

## AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA DE ESTERCO OVINO EM CONDIÇÕES TERMOFÍLICAS

Guilherme Costa

Orientador: Eng. Wanderli Rogério Moreira Leite, Msc.

2014/1





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA  
E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA  
DE ESTERCO OVINO EM CONDIÇÕES TERMOFÍLICAS**

**GUILHERME COSTA**

Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental  
Orientador: Wanderli Rogério Moreira  
Leite

Florianópolis – SC  
2014



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Costa, Guilherme  
AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA DE ESTERCO  
OVINO EM CONDIÇÕES TERMOFÍLICAS / Guilherme Costa ;  
orientador, Wanderli Rogério Moreira Leite - Florianópolis,  
SC, 2014.  
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

I. Engenharia Sanitária e Ambiental. I. Leite, Wanderli  
Rogério Moreira. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.  
III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA  
E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA  
DE ESTERCO OVINO EM CONDIÇÕES TERMOFÍLICAS

GUILHERME COSTA

Trabalho submetido a Banca Examinadora como  
parte do requisitos para Conclusão de Curso de  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental –  
TCC II

BANCA EXAMINADORA :



Eng. Wanderli Rogério Moreira Leite, M  
(orientad

  
Eng. Jorge Manuel Rodrigo Tavares, Msc.  
Membro da Banca

  
Prof. Dr. Paulo Belli Filho.  
Membro da Banca

Florianópolis – SC  
AGOSTO/2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Aline Costa, José Volni Costa e Maria Rosélia Goedert Costa, irmã, pai e mãe, respectivamente, e toda minha família por todo suporte.

Agradeço meu orientador Wanderli Rogério Moreira Leite por sua disposição, atenção e conselhos na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao LABEFLU por permitir a realização deste experimento.

Agradeço Eric Wormann Maffazioli e Giulian Sganzerla pelo apoio nas medições experimentais.

Agradeço também a Bruna Scandolaro Magnus pela ajuda nas manipulações laboratoriais.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina.

Enfim agradeço a todos que ajudaram e colaboraram com este trabalho.

## **RESUMO**

A pecuária ovina em Santa Catarina teve um considerável crescimento e desta forma aumenta-se o interesse pelo aproveitamento dos dejetos produzidos. Neste contexto, realizou-se um estudo da avaliação da biodegradabilidade e da produção de metano a partir de dejetos ovinos submetidos à digestão termofílica em escala laboratorial (reatores 300ml). Foram consideradas diferentes relações substrato/inóculo para a montagem do experimento que teve a duração de 28 dias. O monitoramento dos reatores envolveu a medição da produção do metano e análises da degradação da matéria orgânica. Foi observado que a produção de metano foi beneficiada para a relação A/M 0,4:1 e que o volume produzido de metano por kg de matéria original de esterco tratada foi de 0,0624 Nm<sup>3</sup> o que corresponde a uma produção estimada de 0,616 kW.h de energia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ovinos, Metano, Digestão anaeróbia, Biodegradabilidade, Termofílico.

## **ABSTRACT**

The sheep breeding has had a important increase and for this reason also the interest on the use of the manure produced. This study evaluated the biodegradability and methane production from sheep manure by thermophilic digestion in laboratorial scale (reactor 300mL). There were diferent substrate/inoculum ratio for the experiment that lasted a period of 28 days. It was measured the methane production and the biodegradation of the organic matter. It was observed that the methane production was improved at the A/M 0,4:1 ratio and the volume of methane produced by kg of manure in its original mode was 0,0624 Nm<sup>3</sup>, which is equivalent to 0,616 kW.h of energy.

