

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Produção de Energia na Forma de Biogás a
Partir de Resíduos Animais Para o
Desenvolvimento Rural***

Tese de Mestrado

de

Mécia Clara Frias Anastácio

Desenvolvida no âmbito da disciplina de Dissertação

Realizado em

Universidade do Porto



Orientadores:

Doutora Viviana Manuela Tenedório Matos da Silva

Doutor Rui Alfredo da Rocha Boaventura



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Departamento de Engenharia Química

Julho de 2010

“... Só nos faz perder o bem que poderíamos conquistar,
o medo de tentar.”

William Shakespeare

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha orientadora, à Doutora Viviana Silva pela forma como desenvolveu o seu papel. A motivação e o incentivo que me deu, sempre que necessário, foram uma mais-valia para o meu desempenho e a concretização deste trabalho.

Gostava também de agradecer ao meu co-orientador, Investigador Rui Boaventura por todo o apoio prestado durante estes meses de trabalho, demonstrando sempre simpatia e disponibilidade.

À Tatiana por estar sempre disponível para me ajudar, pela paciência que teve comigo e por ter partilhado todo o seu conhecimento técnico. Muito Obrigada, mesmo!

À D. Maria do Céu e à Liliana que estiveram sempre presentes no laboratório para me apoiarem no que fosse preciso.

À EpDAH, pelo companheirismo e por me ter ajudado no financiamento para minha deslocação a Moçambique. Graças a EpDAH é que este projecto foi possível!

Ao meu namorado, pela paciência e encorajamento que sempre me deu! Aos meus amigos, pelo apoio incondicional!

Aos meus pais... é graças a eles que tudo isto começou! Obrigada por me terem sempre deixado tomar as minhas opções livremente, mesmo quando não estavam de acordo. Aos meus manos, Cá e Gui, por fazer parte da minha vida e estarem sempre nos momentos mais difíceis e importantes. É graças a vocês que sou o que sou hoje!

A todos: Obrigada por fazerem parte do meu Mundo!

Resumo

Esta dissertação baseia-se no estudo para o dimensionamento de reactores para a produção de biogás a partir de resíduos animais, para futura implementação numa comunidade de Moçambique, contribuindo assim para o desenvolvimento rural e sustentável.

Para tal, a dissertação foi dividida em duas partes:

- i) Um trabalho de campo, onde houve uma deslocação a Moçambique para conhecer a população, identificar os principais problemas, necessidades e tentar apresentar algumas soluções. Questionou-se a comunidade sobre vários aspectos, entre os quais a utilização dos resíduos provenientes do gado existente, e a necessidade de implementar um sistema para a produção de energia na forma de biogás para a população usufruir de um fogão a gás, trazendo com isto inúmeras vantagens. Houve também o levantamento de possíveis materiais para a construção da unidade de produção de biogás, bem como de outras informações necessárias para o respectivo projecto;
- ii) Um trabalho laboratorial, em que se fez uma breve caracterização de um resíduo a semelhante àquele a ser utilizado na digestão anaeróbia, (ST, SV, CQO, NTK, Ptotal e alcalinidade) e dois ensaios batch para demonstrar a produção de biogás com ou sem adição de água.

Depois de recolhidas todas as informações, quer no campo quer no laboratório, procedeu-se ao dimensionamento da unidade para a produção de biogás, principal objectivo desta dissertação. Conclui-se que o reactor necessário para fornecer o biogás ao fogão escolar será implementado num tanque plastex com a capacidade de 1000 l. Será, no entanto, necessário, antes de implementar a unidade de biogás na comunidade, proceder a ensaios *in loco* à escala laboratorial, com o intuito de se verificar qual o potencial efectivo de produção de biogás com o resíduo local disponível.

Palavras-chave: Biogás, resíduos animais, digestão anaeróbia, desenvolvimento sustentável

Abstract

This thesis aims the sizing of reactors for biogas production from animal waste, for a future implementation in a community of Mozambique, contributing, thus, for the rural and sustainable development.

Therefore, the thesis was divided in two parts:

- i) A field work, including a visit to Mozambique to meet the population, identify the main existing problems and needs and try to present some solutions. The community was questioned about several aspects, among which the use of the waste resulting from the existing cattle and if it was desirable to implement a system for the production of energy supplied as biogas. The compilation of possible materials for the building of a digester and some necessary information for the concerning materials was also performed;
- ii) A laboratorial work, involving a brief characterization of the a waste sample similar to the one that will be used in the anaerobic digestion, (ST, SV, CQO, NTK, Ptotal and alkalinity) and the batch production of biogas in presence of absence of water.

After the collection of all information, either on the field or in the laboratory, the necessary reactor was dimensioned for the biogas production, being this the main objective of this dissertation. It was concluded that the reactor to supply the scholar oven will be implemented in a plastex tank with about 1000 liters of capacity. It will be then necessary, before implementing the biogas unit in the community, to evaluate the process at lab scale *in loco*, in order to verify the potential of biogas production using the available local waste.

Key-words: biogas, animal waste, anaerobic digestion, sustainable development

Índice

Índice.....	i
Tabelas.	iii
Figuras.....	iv
Notação e Glossário.....	v
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto	1
1.2 Contributos do Trabalho.....	3
1.3 Organização da Tese	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Produção de Biogás por Digestão Anaeróbia	5
2.1.1 Condições Ambientais e Operacionais	7
2.1.2 Vantagens e Desvantagens	10
2.1.3 Matérias-Primas.....	10
2.2 Biogás.....	11
2.3 Produção Mundial de Biogás	13
2.4 Tipos de Reactores	16
3 Metodologia	19
3.1 Trabalho de Campo.....	19
3.2 Trabalho Laboratorial.....	20
3.2.1 Caracterização do Resíduo	21
3.2.1.1 Sólidos Totais, ST	22
3.2.1.2 Sólidos Voláteis, SV	22
3.2.1.3 NTK.....	22
3.2.1.4 Carência Química Oxigénio, CQO	23
3.2.1.5 Fósforo Total, PT.....	25
3.2.1.6 Alcalinidade.....	26

3.2.2	Produção de Biogás.....	26
4	Resultados e discussão.....	30
4.1	Trabalho de Campo.....	30
4.2	Trabalho Laboratorial.....	32
4.2.1	Caracterização do Resíduo.....	32
4.2.2	Produção de Biogás.....	35
4.3	Projecto dos Reactores para a aldeia.....	37
4.3.1	Definição da necessidade mensal de Biogás.....	38
4.3.2	Definição da necessidade mensal de chorume.....	39
4.3.3	Carga e Volume Útil do digestor.....	40
4.3.4	Dimensionamento do Digestor.....	41
4.3.5	Funcionamento do digestor.....	43
4.3.6	Cuidados a ter ao instalar o digestor.....	44
5	Conclusões.....	45
6	Avaliação do trabalho realizado.....	46
6.1	Objectivos Realizados.....	46
6.2	Limitações e Trabalho Futuro.....	46
6.3	Apreciação final.....	47
7	Bibliografia.....	48
	Anexo 1- Instruções do Equipamento do NTK.....	51
	Anexo 2- Procedimento da CQO.....	52

Tabelas

<i>Tabela 1 - Etapas da Digestão Anaeróbia.</i>	5
<i>Tabela 2 - Parâmetros Ambientais.</i>	7
<i>Tabela 3- Composição de Biogás.</i>	12
<i>Tabela 4 - Variação da produção anual de biogás de países na Europa entre 2001 e 2006.</i>	14
<i>Tabela 5 - Produção de biogás relativamente à sua matéria-prima</i>	15
<i>Tabela 6 - Dados usados para o cálculo do volume de metano</i>	29
<i>Tabela 7 - Dados recolhidos relativos à aldeia.</i>	30
<i>Tabela 8 -Características dos tanques verticais da Plastex</i>	32
<i>Tabela 9 - Resultados dos Sólidos Totais.</i>	33
<i>Tabela 10 - Resultados dos Sólidos Voláteis</i>	33
<i>Tabela 11 - Resultados da determinação NTK.</i>	33
<i>Tabela 12 - Resultados da determinação da CQO.</i>	34
<i>Tabela 13 - Resultados da determinação do Fósforo Total.</i>	34
<i>Tabela 14 -Resultados da Alcalinidade</i>	35
<i>Tabela 15 - Comparação das amostras em estudo com dados encontrados na literatura</i>	35
<i>Tabela 16 - Volume de biogás, volume de metano experimental e teórico e produção de biogás para os dois ensaios.</i>	36
<i>Tabela 17- comparação dos ensaios Batch realizados com dados encontrados na literatura</i>	37
<i>Tabela 18 - Necessidades de Biogás.</i>	39
<i>Tabela 19 - Considerações feitas para determinar as necessidades e disponibilidade de matéria-prima.</i>	39
<i>Tabela 20 - Resultados das necessidades e disponibilidade de matéria-prima.</i>	40
<i>Tabela 21- Quantidade de chorume e água a adicionar no reactor por mês</i>	41
<i>Tabela 22 - Resultados da carga de entrada do digestor e do volume útil</i>	41
<i>Tabela 23- Volume do reactor</i>	42
<i>Tabela 24 - Dimensões e volume efectivo do reactor</i>	42

Figuras

<i>Figura 1 - Fontes de energia (à esquerda) e energias renováveis (à direita).</i>	1
<i>Figura 2 - Processo de desenvolvimento da digestão anaeróbia</i>	6
<i>Figura 3 - Molécula de Metano.</i>	11
<i>Figura 4 - Equivalências do biogás com outras fontes de energia.</i>	13
<i>Figura 6 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental - Biogás (MW)</i>	15
<i>Figura 7 - Sistema Descontínuo.</i>	16
<i>Figura 8 - Sistema Contínuo.</i>	16
<i>Figura 9 - Representação esquemática do digestor Chinês (adaptado).</i>	18
<i>Figura 11 - Localização da aldeia de Malonguete, localizada na província de Gaza.</i>	19
<i>Figura 12 - Montagem da experiência feita na aldeia.</i>	20
<i>Figura 13 - Esquema do processo utilizado para a caracterização do resíduo.</i>	21
<i>Figura 14 - Esquema representativo da determinação do NTK.</i>	23
<i>Figura 15 - Termoreactor utilizado para a determinação da CQO</i>	24
<i>Figura 16 - Espectrofotómetro utilizado para a leitura das concentrações de CQO</i>	24
<i>Figura 17 - Esquema representativo do procedimento do PT, pelo método do Ácido Ascórbico</i>	25
<i>Figura 18 - Transdutor de pressão utilizado no ensaio Batch.</i>	27
<i>Figura 19 - Frascos utilizados no ensaio Batch, sem água do lado esquerdo e com água do lado direito.</i>	27
<i>Figura 20 - Aparelho GC utilizado na determinação da quantidade de metano no biogás</i>	28
<i>Figura 21 - “argolas” de cimento</i>	31
<i>Figura 22 - Tanques (da Plastex)</i>	32
<i>Figura 23 - Resultados do ensaio Batch</i>	36
<i>Figura 24 - Esquema do reactor</i>	37
<i>Figura 25 - Representação do reactor com as dimensões</i>	42
<i>Figura 26 - Esquema do reactor</i>	43

Notação e Glossário

a	Quantidade de amostra	g
A	Volume de ácido usado na titulação	ml
Área	Área lida no espectrofotómetro	mv/s
c	Concentração lida no espectrofotómetro	mg/l
C_{digestor}	Carga de entrada do digestor	kg
D	Diâmetro total do reactor	m
h1	Altura útil do reactor	m
h2	Altura para armazenar biogás	m
H	Altura total do reactor	m
m	Massa	g
M_s	Matéria seca	kg
M_{sv}	Matéria seca volátil	kg
N	Normalidade de ácido utilizado	
N_a	Número de animais	
$N_{\text{biogás}}$	Quantidade de biogás necessário	m^3
$N_{MP,nec}$	Quantidade de matéria-prima necessária	kg
$N_{MP,prod}$	Quantidade de matéria-prima produzida	kg
n	Número de moles	mmol
P	Pressão	atm
p	Peso de animais	kg/animal
Q	Quantidade de biogás necessário por hora	m^3/h
Q_a	Quantidade de água	kg
Q_b	Quantidade de biogás produzido por resíduo	m^3/kg
Q_c	Quantidade de resíduo produzido	kg
R	Constante dos gases ideais	atm.l/mol.K
T	Temperatura	K
tr	Tempo de retenção	dias
t	Tempo	h
V	Volume adicionado	ml
V_a	Volume utilizado da amostra	ml
$V_{\text{útil}}$	Volume útil	m^3
V_t	Volume total	m^3
V_2	Volume para armazenar biogás	m^3
X	Absorvância lida espectrofotómetro	
x	Relação entre H e D	

Letras gregas

ρ	Massa volúmica
--------	----------------

Lista de Siglas

FAO	Food and Agriculture Organization
ONUAA	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
EdPAH	Engenharia para Desenvolvimento e Assistência Humanitária
CQO	Carência Química de Oxigénio
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Digestion
Pt	Fósforo Total
GC	Cromatografo gasoso

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

Os problemas ambientais têm grandes implicações sociais e económicas e as suas soluções oferecem mudanças na sensibilização do público, nas atitudes e na criação de novas leis. Desde o século passado que a União Europeia, tem desenvolvido vários programas de acção ambiental. O primeiro programa foi lançado em 1973, onde foi definida a futura direcção da União Europeia. No entanto, o mundo nessa altura era muito diferente do que é hoje, e só no quinto programa se falou em desenvolvimento sustentável (1993-2000), que é definido como a necessidade de encontrar formas de melhorar a qualidade de vida sem causar danos no ambiente, nem prejudicar as gerações futuras. ^[1,2]

Actualmente, as medidas a tomar no sentido de se contribuir para o desenvolvimento sustentável continuam com o sexto programa de acção ambiental (2002-2012), intitulado “Ambiente 2010: o nosso Futuro, a nossa escolha”. Neste programa a gestão de resíduos é uma das prioridades. Entre vários aspectos, uma meta estabelecida pela União Europeia é a redução em 8 % na emissão de gases com efeito estufa (2008-2012). ^[2]

Com isto, e com a actual preocupação da crise do petróleo, surge a necessidade de se substituir os combustíveis fósseis, por energias alternativas, mais baratas e menos destrutivas, como o biogás.

