Veículos	Semestral		100.000,00
Total			688.500,00

Fonte: (Autor)

Anexo 9: Estudo da Viabilidade Econômica do Sistema

❖ Custos com Licenciamento, Seguros e Diversos:

Tabela A9.7-13 Custos com Licenciamento

Descrição	Periodicidade	Custo Anual (MZN)
Taxas ambientais e licenciamento	Anual	120.000,00
Seguro de equipamentos e instalação	Anual	150.000,00
Auditorias externas e inspecções	Anual	100.000,00
Custos Imprevistos/diversos		50.000,00
Total		420.000,00

Fonte: (Autor)

❖ Custos Totais Anuais:

Tabela A9.8-13: Custos totais anuais

Pessoal e Administração	4.152.000,00
Manutenção Preventiva e Correctiva	255.000,00
Insumos Químicos	695.000,00
Energia Auxiliar	327.600,00
Transporte e Logística	688.500,00
Licenciamento, Seguros, Diversos	420.000,00
Total	6.538.100,00 MZN

Fonte: (Autor)

❖ Custo de Oportunidade e Horizonte de análise

Tabela 9.9-13: Custo de oportunidade e horizonte de análise

Custo de Oportunidade	10%
Horizonte de Análise	15 anos

Fonte: (Autor)

Anexo 9: Estudo da Viabilidade Econômica do Sistema

❖ Fluxo de caixa:

Tabela A9.10-14: Fluxo de Caixa Acumulado

Ano	Fluxo de Caixa (MZN)	Fluxo Acumulado (MZN)
0	-24.204.400	-24.204.400
1	6.243.846	-17.960.554
2	6.243.846	-11.716.708
3	6.243.846	-5.472.862
4	6.243.846	770.984
5	6.243.846	7.014.830
6	6.243.846	13.258.676
7	6.243.846	19.502.522
8	6.243.846	25.746.368
9	6.243.846	31.990.214
10	6.243.846	38.234.060
11	6.243.846	44.477.906
12	6.243.846	50.721.752
13	6.243.846	56.965.598
14	6.243.846	63.209.444
15	6.243.846	69.453.290

Fonte: (Autor)

❖ Resultados Finais:

Tabela A9.11-14: Indicadores Financeiros

Indicadores	
VAL	23.286.789,00 MZN
TIR	24,78%
RBC	1,96
PAYBACK	4 anos

Fonte: (Autor)

Anexo 10: Outros Tipos de Biodigestores

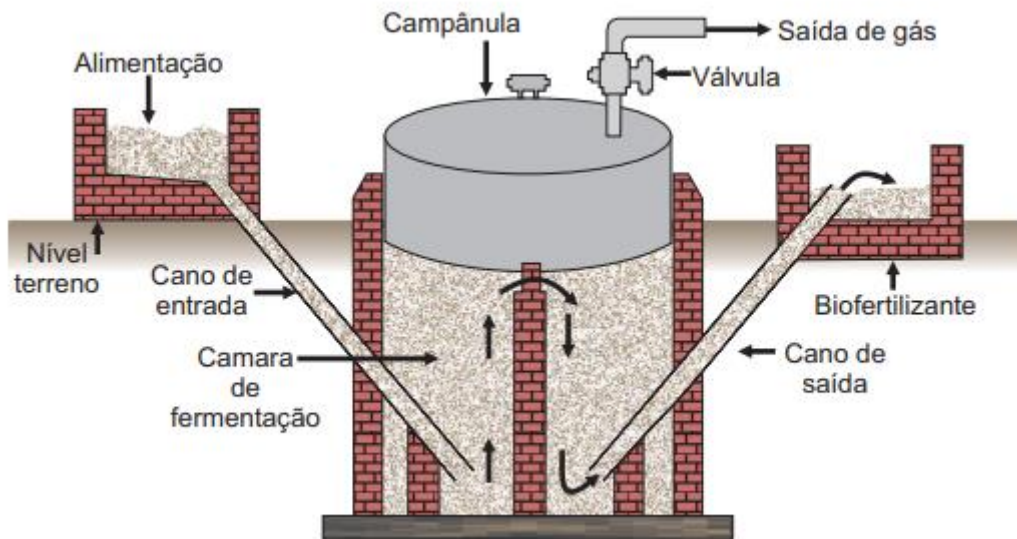


Figura A10.1-15: Esquema de concepção de um biodigestor modelo indiano

Fonte: (10)