Existem, assim, vários tipos de fontes de energia, entre as quais as energias renováveis, onde se insere o biogás, que se forma a partir da degradação da matéria orgânica pelos microrganismos anaeróbios. ^[3] A figura 1 representa as fontes de energia, dentro das quais temos as energias renováveis.

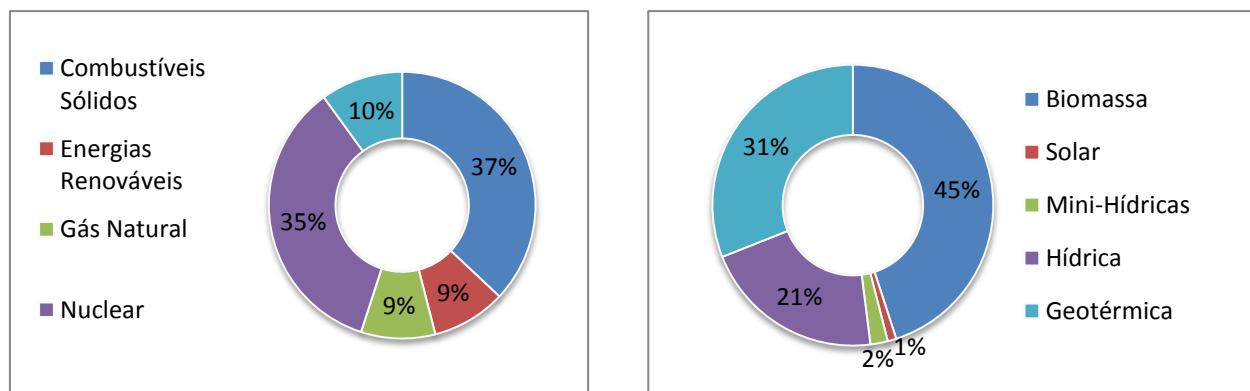


Figura 1 - Fontes de energia (à esquerda) e energias renováveis (à direita). (adaptado ^[3])

Até à data, o biogás não tem tido um papel muito importante no mercado Europeu de energia. No entanto, devido à gestão de resíduos, este recurso tem vindo a tornar-se cada vez mais promissor, reduzindo a poluição, evitando a disseminação de doenças e contribuindo para o problema energético.

Prevê-se até 2020 a substituição de 20% de combustíveis, gasolina e gasóleo, por combustíveis alternativos. O biogás é uma alternativa ambiental competitiva face à electricidade, etanol entre outros.

Adicionalmente, “alguns países subdesenvolvidos recebem 90 % da sua energia a partir da madeira e outros biocombustíveis”, segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (ONUAA ou FAO). Para 2 milhões de pessoas em África, Ásia e América Latina, essa é a principal fonte de energia nas suas casas. Esta utilização não é feita de uma forma racional e sustentável, mas como uma busca desesperada de energia que leva à desflorestação de grandes áreas. Assim, a FAO reconhece que “melhorar a utilização dos recursos de energia de biomassa oferece benefícios ambientais, infra-estruturas rurais melhoradas e oportunidades de emprego, contribuindo também para atingir dois dos Objectivos de Desenvolvimento do Milénio: irradiar a pobreza e a fome (objectivo 1º) e garantir a sustentabilidade ambiental (objectivo 7º). [4.5]

Torna-se, assim, importante a utilização de biogás nesses países como fonte de energia, resolvendo muitos dos problemas das comunidades, desflorestação, problemas de saúde e diversos problemas sociais. A utilização de resíduos animais e outros resíduos para a produção de biogás torna as comunidades mais auto-suficientes em termos energéticos.

Em Moçambique, por exemplo, o governo tem estado a desenvolver acções em prol do uso sustentável da energia da biomassa, bem como a promoção de fontes de energia renováveis, como a produção de biogás a partir de excrementos bovinos.

Esta Dissertação surge com uma interacção da faculdade com a EpDAH- Engenharia para o Desenvolvimento e Assistência Humanitária (www.EpDAH.pt), num projecto para um país subdesenvolvido, que visa juntar os conceitos na área da engenharia como a cooperação para o desenvolvimento.

O país escolhido para a execução do projecto foi Moçambique, uma vez que é um dos países menos desenvolvidos, a língua oficial é a Portuguesa e é uma antiga colónia Portuguesa, trazendo assim um laço de ligação com Portugal.

1.2 Contributos do Trabalho

Com este trabalho, pretende-se estudar a produção de biogás a partir de resíduos animais, chorume bovino, para uma futura implementação de um reator numa comunidade rural. Para tal, houve deslocação ao terreno, Moçambique, e efectuou-se um trabalho de campo para se fazer o levantamento de dados e o estudo da possibilidade de implementação de uma unidade de produção de biogás. Esta dissertação contemplou também um trabalho experimental para se caracterizar o resíduo e determinar a produção de biogás, nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Assim, com o objectivo de diminuir a desflorestação, reciclar resíduos orgânicos e contribuir para o desenvolvimento sustentável, surge o principal objectivo desta dissertação: dimensionamento de um sistema para a produção de biogás num meio rural a partir de chorume animal, melhorando a qualidade de vida da população e tornando-a mais auto-suficiente.

1.3 Organização da Tese

No primeiro Capítulo, faz-se uma pequena introdução ao problema e descrição dos principais objectivos da tese.

No Capítulo 2, faz-se a revisão bibliográfica relativa ao biogás, desde o método de produção de biogás - Digestão anaeróbia, condições ambientais e operacionais, vantagens e matérias-primas utilizadas no processo. Descreve-se ainda as suas características, historia, aplicações e produção mundial. Por fim, faz-se uma pequena descrição dos tipos de reactores existentes para o processo de produção anaeróbia de biogás, incluindo os reactores rurais existentes.

No Capítulo 3, faz-se a descrição da metodologia de trabalho realizado - em campo e no laboratório. Os resultados do trabalho laboratorial, o dimensionamento do reator e a discussão são apresentados no Capítulo 4.

Finalmente, no Capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho, que permitiram inferir algumas sugestões para um trabalho futuro, apresentado no sexto Capítulo.

2 Estado da Arte

2.1 Produção de Biogás por 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.

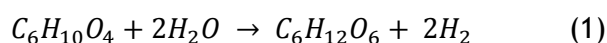
A acção humana, através da construção de digestores anaeróbios, recria as condições naturais de forma controlada.

Na tabela 1, podem observar-se as várias etapas deste processo, assim como as bactérias envolvidas e os produtos formados.

Tabela 1 - Etapas da Digestão Anaeróbia. ^[10]

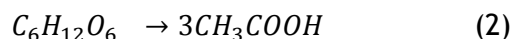
	Etapas	Bactéria	Produtos
I	Hidrólise	Bactérias hidrolítico-fermentativas	Monossacarídeos, aminoácidos e ácidos gordos
II	Acidogénese	Bactérias acidogénicas	Ácidos gordos voláteis, dióxido de carbono e hidrogénio
III	Acetogénese	Bactérias Acetogénicas	Ácido acético, dióxido de carbono, hidrogénio
IV	Metanogénese	Bactérias metanogénicas	Metano, dióxido de carbono e água

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 1 é o exemplo da reacção de hidrólise onde os resíduos orgânicos são decompostos num açúcar mais simples, a glicose.



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, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$, ácido butílico, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, ácido fórmico, HCOOH , ácido lácteo, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$, etanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 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 representa uma reacção típica da acidogénese onde a glicose é convertida em ácido acético.



Na **Acetogénese** dá-se a decomposição do resto dos produtos da acidogénese, formando-se através das bactérias acetogénicas os produtos iniciais para a formação do metano, o ácido acético, o dióxido de carbono e o hidrogénio. 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. ^[15]

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. ^[16]

A figura 2 ilustra o processo da digestão anaeróbia. A biomassa é decomposta pelas bactérias metanogénicas, produzindo-se assim o biogás.

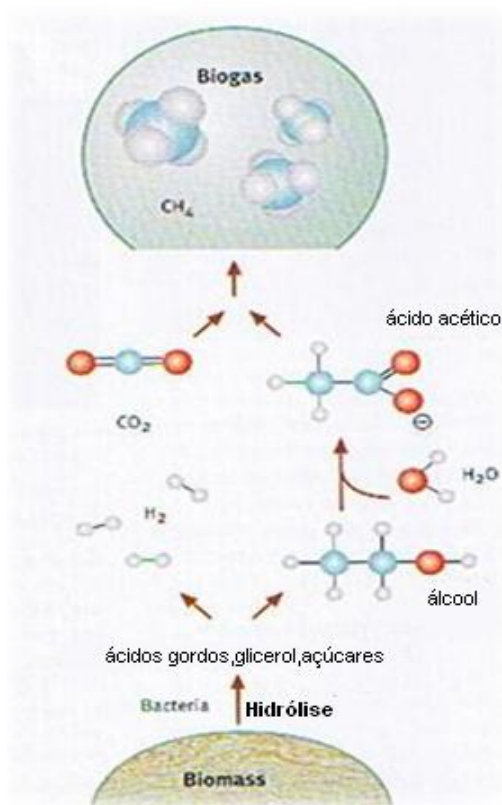


Figura 2 - Processo de desenvolvimento da digestão anaeróbia (adaptado) ^[17].

2.1.1 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 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.

As condições ambientais da metanogénese devem ser cumpridas impreterivelmente, uma vez que aqui os organismos não tinham qualquer hipótese de sobrevivência, pois têm uma menor taxa de crescimento e maior sensibilidade aos factores ambientais.

Tabela 2 - Parâmetros Ambientais. [18]

Parâmetro	Hidrólise/Acidogénese	Formação Metano
Temperatura	25-35°C	Mesófilicas: 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
Oligoelementos		Ni,Co,Mo,Se

De seguida, procede-se à análise de cada parâmetro no processo de digestão anaeróbia para produção de biogás [1.9.18]:

- 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 esta relacionada com a estabilidade do processo. Uma alcalinidade entre 2500 e 5000 mg $CaCO_3/L$ 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.

A adição de resíduos de culturas pode melhorar o desempenho do processo da digestão anaeróbia.

- 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. ^[14]

- 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.

Contudo, a agitação excessiva pode promover ruptura celular, sendo preferível uma agitação mais lenta. ^[14]

- Carga orgânica

É a quantidade de matéria orgânica por volume introduzida diariamente no digestor.

Dependendo do tipo de digestor a matéria orgânica a ser introduzida pode 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). ^[13]

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.

2.1.2 Vantagens e Desvantagens

A produção de biogás como uma etapa do processo de gestão de resíduos e produção de energia tem muitos benefícios ambientais e oferece muitas vantagens em relação a outras formas de tratamentos de resíduos, tais como ^[15.19]:

- Redução de emissões de gases de efeito estufa;
- Uso deste tipo de energia em substituição da energia proveniente dos resíduos fosseis;
- Redução da poluição de solos e do meio hídrico associada ao tratamento de efluentes e resíduos de exploração agro-pecuária e indústria alimentar, com grandes cargas orgânicas;
- A produção de biogás fornece ao agricultor alguma independência de fertilizantes e correctivos para o solo;
- Tecnologia com um potencial de adaptação às diversas especificações de cada projecto.

Contudo, também existem desvantagens neste processo:

- Baixa tarifa de venda de energia eléctrica produzida;
- O biogás pode ter muitas aplicações, no entanto, mediante a sua utilização final, poderá ter que sofrer um tratamento;
- Pode ser encontrado no processo um baixo rendimento de metano;

2.1.3 Matérias-Primas

O biogás pode ser produzido a partir de qualquer tipo de biomassa que se decompõe 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.

Os resíduos agrícolas produzem em média 7 vezes mais biogás que os resíduos animais, contudo os que contêm pesticidas ou herbicidas não podem ser utilizados para a produção de biogás, uma vez que impedem o desenvolvimento das bactérias metanogénicas.

Os animais são uma abundante fonte de material orgânico para o uso de matéria-prima na digestão anaeróbia.

O chorume dos suínos e os excrementos das galinhas apresentam uma biodegradabilidade 3 a 4 vezes maior que o chorume dos bovinos, uma vez que estes contêm uma maior quantidade de compostos celulósicos e lenhina, devido ao tipo de alimentação e à utilização de palha para dormirem.

Para os dejectos dos animais ruminantes tem uma cinética de produção de biogás mais rápida quando comparada com os dejectos de animais monogástricos, uma vez que contêm uma grande quantidade de microrganismos anaeróbios no sistema digestivo que são eliminados junto com o chorume, facilitando assim o processo da digestão anaeróbia.

O uso de resíduos industriais é mínimo na produção de biogás, excepto nas indústrias de frutas, carnes e cereais.

As algas marinhas são também uma fonte de matéria-prima para o processo. Estudos mostram que biogás produzido a partir de algas marinhas é de boa qualidade, caracterizado pela falta de odor do enxofre. ^[15]

2.2 Biogás

Idealmente, a digestão anaeróbia leva à biodegradação total dos resíduos orgânicos, produzindo metano (CH_4) (figura 3), dióxido de carbono (CO_2) e vestígios de outros gases. A esta mistura dá-se o nome de Biogás. A tabela 3 apresenta a composição típica do biogás.



Figura 3 - Molécula de Metano. ^[6]

Tabela 3- Composição de Biogás. ^[7]

Gás	Símbolo	Concentração no Biogás (%)
Metano	CH ₄	50-80
Dióxido de carbono	CO ₂	20-40
Hidrogénio	H ₂	1-3
Azoto	N ₂	0,5-3
Outros gases	H ₂ S,CO,NH ₃	1-5

Tudo indica que o biogás surgiu há milhões de anos, no entanto, no século XIX, quando um aluno de Pasteur realizou uma digestão anaeróbia com uma mistura de estrume e água, conseguindo obter 100 litros de gás por m³ de matéria orgânica. Em 1884, Pasteur mostrou essas experiências na Academia de Ciências, onde se considerou que a digestão anaeróbia poderia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação. Entretanto, na Índia, a ideia de aproveitar o gás proveniente da digestão anaeróbia já não era uma novidade. Em 1859, em Bombaim, realizou-se a primeira experiência com utilização directa de biogás.

Na Europa, a primeira experiência com biogás só teve lugar 30 anos mais tarde, em 1895, quando se utilizou para iluminação de algumas ruas de Exter, Inglaterra.

Contudo, a exploração do biogás sempre foi bastante reduzida e foi apenas nos anos 40, com as carências energéticas provocadas pela 2^a Guerra Mundial, que voltou a ser utilizado, quer na cozinha e aquecimentos de casas, quer para a alimentação de motores de combustão.

Nas décadas de 50 e 60, o biogás desempenhou um papel importante em países com poucos recursos energéticos e económicos, como a Índia e a China. Sobretudo em comunidades rurais e a partir da crise energética dos anos 70, voltou a despertar interesse, aumentando assim a sua produção nos países Europeus. ^[8]

Actualmente, na China cerca de 25 milhões de pessoas utilizam biogás para cozinhar e iluminação.

Em Moçambique não existe conhecimento de unidades de digestão anaeróbia para produção de biogás.

O biogás, devido ao seu alto conteúdo de metano, pode ter um poder calorífico um pouco superior a metade do poder calorífico do gás natural, dependendo assim da composição de metano presente, podendo variar entre 5000 - 6000 kcal/m³. Se o biogás contiver 60% de metano, o seu poder calorífico é de 5,500 kcal/m³ (6,4 kWh/Nm³). Na figura 4, podem-se observar algumas equivalências do biogás em relação a outras fontes de energia. ^[9]

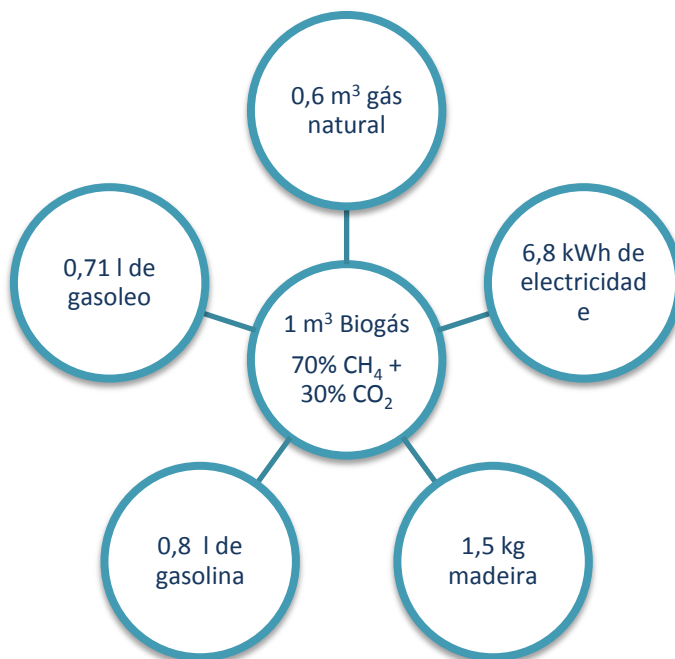


Figura 4 - Equivalências do biogás com outras fontes de energia. ^[9]

O biogás pode ser utilizado como electricidade e biocombustível para diversos fins, incluindo transporte. Pode ser utilizado para produção de energia calorífica ou térmica e para cozinhar, por exemplo em comunidades rurais.

Todas estas utilizações permitem a produção do biogás a partir de resíduos. ^[10]

2.3 Produção Mundial de Biogás

A produção de biogás tem vindo a aumentar na Europa, cerca de 1755 mil toneladas de biogás em 2000. Nesse mesmo ano, a Alemanha implementou um programa para promover a produção de energia a partir de biogás, aumentando o número de instalações em 250 unidades em apenas um ano. Até 2002, a produção na Europa aumentou 30 % e em 2005 foram produzidas cerca de 4959 mil toneladas de biogás. ^[3] Na tabela 4 observa-se a variação de alguns países na Europa entre 2001 e 2006.

Tabela 4 - Variação da produção anual de biogás de países na Europa entre 2001 e 2006.
(adaptado)

País	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Alemanha	600	659	685	1291	1594	1923
Reino Unido	904	1076	1151	1473	1600	1696
Itália	153	155	155	203	344	354
Espanha	134	168	257	275	317	334
França	196	302	322	359	220	227
Holanda	161	149	154	110	119	119
Áustria	56	59	64	42	31	118
Dinamarca	73	62	62	93	92	94
Polónia	57	63	72	43	51	94
Bélgica	45	56	56	43	84	83
Grécia	33	42	42	32	36	69
Finlândia	18	18	18	17	64	64
Republica Checa	-	-	-	-	56	60
Irlanda	28	28	28	19	34	35
Suíça	112	147	147	120	30	33
Hungria	-	-	-	2	7	11
Portugal	-	76	76	76	10	9
Luxemburgo	2	2	2	5	7	9
Eslovénia	-	-	-	7	7	8
Eslováquia	-	-	-	3	5	5
Estónia	-	-	-	3	1	1
Malta	-	-	-	-	0	0
	2572	3062	3291	4216	4709	5346
TOTAL	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil
	Toneladas	Toneladas	Toneladas	Toneladas	Toneladas	Toneladas

É de salientar que mais de 80 % do conteúdo energético da matéria-prima tratada pode ser recuperado, considerando-se, assim, o biogás um recurso valioso e energia sustentável.

Há um optimismo em Portugal sobre o futuro na produção de biogás, embora não exista muito público consciencializado sobre a sua importância como fonte de energia alternativa.^[3]

Na Figura 6 pode observar-se a evolução da potência de energia eléctrica instalada em Portugal entre 2000 e Fevereiro de 2009. A Estratégia Nacional de Energia, estabelecida pelo governo, define várias metas até 2010 para a produção de electricidade com base nas energias renováveis. No biogás foi estabelecida uma meta de 100 MW de potência instalada em unidades de tratamento anaeróbio de resíduos. Observando a imagem, figura 6, verifica-se que esta meta está longe de ser alcançada.^[11]

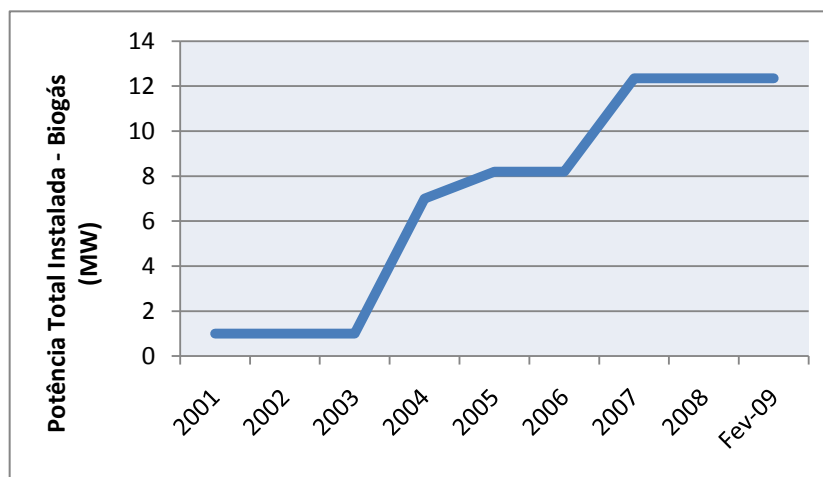


Figura 5 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental - Biogás (MW). ^[12]

Também nos países em desenvolvimento, onde a engenharia tem de ser considerada para além de um aspecto económico, a digestão anaeróbia fornece soluções promissoras. Em países como a Índia, China e Brasil existem milhares de unidades de biogás, tanto para famílias, como para comunidades.

Em 1950 começou a utilizar-se biogás na Índia, estendendo-se o seu uso a mais países em desenvolvimento.

Para outros autores, os valores típicos da produção de biogás situam-se entre 0,75 e 1,12 m³/kg SV, variando o tipo de matéria-prima com que é feita a digestão anaeróbia. ^[13] A tabela 5 compila alguns valores de produção de biogás em função do tipo de matéria-prima utilizado. É de salientar que estes valores dependem de diversos factores, como a idade dos animais, espécie, peso, tipo de alimentação, etc. ^[14]

Tabela 5 - Produção de biogás relativamente à sua matéria-prima ^[14]

Matéria-prima	Sólidos Totais, ST (%)	Sólidos Voláteis, SV (%)	Produção biogás (m ³ /kg SV)	% CH ₄
Chorume suíno	3-8	70-80	0,25-0,50	70-80
Chorume bovino	5-12	75-85	0,20-0,30	50-80
Estrume aves	10-30	70-80	0,35-0,60	60-80
Resíduos alimentares	10	80	0,50-0,60	70-80
Folhas	80	90	0,80-0,95	

2.4 Tipos de Reactores

A aplicação do processo da digestão anaeróbia passa pela escolha de um tipo de reactor adequado ao tratamento de um determinado resíduo. Assim, é necessário conhecer as propriedades físicas e químicas do resíduo a tratar para que se possa ter o melhor rendimento possível no processo.

Os reactores podem operar de duas maneiras diferentes^[15]: **Batch (descontínuo)** ou **contínuo** (figuras 7 e 8, respectivamente)

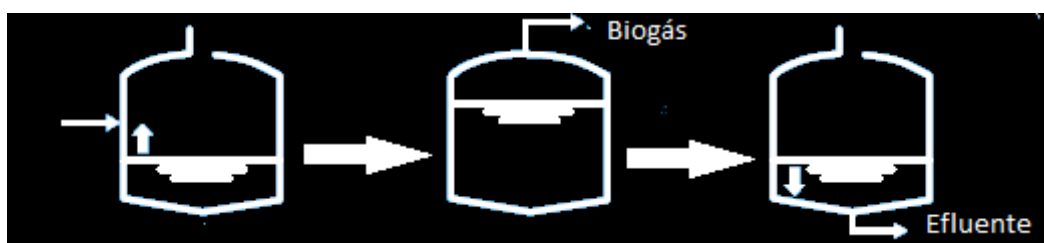


Figura 6 - Sistema Descontínuo.

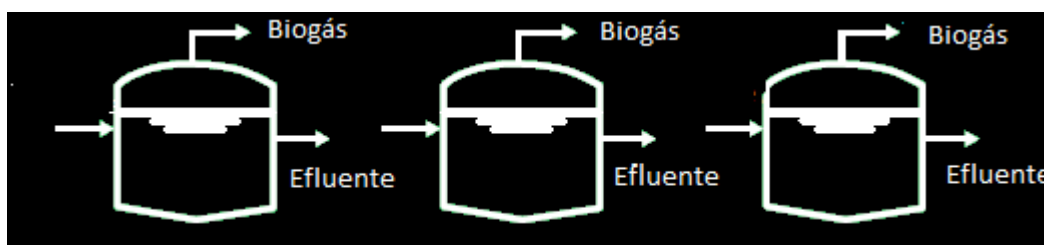


Figura 7 - Sistema Contínuo.

No processo Descontínuo, a matéria orgânica é introduzida na totalidade no reactor ficando retida durante um determinado tempo até à degradação total. Isto implica que as diferentes fases da degradação ocorram sequencialmente e que a produção de biogás se dê de forma descontínua. Assim, a curva de evolução temporal da produção de biogás segue a tendência da curva típica do crescimento dos microrganismos. Para se conseguir uma produção de biogás em certa quantidade, o ideal é haver vários reactores descontínuos.

Este tipo de reactor é útil no tratamento de resíduos com produção sazonal e com alto teor de sólidos. São normalmente processos de concepção simples e económicos. Este processo apresenta três modelos principais de reactores: o Batch de uma fase, o Batch de duas fases (a

metanogénese ocorre apenas no segundo reactor, produzindo-se neste o biogás) e o reactor híbrido.

No processo contínuo, a matéria orgânica está constantemente a ser adicionada ao reactor com consequente saída de matéria tratada, permitindo assim que o volume se mantenha constante ao longo do tempo. Assim, a produção de biogás ocorre continuamente.

Neste tipo de sistema existem inúmeros modelos de digestores anaeróbios com várias características oferecendo grande adaptabilidade a ambientes e necessidades. São eles^[9.13.15]:

O **reactor de mistura completa, CSTR** é o reactor mais utilizado que se caracteriza pela alimentação do digestor, assim como pela contínua saída de efluente do mesmo. A agitação, que pode ser mecânica ou recirculação de biogás, proporciona as condições de mistura fundamentais ao funcionamento adequado do sistema.

O **reactor de contacto** é idêntico ao CSTR, no entanto, tem um sistema de separação e recirculação de lamas.

Este tipo de reactor apresenta uma vantagem relativamente ao CSTR, uma vez que aumenta o tempo de retenção, o que conduz a menores volumes no reactor para a mesma quantidade de resíduos a tratar. Uma desvantagem neste tipo de reactor consiste nos custos adicionais do decantador e das bombas no sistema de recirculação.

A carga orgânica deste tipo de reactor pode variar entre 1 a 6 kg CQO/m³/dia.

No **reactor de leito de lamas de fluxo ascendente, UASB**, existe retenção de biomassa no interior do reactor e há uma formação de densos grânulos de microrganismos, chamados grânulos anaeróbios, que, devido à densidade, apresentam uma fácil sedimentação e proporcionam uma grande área de contacto com o substrato, aumentando o rendimento do processo.

Este tipo de reactor é muito frequente no tratamento de resíduos com elevadas concentrações de matéria orgânica, tratando cargas orgânicas entre os 5 e os 30 de kgCQO/m³/dia, na indústria agro-alimentar e no tratamento de águas residuais.

O **reactor fluxo pistão** caracteriza-se pela entrada do resíduo no digestor por um dos lados, provocando a deslocação de todo o conteúdo do digestor, terminando com a saída do lado oposto da mesma quantidade de resíduo tratado. Tal como o nome indica, o fluxo dentro do reactor é tipo pistão: camadas diferenciadas entram e saem do reactor ao mesmo tempo e não se misturam. O biogás formado fica retido na cobertura. É aplicado a diferentes tipos de resíduos orgânicos (resíduos orgânicos municipais, resíduos orgânicos da agro-pecuária).