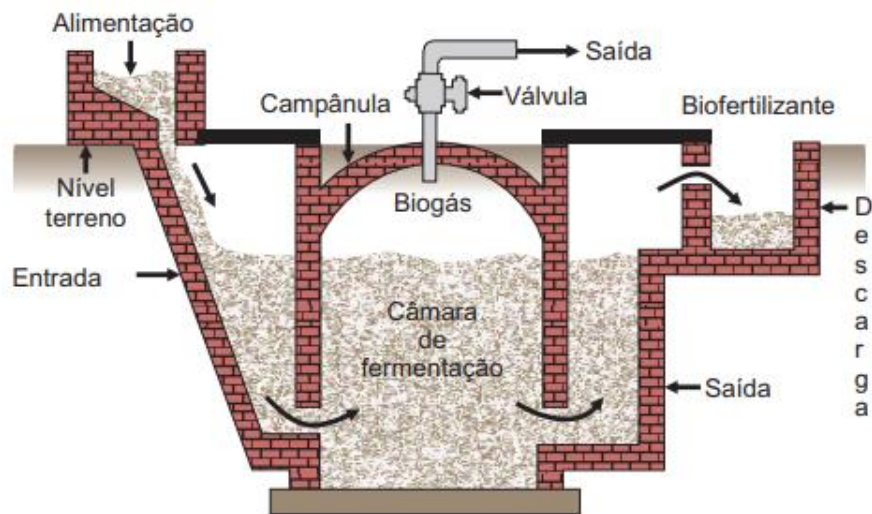


Figura A10.2-15: Esquema de concepção de um biodigestor modelo Chinês

Fonte: (10)

Anexo 10: Outros Tipos de Biodigestores

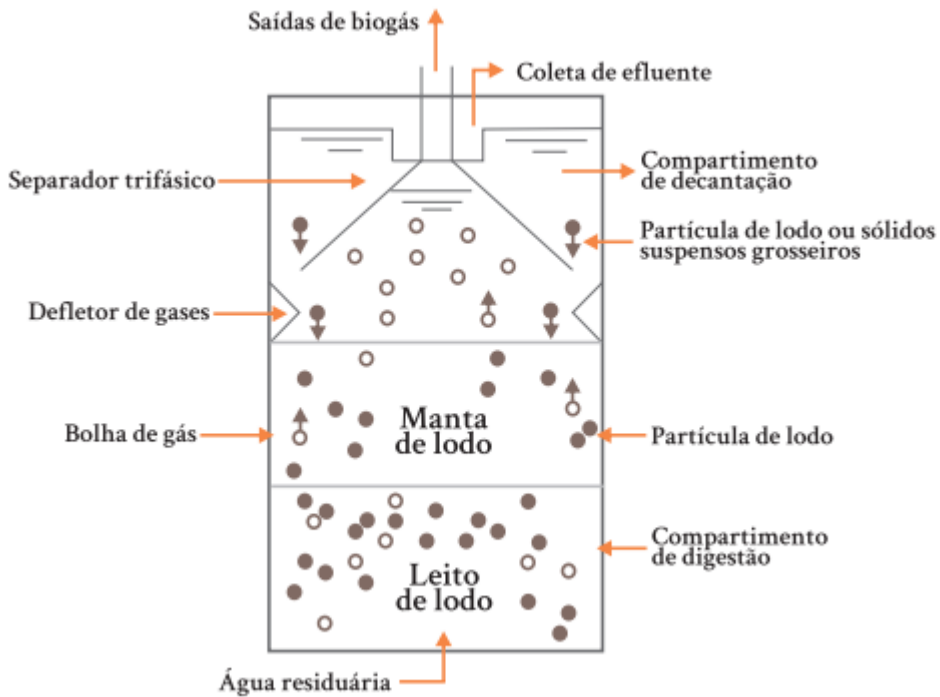


Figura A10.3-16: Esquema de concepção de um biodigestor UASB

Fonte: (9)