Nas comunidades rurais, como na Índia, China, Europa, etc., utilizam-se digestores mais simples: **digestores rurais** como solução de tratamento de resíduos. Em geral são pequenos,

de utilização doméstica e com volumes úteis entre 1-10 m³. Funcionam de forma descontínua e são alimentados com resíduos domésticos e da actividade agro-pecuária.

Assim, foram desenvolvidos dois tipos de digestores rurais. O modelo Chinês (figura 9) aproveita o biofertilizante, resultante da digestão anaeróbia, necessário, devido ao excesso de população, para a agricultura e para a produção de alimentos. O modelo Indiano (figura 10), procura cobrir o défice de energia existente.

O modelo Chinês é mais simples e económico do que o modelo Indiano e é mais eficaz nos países com temperaturas mais frias, uma vez que neste último as perdas de calor através do reservatório de gás são muito grandes. Normalmente está enterrado no solo. O modelo Indiano é mais sofisticado em termos técnicos, aproveitando melhor a produção de biogás. [20]

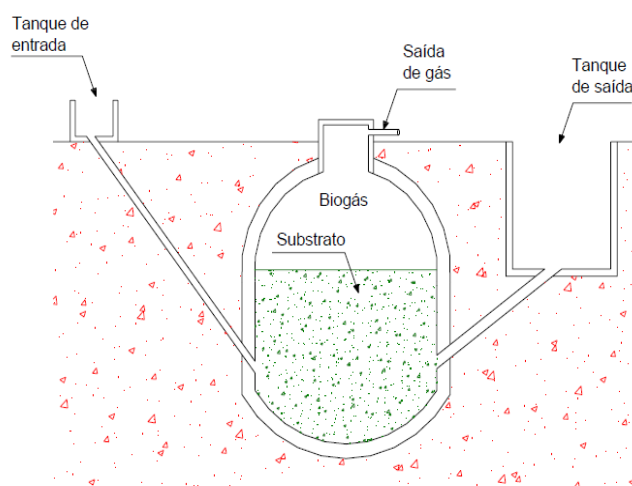


Figura 8 - Representação esquemática do digestor Chinês (adaptado). [21]

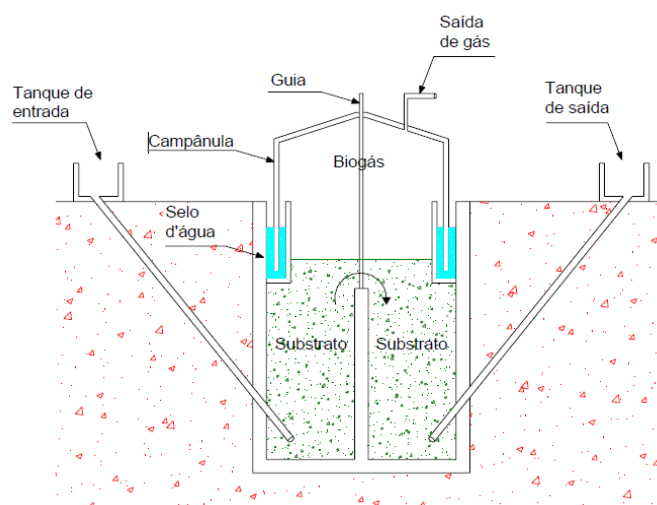


Figura 9 - Representação esquemática do digestor Indiano (adaptado). [21]

3 Metodologia

Com o objectivo de se poder dimensionar um reactor para a produção de biogás numa comunidade rural, realizou-se um trabalho de campo onde se recolheram dados e informações sobre as necessidades da comunidade.

O local para o desenvolvimento do projecto é Malonguete, distrito de Chicualacuala, província de Gaza - Moçambique. Esta escolha foi feita pela EpDAH, uma vez que havia o conhecimento prévio de que se trata de população bastante carenciada e que é uma zona com grande criação de gado.

Após a realização do trabalho de campo, houve um trabalho laboratorial onde se fez um pequeno estudo exploratório do resíduo que vai ser utilizado no processo.

3.1 Trabalho de Campo

Durante a visita ao terreno tentou-se conhecer ao máximo a população, ouvindo os seus problemas e necessidades.

A aldeia de Malonguete tem cerca de 24 km² de área e encontra-se muito próxima da fronteira com o Zimbabwe (ver figura 11). As coordenadas de longitude e latitude são aproximadamente 33 ° e 20 °, respectivamente.



Figura 10 - Localização da aldeia de Malonguete, localizada na província de Gaza. [22]

O trabalho de campo procurou obter as respostas às seguintes questões:

- Quantidade de gado;
- Modo de distribuição do gado;
- Processo de recolha e armazenagem do chorume/ estrume;
- Aplicações do chorume/estrume;
- Processo de gestão de transporte de resíduos;
- Quantidade e tipo de chorume;
- Possíveis materiais locais para dimensionamento de digestores e fornecedores;
- Temperatura média anual e ciclo de variação.

Adicionalmente, foi planeada a realização de uma experiência para a produção de biogás *in loco*, utilizando os resíduos animais da aldeia. Para isso montou-se um esquema com duas garrafas de 1,5 L (ver figura 12): numa colocou-se água e na outra chorume e uma pequena quantidade de água. As garrafas foram colocadas ao sol durante alguns dias. Esta experiência não chegou a ter os resultados esperados, pois houve uma fuga de água numa das garrafas. Assim a experiência não chegou a ser concluída.



Figura 11 - Montagem da experiência feita na aldeia.

3.2 Trabalho Laboratorial

O trabalho laboratorial foi dividido em duas partes:

1. Caracterização do resíduo;
2. Caracterização da produção de biogás.

A seguir são apresentadas as respectivas metodologias.

3.2.1 Caracterização do Resíduo

O chorume bovino foi recolhido numa quinta, nos arredores do Porto, e armazenado num congelador para minimizar a decomposição do substrato. Um dia antes da realização das actividades experimentais foi posto à temperatura ambiente para descongelar.

Foi seguida uma metodologia para a caracterização do resíduo como mostra o organograma a seguir apresentado (figura 13).

As análises feitas foram realizadas de acordo com as normas Europeia utilizadas para águas residuais ^[23], pelo que foi necessário ter-se diluído a amostra, excepto para o Azoto Total Kjedahl (NTK) que se seguiu a NP EN ISO 5983-1 - Determinação do Teor Azoto e cálculo do teor proteína bruta ^[24] e a Carência Química de Oxigénio (CQO), que foi realizada através de kits com a referência 1.14555.0001 da Merck.

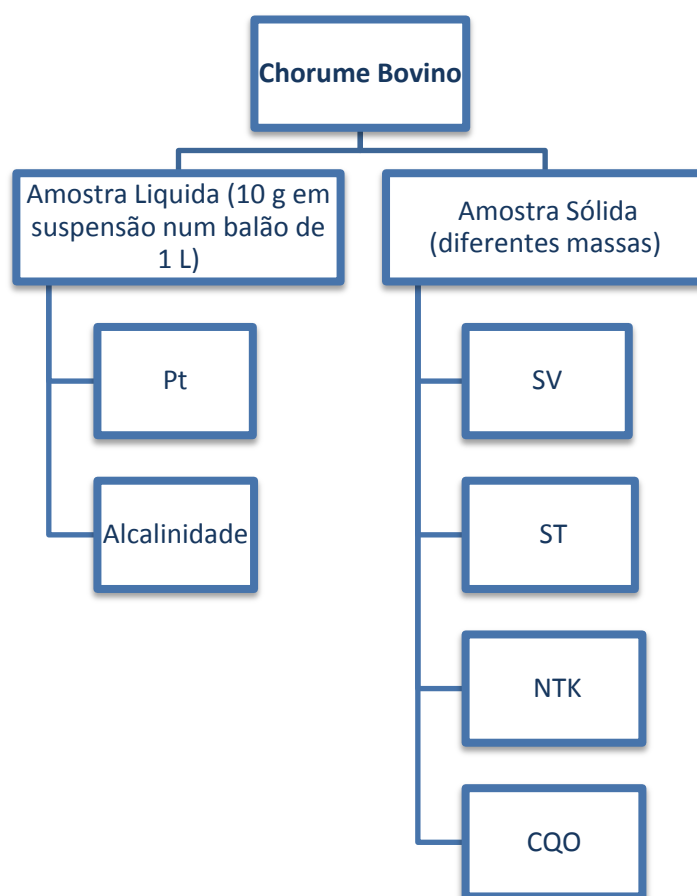


Figura 12 - Esquema do processo utilizado para a caracterização do resíduo.

3.2.1.1 Sólidos Totais, ST

“Sólidos totais” é o termo dado ao resíduo após a evaporação da amostra e uma posterior secagem na estufa a uma determinada temperatura, 105° C.

Para a determinação dos ST recolheram-se pequenas quantidades de resíduo que foram pesadas em cadinhos previamente tarados e levados para a estufa à temperatura de 105°C até toda a humidade evaporar, atingir peso constante, sendo posteriormente arrefecidas no exsicador e pesadas novamente, obtendo-se o peso do material seco.

3.2.1.2 Sólidos Voláteis, SV

Na determinação dos sólidos voláteis utiliza-se a amostra resultante dos ST e leva-se a mufla a 550°C durante duas horas. Após esse período, a amostra é novamente arrefecida no exsicador e pesada, obtendo-se o peso da matéria mineral.

3.2.1.3 NTK

A determinação do azoto total Kjeldahl baseou-se na norma acima referida. Este procedimento foi dividido em 3 partes: 1) digestão da amostra e sua conversão em sulfato de amónio, 2) destilação, a amónia é destilada e recolhida em ácido sulfúrico, 3) titulação onde se titula o excesso de ácido com uma solução de NaOH de forma a quantificar o azoto.

A digestão é realizada de acordo com o manual de instruções do equipamento utilizado (anexo 1). O bloco de digestor utilizado foi o J.P.Selecta Bloc digest 6 com o sistema de controlo RAT2 cód.4001538 da mesma marca.

Na figura 14 está descrito o procedimento utilizado de acordo com a norma.

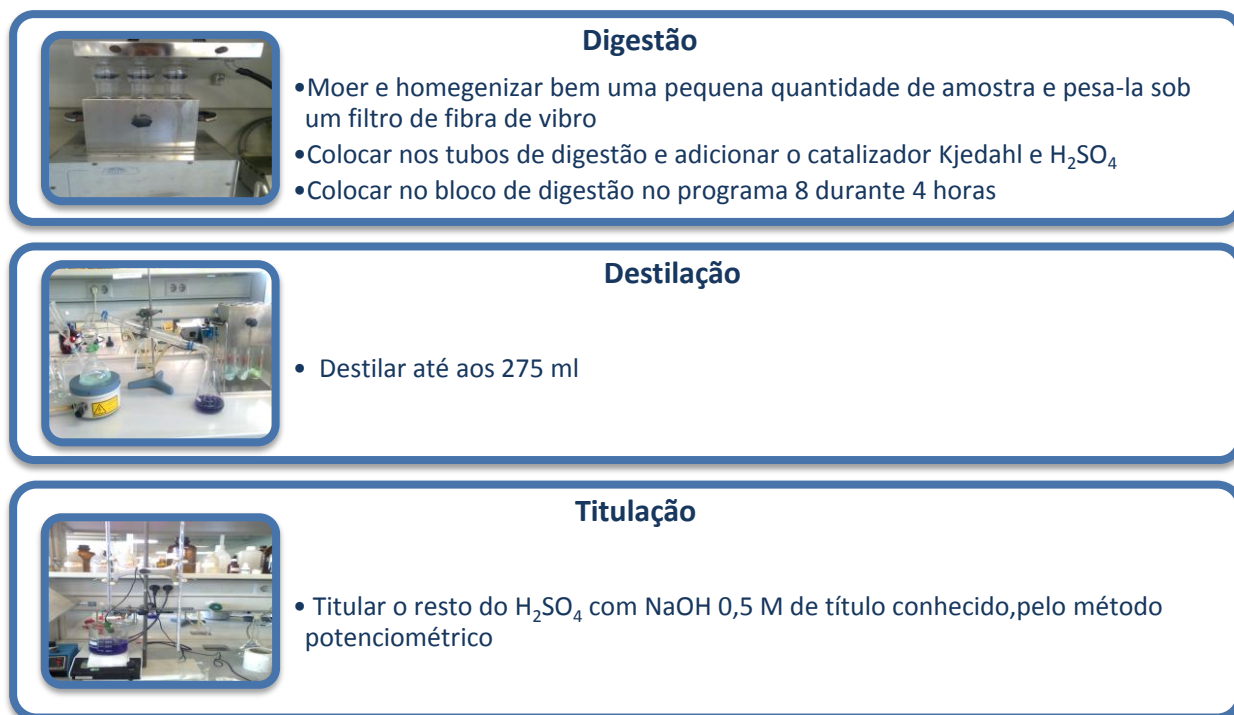


Figura 13 - Esquema representativo da determinação do NTK. ^[24]

3.2.1.4 Carência Química Oxigénio, CQO

A CQO é usada como uma medida do oxigénio equivalente à fracção da amostra susceptível de ser oxidada por um oxidante químico forte: dicromato de potássio.

O procedimento para a realização da CQO foi adoptado pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) para águas residuais (anexo 2) e os kits utilizados foram para CQO de 5000 a 10 000 mg/L (ref.14555).

Para a sua determinação pesou-se uma quantidade do resíduo sólido seco e adicionou-se ao tubo do kit com 1 ml de água destilada, seguido do aquecimento dos tubos no termoreactor (figura 15), onde se deu a digestão durante 2 horas a 148°C. Após a digestão leu-se a concentração num espectrofotómetro próprio para o efeito (figura 16).



Figura 14 - Termoreactor utilizado para a determinação da CQO



Figura 15 - Espectrofotómetro utilizado para a leitura das concentrações de CQO

A quantidade de CQO presente na amostra é obtida através da seguinte expressão:

$$CQO \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{C \times V}{a} \quad (3)$$

Em que: C é a concentração lida no espectrofotómetro, mg/l

V é o volume adicionado ao tubo do kit de água destilada, l

a é a quantidade de amostra, g

3.2.1.5 Fósforo Total, PT

A determinação do fósforo total foi segundo o método do ácido Ascórbico, de acordo com o Standard Methods ^[23].

O procedimento está descrito na figura 17.

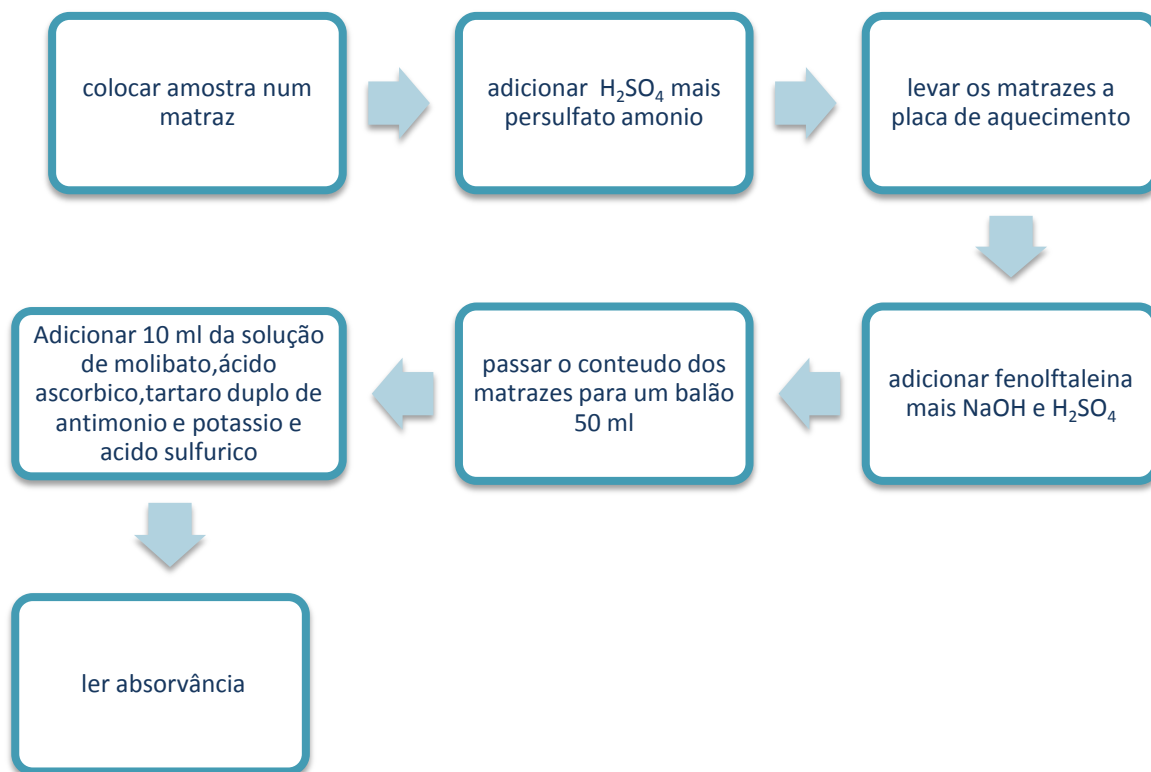


Figura 16 - Esquema representativo do procedimento do PT, pelo método do Ácido Ascórbico. ^[23]

A determinação da concentração de fósforo foi a partir da curva de calibração do espectrofotômetro:

$$Y \left(\frac{mg\ P}{L} \right) = 2,093 \times X - 0,0064 \quad (4)$$

Em que: Y é a concentração de fósforo, mg/l

X é a absorvância lida no espectrofotômetro, gama absorvância: 0-0,239

3.2.1.6 Alcalinidade

A determinação da alcalinidade foi feita através do método potenciômetro de acordo com o Standard Methods. Para isso pipetou-se uma quantidade de amostra e colocou-se num matraz para ser titulado por um ácido forte (HCl) até um pH de 4,5 uma vez que se trata de um resíduo complexo. [23]

A alcalinidade, Alc, é calculada através da seguinte expressão:

$$Alc \left(\frac{mgCaCO_3}{L} \right) = \frac{A \times N \times 50000}{Va} \quad (5)$$

Em que: A é o volume do ácido usado na titulação, ml

N é a normalidade do ácido utilizado

Va é o volume utilizado de amostra, ml

3.2.2 Produção de Biogás

Com o objectivo de analisar a produção de biogás de uma maneira simples, de forma a se aproximar às condições do terreno, os ensaios foram produzidos em condições *Batch*.

O teste baseia-se na medição da pressão, resultante da produção de biogás a partir de uma amostra de chorume. Para a medição de pressão é utilizado um transdutor de pressão, da marca Centrepoint, modelo PSI-30 (figura 18). As leituras são obtidas pela intersecção da agulha do transdutor nos frascos. Segundo o fornecedor, o transdutor lê 100 mv aos 30 psi (≈ 2 atm).

Foram realizados dois ensaios, um com e outro sem adição de água. Para tal, adicionaram-se pequenas quantidades de amostra (≈ 67 g), retirada de diferentes partes do resíduo para ser o mais representativa possível, e colocou-se em frascos selados de 590 ml. Num dos frascos foram também adicionados 100 ml de água (figura 19). Colocaram-se os frascos numa incubadora da marca Lovibond, a 35 ° C com agitação permanente de um agitador orbital, Ika KS 130 Control, a 200 rpm durante 48 dias. Foi medida a pressão antes de os frascos serem introduzidos na estufa e depois a medição foi feita cerca de 2 e 3 vezes por semana.



Figura 17 - Transdutor de pressão utilizado no ensaio Batch.



Figura 18 - Frascos utilizados no ensaio Batch, sem água do lado esquerdo e com água do lado direito.

A composição em gás metano do biogás foi analisada num cromatógrafo gasoso, GC, da marca Dani 1000 (figura 20). As condições da análise foram as seguintes:

- Coluna: Nukol Capillary Column 30m × 0,53 mm × 0,5 µm film Thickness
- Temperatura da coluna: 40° C
- Temperatura do injetor: 120° C
- Temperatura do detector: 130° C
- Split: 450 mm/min.
- Gás arraste: Hélio, 3 ml/min.
- Gás auxiliar: Hélio



Figura 19 - Aparelho GC utilizado na determinação da quantidade de metano no biogás

A seringa utilizada para fazer as injeções do gás foi uma Pressure Lock 500 µl, da marca Hamilton. O volume de biogás injectado foi de 500 µl , com duas repetições em cada amostra. Com a curva de calibração do GC, equação 6, determina-se o número de moles de CH₄ presente no biogás:

$$Area = 304299 \times n - 257,45 \quad (6)$$

onde *Area* é a área lida no GC (mv/s) e *n* é o número de moles de CH₄ presente no amostrado do frasco de teste (mmol).

A quantidade de volume de biogás e metano presente nos frascos foi calculada através da equação dos gases ideais:

$$PV = n R T \quad (7)$$

em que:

P é a pressão final medida pelo transdutor mais 1 atm, atm

V é o volume de metano obtido, ml

n é o número de moles de metano, mmol

R é a constante dos gases ideais, 0,082 atm.l/(mol.K)

T é a temperatura do teste, K

Na tabela 6 estão alguns dados utilizados para os cálculos.

Tabela 6 - Dados usados para o cálculo do volume de metano

Vtotal (ml)	590
Vtrabalho (ml)	100
Vheadspace (ml)	490
T (°C)	35

4 Resultados e discussão

4.1 Trabalho de Campo

A aldeia de Malonguete tinha, em Março de 2010, cerca de 593 habitantes, 292 mulheres e 301 homens. As casas de cada família estão muito afastadas umas das outras, sendo dispostas ao longo do rio que passa no meio da aldeia. Este apenas tem água nas alturas de chuva (de Novembro a Fevereiro). É no rio que a comunidade se abastece de água, tendo de cavar no leito do rio, quando ele está seco. Não existe electricidade, nem rede telefónica, nem internet e os acessos à aldeia são muito limitados e em péssimas condições. O clima desta zona é tropical seco. Na zona, a estação Meteorológica não está em funcionamento há muitos anos, por isso só foi possível saber a temperatura média anual no Verão e no Inverno (tabela 7).

A população vive maioritariamente da agricultura de sobrevivência, da caça selvagem e da criação de gado. Existem 500 cabeças de gado, aproximadamente, e estão em currais. As famílias que possuem gado, consideradas as famílias com mais posses, têm o seu curral junto da casa. O gado é levado a pastar pelos homens ou as crianças durante a maior parte do dia, podendo até ficar no pasto durante alguns dias. Assim, não existe qualquer tipo de recolha e armazenamento de chorume/estrume nem qualquer tipo de aplicação ou tratamento. Na tabela 7, apresentam-se alguns dados recolhidos na aldeia.

Tabela 7 - Dados recolhidos relativos à aldeia

$T_{\text{Média_Verão}}$ (°C)	$T_{\text{Média_Inverno}}$ (°C)	N° Habitantes	N° Famílias	N° Crianças	N° Cabeças gado	Peso médio/cabeça (kg)	$t_{\text{médio em curral}}$ (h)
30	20	593	64	110	≈ 500	300	8

Devido ao vasto número de cabeças de gado e a não existir qualquer tipo de tratamento dos resíduos provenientes, estes podem ser aproveitados para a produção de biogás, evitando a desflorestação da zona e prevenindo problemas de saúde que daí podiam advir.

Até à data, no sul de Moçambique não foi explorada a produção de biogás, dificultando assim a implementação desta tecnologia nas comunidades rurais. A população desconhece esta

temática e tem dúvidas quanto ao seu funcionamento e vantagens, podendo também questionar os seus costumes, hábitos e cultura que são tão valorizados neste país.

Assim, optou-se por começar por produzir biogás para utilização directa num fogão no refeitório da escola primária, uma vez que é nas crianças que se deve começar a incutir a mudança, sendo mais fácil nelas do que nos adultos, principalmente neste tipo de comunidades. Além disso, as crianças aprendem muito mais rapidamente e mostram mais interesse pela mudança. Com os benefícios que este projecto poderá trazer, as famílias poderão ficar mais consciencializadas ao perceber as vantagens deste processo e melhorias na comunidade, o que poderá estimular a implementação desta técnica de tratamento de resíduos e produção de energia.

A gestão de transporte do chorume ficaria a cargo das crianças, que recolham o chorume do seu curral e levá-lo-iam até ao recinto da escola onde está o digestor. Carregariam o digestor com a quantidade ideal para uma refeição por dia para cada criança (lançam soja uma vez por dia) e deixam digerir durante aproximadamente 30 dias.

Relativamente ao tipo de material do digestor, verificou-se que se poderia optar por construir um digestor em cimento, figura 21, ou usar uns reservatórios de plástico, Plastex, que são muito vulgares em Moçambique, figura 22. Optou-se pela segunda alternativa, pois já está construído e não apresenta fugas, como pode acontecer no cimento.



Figura 20 - “argolas” de cimento



Figura 21 - Tanques (da Plastex)

Por fim, houve um contacto com a fábrica que produz os tanques, Plastex LDA (Maputo), para se obter informações sobre os reservatórios existentes e verificar a possibilidade de se adaptar esses reservatórios aos reactores que vão ser dimensionados. As medidas padrão, bem como os preços dos modelos existentes estão sumarizados na tabela 8.

Tabela 8 -Características dos tanques verticais da Plastex

Tanques	Capacidade (l)	Diâmetro (m)	Altura (m)	Preço MTS	Preço €
Tanques PL01	500	0,91	1,00	3685	88,25
Tanques PL08	1000	1,07	1,30	5245	125,61
Tanques PL03	2500	1,45	2,08	8307	198,94
Tanques PL04	5000	1,75	2,16	12168	291,41
Tanques PL07	10000	2,26	3,16	25740	616,45

4.2 Trabalho Laboratorial

4.2.1 Caracterização do Resíduo

Nos dois ensaios feitos para determinar os sólidos totais e os sólidos voláteis verifica-se que ambos os ensaios deram bastante próximos um do outro, como era previsto. Cerca de 17 % da amostra analisada é matéria seca e dessa matéria seca 88 % é volátil.

É difícil pesar a mesma quantidade de massa para todos os ensaios realizados, uma vez que a amostra é sólida e pesam-se sempre pequenas quantidades.

As tabelas 9 e 10 mostram os resultados dos ST e SV.

Tabela 9 - Resultados dos Sólidos Totais

Amostra	m (g)	ST (g ST/g)
1	4,667	0,165
2	4,714	0,168
Média		0,167
Desvio padrão		0,002

Tabela 10 - Resultados dos Sólidos Voláteis

Amostra	m (g)	SV (g SV/g)
1	4,667	0,146
2	4,714	0,147
Média		0,147
Desvio padrão		0,001

As concentrações obtidas para o NTK, de acordo com o procedimento adoptado da norma NP EN ISSO 5983-1, foram acompanhadas por um ensaio de verificação com ácido nicotínico. Obteve-se uma recuperação de 112,3 %. A tabela 11 mostra os resultados obtidos para a amostra em estudo.

Tabela 11 - Resultados da determinação NTK

Amostras	m (g)	N (mg N/g)	N (g N/g ST)
1	1,0792	6,87	0,041
2	1,1933	6,17	0,037
Média		6,52	0,039
Desvio padrão		0,49	0,003

Na seguinte tabela (tabela 12) estão apresentados os resultados da determinação da CQO. A concentração (g O₂/g ST) nas duas amostras não é muito concordante uma com a outra, uma

vez que as quantidades mássicas adicionadas também são um pouco diferentes devido à dificuldade de pesar quantidades tão pequenas de resíduo sólido. Outro problema que também pode ter influenciado estes resultados foi o facto de o máximo da gama dos kits ser 10 000 mg/ L e numa das amostras (amostra 1) ter-se lido no espectrofotómetro uma concentração de 9390 mg/L, o que é considerado uma “turbação alta”, segundo o espectrofotómetro.