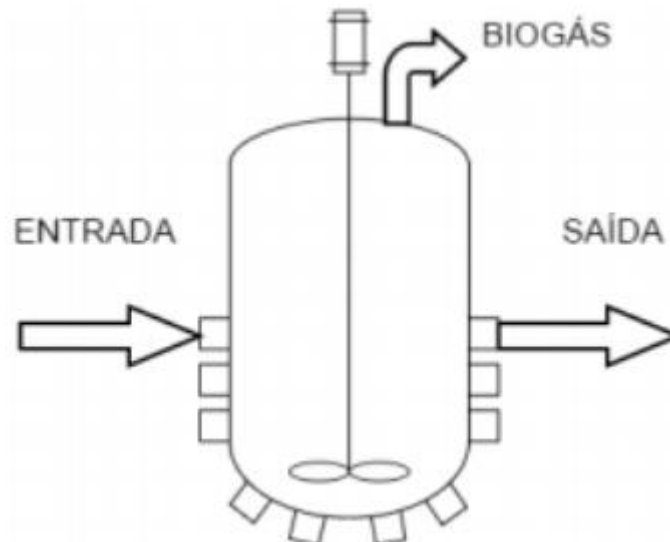


Figura A10.4-16: Esquema de concepção de um biodigestor CSTR

Fonte: (18)

Anexo 11: Critérios de Escolha do Biodigestor

Tabela A11.1-17: Comparação entre o Biodigestor CSTR e BLC

Critério	CSTR (Reactor de Mistura Contínua)	BLC (Biodigestor Lagoa Coberta)
Adequação ao Substrato	Ideal para substratos com mistura sólida – líquida sem pré tratamento dos substratos	Aquedado também para substratos com mistura sólida – líquida, porém, com mais pré tratamento dos mesmos
Eficiência de Produção de Biogás	Alta eficiência devido à mistura contínua, homogeneização e controle térmico	Eficiência menor, dependendo do tempo de detenção e condições ambientais
Controle de Parâmetros	Controle rigoroso de temperatura, pH e mistura, maximizando o rendimento de biogás.	Menor controle operacional, com maior dependência das condições climáticas
Escala e Capacidade	Projectos de médio a grande porte, com capacidade de processar resíduos variados.	Projectos de grande porte, geralmente mais viáveis para tratamento de volumes muito grandes.
Tempo de Detenção Hidráulica	Baixo (10-30 dias), devido à mistura constante e controle.	Alto (30-60 dias ou mais), devido à simplicidade operacional e menor eficiência.
Custo de Instalação	Alto, devido à necessidade de equipamentos avançados (misturadores, sistemas de aquecimento).	Baixo a médio, com menores custos iniciais, especialmente em áreas amplas.
Custo de Operação	Médio a alto, exigindo energia para mistura, aquecimento e monitoramento contínuo.	Baixo, devido à simplicidade e ausência de componentes ativos complexos.
Espaço Necessário	Compacto, devido à construção em tanques fechados.	Necessita de uma grande área, especialmente em zonas rurais ou periurbanas.

Anexo 11: Critérios de Escolha do Biodigestor

Tabela A11.2-18: Comparação entre o Biodigestor CSTR e BLC

Manutenção	Requer manutenção especializada, com monitoramento constante de parâmetros.	Baixa manutenção, mas pode acumular sólidos ao longo do tempo, exigindo limpeza periódica.
Relevância para o Projecto	Permite o processamento de resíduos sólidos (alimentos) e líquidos (esterco bovino) com alto rendimento energético	Pode processar os resíduos sólidos (alimentos) e líquidos (esterco bovino), mas com menor eficiência, sendo ideal se a área for ampla e os custos reduzidos forem prioridade.

Fonte: (Autor)

Anexo 12: Tarifário de Energia Eléctrica - EDM

Tarifário de Energia Eléctrica

CATEGORIAS TARIFÁRIAS: Social, Doméstica, Agrícola e Geral (Baixa Tensão)

Consumos Registados (kWh)	PREÇO DE VENDA POR CATEGORIA TARIFÁRIA				Taxa fixa (Mt)
	Tarifa Social (MT/kWh)	Tarifa Doméstica (MT/kWh)	Tarifa Agrícola (Mt/kWh)	Tarifa Geral (Mt/kWh)	
De 0 a 125	0.97				
De 0 a 300		6.00	3.69	9.32	233.37
De 301 a 500		8.49	5.26	13.31	233.37
Superior a 500		8.91	5.75	14.56	233.37
Pré-pagamento	0.97	7.64	5.11	13.34	

Figura A12-19: Tarifa de Cobrança de energia da EDM

Fonte: (EDM- Electricidade de Moçambique)