Tabela 12 - Resultados da determinação da CQO

Amostra	m resíduo (mg)	Concentração lida (mg/l)	Concentração (g/g)	Concentração (g/g ST)
1	34,7	9390	0,27	1,62
2	8,1	2650	0,32	1,96
Média			0,30	1,79
Desvio padrão			0,04	0,24

Em relação à determinação do fósforo total, mesmo já se tendo usado uma amostra líquida, teve de se voltar a fazer algumas diluições para se poder ler a absorvância dentro da gama da curva de calibração do espectrofotómetro. Os resultados estão apresentados na tabela 13. É de referir que apesar de se ter usado uma amostra líquida que tinha a mesma massa de resíduo, ao transferirem-se as amostras para os matrizes, o conteúdo a transferir pode não ser exactamente todo igual, podendo uns conter restos de palha e outros não, por exemplo.

Tabela 13 - Resultados da determinação do Fósforo Total

Amostra	m (g)	P (g P/g)	P (g P/g ST)
1	10,443	0,0005	0,003
2	10,443	0,0008	0,005
3	10,443	0,0007	0,004
Média		0,0007	0,004
Desvio padrão		0,0002	0,001

Por fim, observam-se na tabela 14 os resultados da alcalinidade. Para a primeira amostra o valor da alcalinidade foi de 13,3 g CaCO₃/g ST e para a segunda amostra um pouco mais alto, 15,4 g CaCO₃/g ST.

Tabela 14 - Resultados da Alcalinidade

Amostra	m(g)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Alcalinidade (g CaCO ₃ /g ST)
1	10,443	2310	13,3
2	10,443	2670	15,4
Média		2490	14,3
Desvio Padrão		2546	1,5

A seguir está apresentada a tabela 15 que sintetiza os resultados apresentados em cima e alguns valores encontrados na literatura.

Tabela 15 - Comparação das amostras em estudo com dados encontrados na literatura

	Amostra em estudo	Neves et al., 2009 ^[25]	Arikan et al., 2006 ^[26]	Rico et al., 2007 ^[27]	El-Mashad et al., 2004 ^[28]
NTK (g/g ST)	0,039	0,071		0,055	0,043
CQO(g/ g ST)	1,790	1,393		1,205	1,22
Ptotal (g / g ST)	0,004		0,081	0,002	
Alc (g/g ST)	14,300		17,46		

É de notar o facto de análises feitas ao tipo de resíduo em causa serem bastante complicadas, uma vez que o tipo de resíduo varia muito com o tipo de alimentação, podendo sempre conter restos que não foram bem digeridos e palhas. Assim, é normal que os valores nem sempre sejam concordantes.

4.2.2 Produção de Biogás

Os resultados dos ensaios em batch realizados para produção de biogás, com e sem água, estão ilustrados na figura 23, onde se mostra a variação de pressão relativa ao longo do tempo. Verificou-se, que o volume de biogás produzido ao fim de 50 dias foi de 262 ml e 156 ml de biogás para o ensaio com água e sem água, respectivamente. Por análise em GC,

determinou-se que a quantidade de metano nos ensaios com e sem água foi de 23 ml e 31 ml, respectivamente.

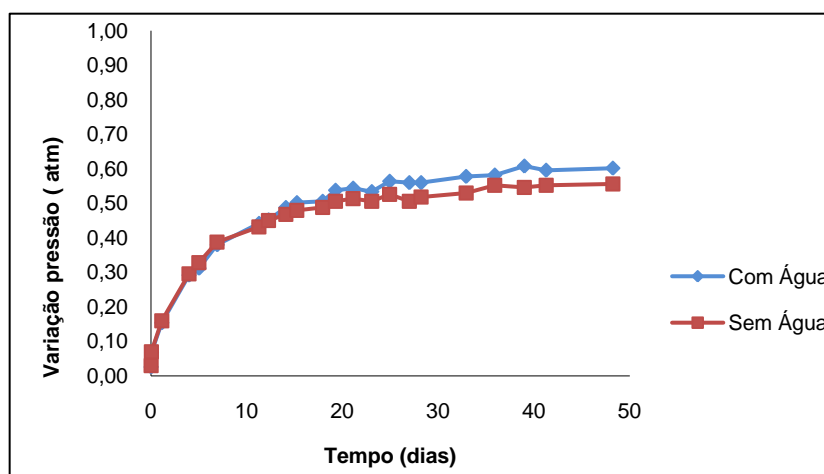


Figura 22 -Resultados do ensaio Batch (variação de pressão nos frascos em função do tempo)

O valor teórico de metano, caso a degradação da CQO fosse 100% deveria ser de 6224 ml e 6141 ml para o ensaio com água e sem água, respectivamente. Na tabela 16 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 16 - Volume de biogás, volume de metano experimental e teórico e produção de biogás para os dois ensaios

Ensaio	m (g)	V _{biogás} (ml)	CH ₄ experimental (ml)	Produção CH ₄ (m ³ /kg ST)	Produção CH ₄ (m ³ /kg SV)	CH ₄ teórico (ml)
Com água	67,6	262	23,11	0,0003	0,002	6224
Sem água	66,7	156	30,55	0,0005	0,003	6141

Na tabela 17 estão compilados alguns valores da produção de biogás encontrados na literatura, assim como os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 17- comparação dos ensaios Batch realizados com dados encontrados na literatura

	Produção CH ₄ (m ³ /kg SV)
Ensaio com água	0,0003
Ensaio sem água	0,0005
Arikan et al., 2006 ^[26]	0,256
Rico et al., 2007 ^[27]	0,307

A quantidade de metano produzida experimentalmente neste trabalho foi muito inferior aos valores encontrados na literatura. Tal pode ser explicado pelo facto de os ensaios terem sido realizados sem adição de inoculo, quando os resultados publicados por outros autores utilizaram um inóculo.

4.3 Projecto dos Reactores para a aldeia

Após o trabalho de campo e do trabalho laboratorial efectuado, é então possível dimensionar os dois reactores para que mais tarde possam ser implementados na aldeia, para benefício das crianças que frequentam a escola.

O reactor deve ter forma cilíndrica e estar praticamente abaixo da superfície da terra para se obter um melhor funcionamento, pois, para além de manter a temperatura constante, proporciona uma melhor segurança para a população em geral. A figura 24 mostra a geometria do reactor.

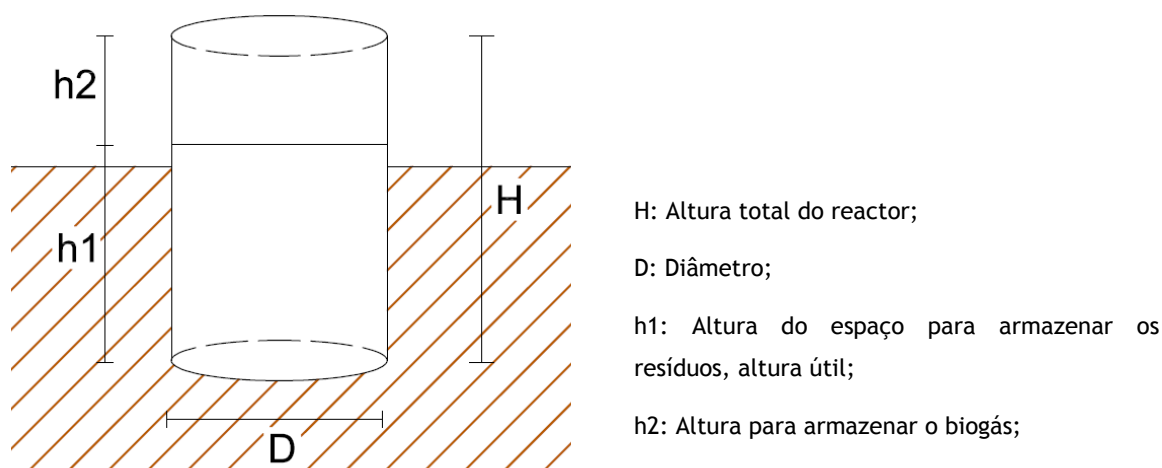


Figura 23 -Esquema do reactor

Para uma melhor eficiência na digestão anaeróbia e, segundo a literatura, deve-se adicionar água numa proporção de 1:5 ^[29], 1:3 ^[30], 1:1 ^[31] (1 kg de chorume por kg de água). Neste caso, e devido à escassez de água na zona, considera-se que o resíduo apresenta as mesmas características que o que foi analisado e que não se adicionará água, ou, no máximo, adicionar-se-á água correspondente a 50% do peso de chorume para facilitar a digestão, uma vez que resíduo a utilizar poderá não ter tanta humidade como aquele que foi testado.

Considera-se 30 dias como o tempo de retenção, tanto para o Verão, como para o Inverno, pois é o tempo que normalmente é usado para este tipo de resíduo: 30-40 dias e para temperaturas mais elevadas 10-30 dias ^[29]. Por outro lado, no ensaio Batch, sem água, o volume de biogás não aumentou muito após esse tempo.

Como já foi referido anteriormente, as casas das famílias estão bastante afastadas umas das outras, acontecendo o mesmo com os currais, muitos estão a quilómetros da escola. Assim, opta-se por só se considerar metade dos animais existentes. As expressões aqui apresentadas são baseadas na digestão de chorume para um regime mesófilico a cerca de 30 ° C, podendo ser mudada para outros parâmetros, caso se venha a verificar necessidade para tal.

4.3.1 Definição da necessidade mensal de Biogás

Começou-se por calcular as necessidades de biogás que é preciso para alimentar as crianças enquanto estão na escola (1 refeição por dia por criança).

$$N_{biogás} = t \times Q \quad (8)$$

Em que $N_{Biogás}$ (m^3) é a quantidade de biogás necessário, t (h) é o número de horas necessário para preparar uma refeição por dia para cada criança, Q (m^3/h) é quantidade de biogás necessária para o fogão por hora.

Para se determinar a necessidade de biogás sabe-se que normalmente são necessários 0,2-0,4 m^3/h de biogás para cozimento no fogão. Assim, considerou-se um valor de 0,3 m^3/h , pois é o valor médio do intervalo. ^[32] Quanto à duração de preparação das refeições, e visto que é para cozinhar para 110 crianças, considerou-se que seriam necessárias 3 horas por dia para preparar as refeições. Na tabela 18, apresenta-se a quantidade de biogás necessário.

Tabela 18 - Necessidades de Biogás

Biogás necessário (m ³ /dia)	0,9
Biogás necessário (m ³ /semana)	4,5
Biogás necessário (m ³ /mês)	18

4.3.2 Definição da necessidade mensal de chorume

Seguidamente, determinou-se a necessidade mensal de chorume necessário para a produção de biogás, $N_{MP,nec}$ (kg), bem como a quantidade de chorume produzido pelos animais da aldeia, $N_{MP,prod}$ (kg):

$$N_{MP,nec} = \frac{N_{Biogás}}{c} \quad (9)$$

$$N_{MP,prod} = N_A \times p \quad (10)$$

Em que c (m³/kg) é a quantidade de biogás que se produz por quilo de chorume, N_A é o número de animais e p (kg/animal) é peso de chorume que cada animal produz diariamente.

Para os cálculos considerou-se $p = 10$ kg/animal, uma vez que os animais da aldeia aparentarem serem mais magros que os da Europa, e $c = 0,002$ m³/kg ST, pois foi o valor resultante da produção de biogás no ensaio Batch sem água.

Contudo, como o valor obtido de c foi muito pequeno e bastante diferente do que era esperado comparativamente com a literatura biogás, optou-se por calcular em simultâneo as necessidades de matéria-prima com o valor teórico. As considerações feitas estão apresentadas na tabela 19 e as necessidades de matéria-prima e a sua disponibilidade estão presentes na tabela 20.

Tabela 19 - Considerações feitas para determinar as necessidades e disponibilidade de matéria-prima. ^[32]

25 kg chorume → 1 m ³ biogás = 0,04m ³ /kg ST	
Peso de chorume diário por animal (kg/animal)	10
Número de animais contabilizados para o projecto	250

Tabela 20 - Resultados das necessidades e disponibilidade de matéria-prima.

	Situação 1 (c=0,002 m ³ /kg)	Situação 2 (c=0,04 m ³ /kg)
Necessidade de matéria – prima (kg)	9000	450
Disponibilidade de matéria – prima (kg)	2500	2500

Assumindo o valor determinado experimentalmente (situação 1), verifica-se que a disponibilidade de matéria-prima não é suficiente para o objectivo pretendido, pelo que se considera para dimensionamento dos reactores, o valor da literatura (situação 2).

Por outro lado, a disponibilidade de matéria-prima será ainda inferior a 2500 kg/mês, pois os animais apenas estão no curral 1/3 do dia, e o restante tempo estão a pastar. Durante a pastagem, os resíduos produzidos são perdidos, pelo que assume-se que estão disponíveis os gerados no curral, cerca de 833 kg/dia. Conclui-se portanto, que os resíduos existentes no curral excedem o valor necessário (situação 2), pelo que podem vir a ser posteriormente utilizados para futuros digestores.

4.3.3 Carga e Volume Útil do digestor

A carga de entrada no digestor é dada através da seguinte expressão:

$$C_{digestor} = Q_c + Q_a \quad (11)$$

sendo $C_{digestor}$ (kg) a carga de entrada no digestor, Q_c (kg) a quantidade de chorume e Q_a (kg) a quantidade de água a juntar ao digestor.

No cálculo da quantidade de chorume deve-se considerar um factor de segurança, para o de o rendimento da reacção ser inferior ao esperado, ou ao facto de ser necessário mais biogás para cozinhar durante o inverno, pelo que se considerou um sobredimensionamento de mais 15 %.

Também foi referido anteriormente, que devido à escassez de água na aldeia, não se entraria com este parâmetro. No entanto, poderá ser útil adicionar alguma água, seja para ajudar no processo no processo da digestão anaeróbia como também para evitar que o chorume não seque. Assim, será feito um dimensionamento considerando que, no máximo, a quantidade de

água a adicionar será cerca de metade da que se adicionará de chorume. As quantidades máximas de chorume e água a adicionar ao reactor são apresentadas na tabela 21.

Tabela 21- Quantidade de chorume e água a adicionar no reactor por mês

Quantidade de chorume (kg/mês)	518
Quantidade de água (kg/mês)	250

Depois de se saber a carga de entrada no digestor, pode-se calcular o volume útil do digestor através da seguinte expressão:

$$V_{\text{útil}} = \frac{Q_c}{\rho_c} + \frac{Q_a}{\rho_a} \quad (12)$$

sendo que $V_{\text{útil}}$ é o volume útil do digestor ($\text{m}^3/\text{mês}$), ρ_c a massa volúmica do resíduo (kg/m^3), ρ_a a massa volúmica da água (kg/m^3). Para o cálculo do $V_{\text{útil}}$ assumiu-se ao valor de $\rho_c = 1037 \text{ kg}/\text{m}^3$,^[28] tendo-se obtido um volume de 750 litros (tabela 22).

Tabela 22 - Resultados da carga de entrada do digestor e do volume útil

Carga_digestor (kg/mês)	768
V_útil ($\text{m}^3/\text{mês}$)	0,75

4.3.4 Dimensionamento do Digestor

Conhecido o volume útil necessário, é possível determinar o volume total e as suas dimensões. O volume total é dado pela seguinte expressão:

$$V_t = \frac{\pi \times D^2}{4} \times H \quad (13)$$

$$V_t = V_1 + V_2 \quad (14)$$

$$V_1 = 0,7 \times V_t \quad (15)$$

$$V_2 = 0,3 \times V_t \quad (16)$$

Onde V_t (m^3) é o volume total do reactor e D é o seu diâmetro (m), H (m) é a altura total, V_1 (m^3) é o volume útil, V_2 (m^3) é o volume para armazenar o biogás. Considera-se que o espaço

para armazenar o biogás é 30% do volume de chorume. Assim, determina-se o total bem como o volume para armazenar o biogás. (ver tabela 23).

Tabela 23- Volume do reactor

$V_{\text{útil}} \text{ (m}^3\text{)}$	0,75
$V_{\text{armazenar biogás}} \text{ (m}^3\text{)}$	0,3
$V_{\text{total}} \text{ (m}^3\text{)}$	1,07

Após a análise da tabela 8 verificou-se que se utilizaria um tanque com capacidade aproximada de 1000 L. Na tabela 24, estão apresentadas as medidas padrão, diâmetro e altura, bem como o volume total efectivo do reactor.

Tabela 24 - Dimensões e volume efectivo do reactor

$D \text{ (m)}$	1,07
$H \text{ (m)}$	1,30
$V_{\text{total}} \text{ (m}^3\text{)}$	1,17

A figura 25 mostra as dimensões do reactor.

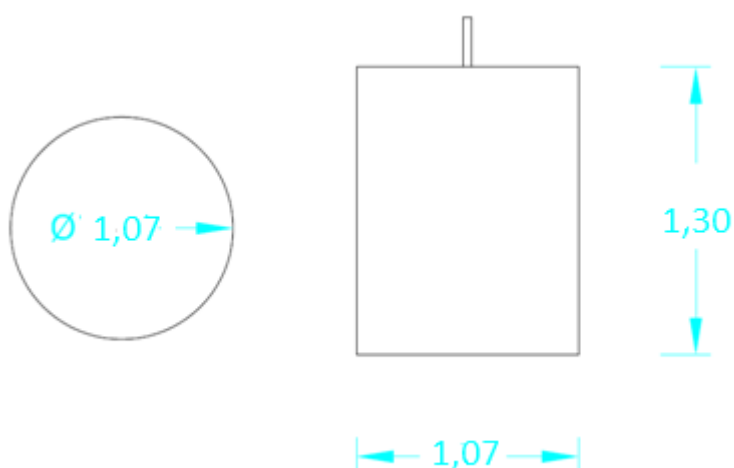


Figura 24 - Representação do reactor com as dimensões

4.3.5 Funcionamento do digestor

Com base nos modelos rurais apresentados na introdução, o digestor deverá ter uma entrada lateral para o resíduo, uma saída no topo para o biogás, e uma saída lateral para a lama, ver figura 26. A entrada da carga fica a uma altura de 0,8 m e a saída fica no fundo do tanque.

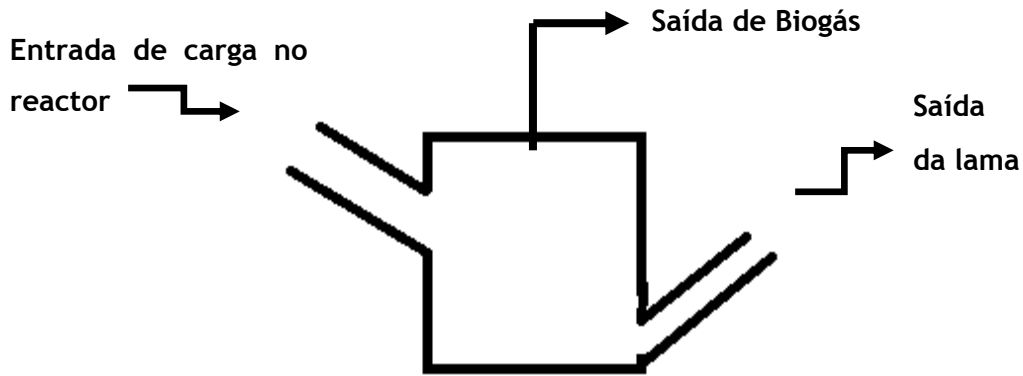


Figura 25 - Esquema do reactor

A carga inicial máxima de 518 kg de chorume e 259 kg de água será colocada no reactor durante a primeira semana, e, de seguida, dá-se arranque ao processo durante 4 semanas, 1 mês. No fim da 3ª semana, as crianças já podem usufruir do biogás produzido até aí e fazer um novo carregamento. Este carregamento corresponderá a uma carga semanal e será efectuado uma vez por semana, todas as semanas a partir da 3ª, conforme ilustrado na figura 27.

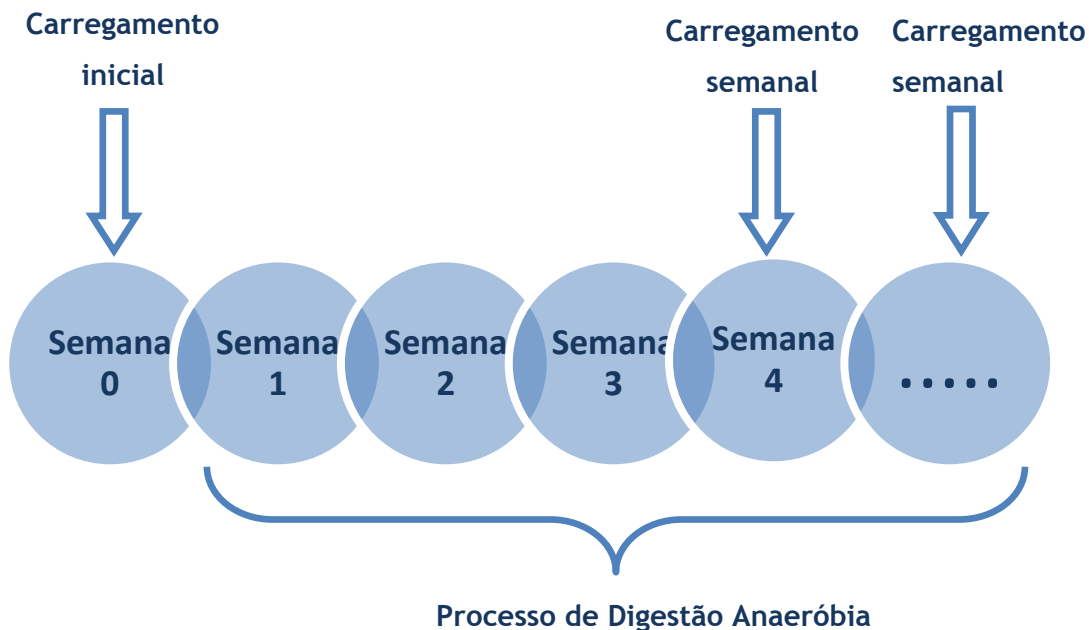


Figura 27 - Esquema de carga do reactor

4.3.6 Cuidados a ter ao instalar o digestor

Existem alguns cuidados que se devem ter ao se escolher o sítio onde colocar o digestor, entre eles destacam-se:

- O digestor deve ser instalado num local bem arejado, para evitar cheiros quando estiver a ser carregado.
- O digestor deve estar num sítio vedado, de modo a que só as pessoas detentoras de conhecimentos para o seu manuseamento e gestão possam ter acesso.
- Na altura de carregar ou limpar o digestor deve-se ter muito cuidado, pois o gás produzido é inflamável.
- Antes de se fazer a limpeza, deve-se ter a certeza que já não se está a produzir mais biogás, a fim de evitar acidentes.

5 Conclusões

Este trabalho visou a produção de biogás para o desenvolvimento rural de uma comunidade carenciada em Moçambique, com vista à implementação de um digestor anaeróbio na aldeia de Malonguete.

Foi realizado trabalho laboratorial, onde houve uma breve caracterização de um resíduo semelhante ao que irá ser utilizado no processo da digestão anaeróbia e produção de biogás, e um trabalho de campo, onde foram identificadas as principais dificuldades da população e levantamento de dados.

Na caracterização do resíduo pode-se concluir que este continha: 0,039 g N/g ST, 1,79 gO₂/g ST, 0,004 g P/g ST e uma alcalinidade de 14,30 g/g ST. Relativamente à produção de biogás, estudou-se o efeito de conduzir o processo de digestão anaeróbia com e sem adição de água. Conforme esperado produziu-se mais biogás no ensaio realizado com água (262 ml) do que no ensaio sem água (156 ml). Esta diferença era esperada uma vez que a adição de água no ensaio ajuda o processo da digestão (primeira etapa do processo é a hidrólise). Verificou-se também que o rendimento obtido em ambos os ensaios foi muito inferior aos valores esperados, sendo a discrepância justificada pela introdução de um inóculo nos trabalhos publicados, o que não sucedeu neste trabalho.

No projecto da unidade de produção de biogás, conclui-se que o melhor seria utilizar 1 reactor com capacidade de 1000 L de modo a se poderem utilizar os tanques existentes no mercado moçambicano. O reactor será operado de forma semi-contínua, pelo que se terá que adaptar o tanque com entrada e saídas necessárias.

Com esta dissertação foi possível aferir quais as necessidades para a construção de uma unidade de produção de biogás para a escola de Malonguete, permitindo que a comunidade se torne mais auto-suficiente, contribuindo para o desenvolvimento rural e sustentável, sendo uma mais-valia tanto para a população da aldeia como para o país.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objectivos Realizados

Houve uma deslocação ao terreno para se conseguir perceber quais as necessidades da comunidade de Malonguete e fazer um estudo para a possível implementação do digestor. Apesar das dúvidas iniciais apresentadas pela comunidade relativamente à tecnologia a ser implementada, devido à novidade daquela tanto na comunidade como no país, e após algumas sessões de esclarecimento, a comunidade aprovou o projecto.

Ainda no terreno fez-se uma procura de possíveis materiais locais para a construção do digestor e contacto com fábricas.

No laboratório, houve uma caracterização do resíduo a ser utilizado na digestão anaeróbia e uma actividade experimental com o objectivo de se produzir biogás de uma maneira simples, tentando-se adequar à realidade Moçambicana.

Por fim, houve o projecto da unidade de produção de biogás por utilização directa num fogão na escola primária.

6.2 Limitações e Trabalho Futuro

É importante referir que apesar do tipo de resíduo utilizado neste estudo e o resíduo disponível em Malonguete serem do mesmo tipo, podem, contudo, ser bastante distintos quanto às suas características devido às diferenças climatéricas de Portugal e Moçambique, mas também devido à diferença entre a alimentação e actividade dos animais. Assim, propõe-se num trabalho futuro, uma colaboração entre a FEUP, EpDAH e a Universidade Eduardo Mondlane (Maputo), para que se venham a realizar lá as análises de caracterização do chorume e ensaios de produção de biogás com o próprio resíduo recolhido na aldeia.

Adicionalmente, deve-se estudar a questão de introdução de um inóculo para a produção de biogás, esperando-se, assim, uma maior produção de biogás por quantidade de chorume utilizado. Esse inóculo será proveniente dos resíduos já digeridos na experiência anterior e que são ricos em microrganismos que promovem o processo de digestão anaeróbia.

6.3 Apreciação final

Quando soube que era este o tema da minha dissertação achei bastante aliciante. Ajudar uma comunidade, onde a realidade é muito diferente de Portugal foi um desafio, principalmente porque tinha de lidar com pessoas, com uma cultura e maneira de pensar tão diferentes da nossa, ouvi-las e perceber o que para elas é realmente importante.

Gostei muito de desenvolver este trabalho. Além de ser bastante importante para o desenvolvimento daquelas pessoas e da aldeia, é muito gratificante saber que irá contribuir, nem que seja só um bocadinho, para esse desenvolvimento.

7 Bibliografia

- [1] Neves, Lúcia Maria Gonçalves Ferreira das. "*Anaerobic Co-Digestion Of Organic Wastes*", *Tese Doutoramento, Universidade do Minho, 2009.*
- [2] *Europa - Sínteses da legislação da EU.*
http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environmente/l28027_pt.htm.(acedido em 29 Maio 2010)
- [3] Kroff, Pablo Dario Araya. "*Quantitative image analysis as a diagnostic tool for identifying structural changes of anaerobic granular sludge*",*Tese Doutoramento, Universidade do Minho,2006.*
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations.
<http://www.fao.org/mdg/en/>.(acedido a 29 Maio 2010)
- [5] *Manuales de Energias Renovables - "Energia de la Biomasa"* IDAE- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energia", Madrid, 2007.
- [6] European Biomass Asociacion.
<http://www.aebiom.org>.(acedido em 3 Junho 2010)
- [7] Coldebella, Anderson." *Viabilidade do uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para geração de energia eléctrica e irrigação em propriedades rurais*", *programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná , Brasil, 2006.*
- [8] Zachow, Charlan Ricardo. "*Biogas*". *Relatório da unidade curricular de fontes alternativas de energia de Engenharia Mecânica*, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul , 2000.
- [9] "*Biomasa: Digeitores Anaerobios*". *Publicacion IDAE- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energia*", Madrid, 2007.
- [10] Zorg-Biogas.
<http://zorg-biogas.com/library/biogas-production-process>.(acedido a 28 Fevereiro 2010)
- [11] Ministério da Economia,da Inovação e do Desenvolvimento. Meid.
<http://www.min-economia.pt/>.(acedido a 30 Abril 2010)
- [12] <http://naturlink.sapo.pt/print.aspx?menuid=5&cid=10094&viewall=true&print=true>.
(acedido a 30 Abril 2010)

- [13] Pontes, Miguel Raposo Cabido. "*Potencialidade da Agricultura Açoriana na Produção Biogás.*" Tese Doutorado Universidade dos Açores, 2005.
- [14] Monnet, Fabien. "*An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes.*" Relatório final, Escócia, 2003.
- [15] "*Digestão anaeróbia - Metodologia de desenvolvimento*", publicação da Energia e Desenvolvimento Sustentável- Região Norte.
- [16] Farret, Felix A. et al. "Integration of Alternative Source of Energy. *Integration of Alternative Source of Energy*". Jonhy Wiley & Son , 2006, capítulo 8.
- [17] Renneberg, Reinhard. *Biotechnology for beginners*. AP , páginas:173-179.
- [18] Steinhauser, Dieter Deublein and Angelika. "*BIOGAS from Waste and Renewable Resources*". Wiley-vch, 2008, páginas:9-13,100-119.
- [19] "*Anaerobic Digestion of Animal wastes: Factors to Consider*". Balsam, Jonh, Publication of ATTRA - National Sustainable Agriculture Information Service, 1-800-346-9140, 2006 (www.attra.ncat.org).
- [20] Oliveira, Rosario. "Apontamentos Unidade Curricular Resíduos Sólidos." Uinversidade do Minho , 2000.
- [21] Nishimura, Rafael. "*Análise do Balanço Energético do sistema de produção de biogás em granja de suínos: Implementação de uma aplicação computacional*". Brasil , 2009,páginas:18-19.
- [22] <http://morenocris.files.wordpress.com/2010/01/moambi1.gif>. (acedido a 20 de Abril de 2010)
- [23] APHA. "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*", Washington, DC: American Public Health Association, 1999.
- [24] EN -ISO 5983 -1 "Alimentos para animais - Determinação do teor de azoto e cálculo do teor de proteína bruta, parte 1: Método Kjeldahl"- *Norma Europeia*, Agosto de 2007.
- [25] Neves, L., Oliveira, R., Alves, M.M. "Fate of LCFA in the co-digestion of cow manure, food waste and discontinues addition of oil", *Waterresearch* 43 5142-5150 , 2009.
- [26] Arikan, Osman A. "The fate and effect of oxytetracycline during and anaerobic digestion of manure from therapeutically treated calves", 2006.
- [27] Rico, J.L.,Garcia,H., Rico, C., Tejero, I. "Characterization of solid and liquid fractions of dairy manure with regard to their component distribution and methane production", *Bioresource Technology* 98 971-979, 2007.

[28] El-Mashad, Hamed M., Van Loon, Wilko K.P., Zeeman, Grietje, Bot, Gerard P.A. "Rheological properties of dairy cattle manure", *Bioresource Technology* 96 (2005) 531-535, 2004.

[29] Relatório Ingeniería sin Fronteras. " Diseño e Impementação de Biodigestores en Comunidades Rurales de la Parte Alta de la Subcuenca Del Rio Viejo, Jinotega, Nicaragua", 2008

[30] Ezekoye, V.A., Okeke, C.E. "Design, Construction, and Performance Evaluation of Plastic Biodigester", *Publicação Universidade da Nigéria*, 2006, página: 1.

[31] Custódio, Lidiane Rosa, Junior, M.D. Wilson, Júnior, P.T. Edvaldo, Serafim, Eriberto José, Valadares, Guedes Camila. "Biodigestores- Energia, saneamento e fertilidade para Zona rural." Página: 1.

[32] Polprasert, Chongrak. "Organic Waste Recycling". Wiley, 2ª edição, 1996. Capítulo 4

Anexo 1 - Instruções do Equipamento do NTK

IAL DE INSTRUCCIONES CODIGO 80158 REV A29/10/03 (Sujetas a modificaciones sin previo aviso) Pag.: 18

**ESTE ENSAYO REQUIERE LA MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS
MANIPULATION OF CORROSIVE PRODUCTS IS REQUIRED**



02 DETERMINACIÓN DE LA PROTEÍNA BRUTA POR EL MÉTODO DE KJELDAHL. (Método directo).

Principio:

Este método consiste en mineralizar la muestra con ácido sulfúrico concentrado y alcalinizar con hidróxido de sodio. El amoníaco liberado es arrastrado por destilación y reabsorbido sobre ácido bórico. La posterior titulación con ácido clorhídrico permite el cálculo de la cantidad inicialmente presente de proteína en la muestra.

Reactivos necesarios:

Ácido sulfúrico 96% (d=1.84).
NaOH, solución 35% (p/v).
Indicador mixto, especial para titulaciones de amoníaco.
Catalizador Kjeldahl
Ácido bórico al 4% (p/v).
HCl 0.25N.
Agua destilada
Piedra pómez en granos

Nota: Es muy importante que todos los reactivos estén totalmente exentos de nitrógeno.

3. Material necesario:

- Balanza de resolución 0.1 mg.
- Unidad digestora (Bloc-Digest).
- Colector / Extractor de humos.
- Destilador Pro-Nitro I ó II
- Bureta para valoración.

4. Digestión:

Pesar alrededor de 1 gramo de muestra perfectamente molida y homogeneizada en un papel exento de nitrógeno e introducirlo en un tubo de digestión.

Añadir al tubo con muestra 10 g de catalizador Kjeldahl, 25 ml de ácido sulfúrico al 96% (d=1.84), y algunos granulos de piedra pómez tratada.

Colocar los tubos de digestión con la muestras en el Bloc-digest con el colector de humos funcionando.

Realizar la digestión a una temperatura entre 350..420°C y un tiempo que puede variar entre 1 y 2h (ver tabla de la página 12)

Al finalizar, el líquido obtenido es de un color verde o azul transparente dependiendo del catalizador utilizado.

Dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente.

Evitar la precipitación agitando de vez en cuando.

Dosificar lentamente 50 ml de agua destilada en cada tubo muestra. **(Tener precaución con la violencia de la reacción).**

Dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente.

Si se produce precipitación agitar o calentar ligeramente.

5. Destilación

Dosificar 50 ml de ácido Bórico en un matraz erlenmeyer, y algunas gotas de indicador mixto. Colocar el erlenmeyer en la alargadera del refrigerante teniendo la precaución de que ésta quede sumergida dentro del ácido Bórico.

Una vez colocados el tubo de muestra y el erlenmeyer con el ácido Bórico, dosificar unos 50ml de NaOH e iniciar la destilación

La destilación debe prolongarse el suficiente tiempo para que se destilen un mínimo de 150 ml, aproximadamente de 5 a 10 minutos.

6. Ensayo en blanco:

Después de la destilación de una muestra realizar un ensayo en blan-

co, aplicando el método descrito, pero utilizando 5 ml de agua destilada.

7. Valoración:

Valorar con ácido clorhídrico 0.25N el destilado obtenido, hasta que la solución vire de verde a violeta.

Calcular la cantidad de nitrógeno detectado.

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{1.4 \times (V_1 - V_0) \times N}{P}$$

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrógeno} \times F$$

Siendo:

P = Peso en g de la muestra.

V₁ = Volumen de HCl consumido en la valoración. (ml)

N = Normalidad del HCl

V₀ = Volumen de HCl consumido en la valoración del blanco. (ml)

F = Factor de conversión para pasar de contenido en nitrógeno a contenido en proteínas. Para la proteína bruta acostumbra a usarse un valor de 6.25. Para mayor exactitud, distinguiendo la calidad de la proteína según la naturaleza de la muestra, pueden emplearse otros factores de conversión.

Anexo 2 - Procedimento da CQO



USEPA approved for wastewater

1. Definition

The COD (chemical oxygen demand) expresses the amount of oxygen originating from potassium dichromate that reacts with the oxidizable substances contained in 1 l of water under the working conditions of the specified procedure.

1 mol $K_2Cr_2O_7$ is equivalent to 1.5 mol O_2
Results are expressed as mg/l COD (= mg/l O_2)

2. Method

The water sample is oxidized with a hot sulfuric solution of potassium dichromate, with silver sulfate as the catalyst. Chloride is masked with mercury sulfate. The concentration of green Cr^{3+} ions is then determined photometrically. The method is analogous to EPA 410.4, US Standard Methods 5220 D, and ISO 15705.

3. Measuring range and number of determinations

Cat. No.	Measuring range mg/l COD	Number of determinations
1.14541.0001	25 - 1500	25
1.14691.0001	300 - 3500	
1.14555.0001	500 - 10 000	

For programming data for selected photometers / spectrophotometers see the website.

4. Applications

This test measures organic and inorganic compounds oxidizable by dichromate. Exceptions: some heterocyclic compounds (e.g. pyridine), quaternary nitrogen compounds, and readily volatile hydrocarbons.

Sample material:
In-process controls
Wastewater

5. Influence of foreign substances

The concentrations of foreign substances given in the table lie below the limit at which the determination is interfered with.

Cat. No.	Concentrations of foreign substances in mg/l or %								
	Cl ⁻	Cr ³⁺	CrO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	SO ₃ ²⁻	H ₂ O ₂	NaNO ₂	Na ₂ SO ₄	Na ₃ PO ₄
1.14541.0001	2000	25	50	50	25	50	10 %	10 %	10 %
1.14691.0001	2500	50	100	50	25	50	20 %	20 %	20 %
1.14555.0001	5000	25	50	50	25	10	10 %	10 %	10 %

6. Reagents and auxiliaries

Please note the warnings on the packaging materials!

Store the pack protected from light!

The test reagents are stable up to the date stated on the pack when stored closed at +15 to +25 °C.

Package contents:

25 reaction cells

1 cell with blank (white screw cap); required only when using the SQ 118 photometer

1 sheet of round stickers for numbering the cells

Other reagents and accessories:

Merckoquant® Chloride Test, Cat. No. 1.10079.0001, measuring range 500 - 3000 mg/l Cl⁻

Spectroquant® CombiCheck 20, Cat. No. 1.14675.0001

Spectroquant® CombiCheck 70, Cat. No. 1.14689.0001

Spectroquant® CombiCheck 80, Cat. No. 1.14738.0001

Pipette for a pipetting volume of 1.0 ml

Pipette for a pipetting volume of 2.0 ml

Pipette for a pipetting volume of 3.0 ml

Thermoreactor

February 2008

7. Preparation

- Analyze immediately after sampling.
- Homogenize the samples.
- Check the chloride content with the Merckoquant® Chloride Test. Samples containing more chloride than is stated for the respective test kit in section 5 must be diluted with distilled water prior to determining the COD.

8. Procedure

	114541	114691	114555	
Suspend the bottom sediment in the reaction cell by swirling.				
Pre-treated sample	3.0 ml	2.0 ml	1.0 ml	Carefully allow to run from the pipette down the inside of the tilted reaction cell onto the reagent (Wear eye protection! The cell becomes hot!).
Tightly attach the screw cap to the cell. In all subsequent steps the cell must be held only by the screw cap! Vigorously mix the contents of the cell. Heat the cell at 146 °C in the preheated thermoreactor for 120 min. Remove the hot cell from the thermoreactor and allow to cool in a test-tube rack. Do not cool with cold water! Wait 10 min, swirl the cell, and return to the rack for complete cooling to room temperature (cooling time at least 30 min). Measure the sample in the photometer.				

Notes on the measurement:

- For photometric measurement the cells must be clean. Wipe, if necessary, with a clean dry cloth.
- Measurement of turbid solutions yields false-high readings.
- The measurement value remains stable over a long term.

9. Analytical quality assurance

The measurement results can be officially recognized under the precondition that analytical quality-assurance measures are taken (DWA A 704). The Spectroquant® CombiCheck products given below can be used for this purpose. Each contains a **standard solution** for checking the photometric measurement system (test reagents, measurement device, handling) and the mode of working and also an **addition solution** for determining sample-dependent interferences (matrix effects). The appropriate CombiCheck product can be found in the following table:

Cat. No.	CombiCheck Cat. No.	Standard solution mg/l COD
1.14541.0001	CombiCheck 20, 1.14675.0001	750
1.14691.0001	CombiCheck 80, 1.14738.0001	1500
1.14555.0001	CombiCheck 70, 1.14689.0001	5000

Characteristic quality data:

In the production control, the following data were determined in accordance with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51:

	114541	114691	114555
Standard deviation of the method (mg/l COD)	± 5.5	± 15.7	± 32.7
Coefficient of variation of the method (%)	± 0.71	± 0.87	± 0.61
Confidence Interval (mg/l COD)	± 14	± 35	± 76
Number of lots	44	25	34

Characteristic data of the procedure:

	114541	114691	114555
Sensitivity: Absorbance 0,010 A corresponds to (mg/l COD)	17	32	47
Accuracy of a measurement value (mg/l COD)	max. ± 30	max. ± 75	max. ± 130

For quality and batch certificates for Spectroquant® test kits see the website.

10. Note

The test reagents must not be run off with the wastewater!
For information on disposal/return for disposal please contact your local Merck organization or Merck dealer.

Merck KGaA, 64271 Darmstadt, Germany, Tel. +49(0)6151 72-2440, Fax +49(0)6151 72-7780
environmental.analysis@merck.de <http://photometry.merck.de>