**KEY-WORDS:** Sheep, Biogas, Anaerobic Digestion, Biodegradability, Thermophilic.

## **LISTA DE ABREVIACÕES**

LABEFLU – Laboratório de efluentes líquidos e gasosos

PVC – Policloreto de vinila

N - Nitrogênio

P - Fósforo

AMEAME – Atividade Metanogênica Específica

A/M – Relação Alimento/Microorganismo

DQO – Demanda Química de Oxigênio

SV – Sólidos Voláteis

SF – Sólidos Fixos

ST – Sólidos Totais

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

UV – Ultra Violeta

T - Temperatura

V - Volume

RSV - Redução em Sólidos Voláteis

PPB –Potencial de Produção de Biometano

PCI – Poder Calorífico inferior

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Processo de digestão anaeróbia e microrganismos envolvidos em cada procedimento. ....	18
Figura 2 - Representação do modelo indiano de biodigestor. ....	25
Figura 3- Representação do modelo chinês de biodigestor. ....	26
Figura 4 - Representação do modelo em batelada de biodigestor. ....	27
Figura 5 - Lagoa anaeróbia coberta. ....	28
Figura 6 - Diagrama de funcionamento de uma lagoa anaeróbia coberta. ....	28
Figura 7 - Representação esquemática da composição dos reatores. ....	38
Figura 8 - Representação esquemática das estruturas da bancada de experimento. ....	40
Figura 9 - Vistas laterais da bancada montada e operando. ....	41
Figura 10 - Dinâmica da concentração média de sólidos totais voláteis em cada reator no início e no final do experimento. ....	46
Figura 11 – Produção acumulada de biogás para cada relação A/M. ....	47
Figura 12 - BMP mensurados para cada relação A/M estudada. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de caracterização do substrato (dejeito ovino). .....	35
Tabela 2 – Representação dos valores absolutos de DQO e SV adicionados em cada reator. ....	37
Tabela 3 - Parâmetros relativos aos reatores na partida do experimento $t=0$ s. ....	38
Tabela 4 - Parâmetros de caracterização do inóculo (lodo anaeróbio de digestor secundário).....	43
Tabela 5 - Caracterização do meio reacional ao final do experimento.....	44
Tabela 6 - Definição dos valores de $k_h$ de cada conjunto de reatores. ....	49
Tabela 7 - Consumo em biogás para cada finalidade de uso por dia. ....	49

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Materiais e formas de gasômetros para diferentes pressões de operação. ....	23
Quadro 2 - Composição do biogás. ....	32
Quadro 3 - Poder calorífico inferior. ....	32
Quadro 4 - Comparativo de P.C.I. entre biogás e outros gases. .	33
Quadro 5 – Princípio e método dos procedimentos laboratoriais para determinação dos parâmetros estudados.....	42

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	15
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
3.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA .....	17
3.2.1 Processo de biodigestão anaeróbia .....	17
3.2.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia .....	21
3.3 REATORES ANAERÓBIOS .....	22
3.3.1 Biodigestores .....	22
3.3.2 Tipos de biodigestores rurais no Brasil .....	23
3.4 PPB (POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO) .....	29
3.4.1 Correções dos volumes de metano medidos .....	30
3.4.2 Características do biogás .....	31
3.4.3 Queima do biogás .....	33
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....	34
4.2 EXPERIMENTO LABORATORIAL .....	34
4.3 PROCEDIMENTO DO ESTUDO .....	34
4.3.1 Coleta das amostras .....	34
4.3.2 Análise .....	35
4.3.3 Soluções .....	36
4.3.4 Montagem do experimento de bancada .....	36
4.3.5 Metodologia de medições do volume de metano produzido .....	41
4.3.6 Caracterização dos reatores no final de experimento .....	42
4.3.7 Procedimentos laboratoriais .....	42
4.4 CÁLCULO DA REDUÇÃO DE SÓLIDOS VOLÁTEIS .....	42

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E INÓCULO .....	43
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS REATORES NO FIM DO EXPERIMENTO	43
5.3	BIODEGRADABILIDADE DO SUBSTRATO.....	44
5.4	BIO-METHANE POTENTIAL (BMP) .....	48
5.5	ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA.....	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Percebe-se um incentivo à utilização de fontes renováveis de energia. Inserido neste contexto, a produção de biogás a partir de digestão de matéria orgânica apresenta-se como solução energética e é uma prática estabelecida em alguns países.

Um problema enfrentado por agricultores consiste na dificuldade de acesso a fontes energéticas em regiões mais afastadas para fins como: cocção, resfriamento, aquecimento e iluminação. A lenha é fonte comum de calor, porém é um recurso que deve ser preservado (QUADROS et al., 2010).

As principais fontes energéticas no setor agropecuário são: óleo diesel (58%), lenha (26%), energia elétrica (15%) e outros (1%) (ESPERANCINI et al., 2007).

Em uma situação de pecuária extensiva (onde os animais permanecem constantemente nas áreas cultivadas com forrageiras ou pastagens naturais), os dejetos são dispostos diretamente nas pastagens. Uma característica natural do manejo dos animais em regime semiextensivo (muito popular no estado de Santa Catarina) é o recolhimento do rebanho em galpões chamados apriscos, somente no período noturno, e que consistem principalmente em um abrigo contra chuva, vento e predadores naturais. Esta condição gera acúmulo de dejetos sob o prisco.

Diferentemente de outras formas de obtenção de energia renovável, como culturas energéticas, que consiste no cultivo de plantas para produção de biomassa e posteriormente biogás (LÖTJÖNEN & LAITINEN, 2009), a pecuária não apresenta competição com áreas potencialmente produtoras de alimentos. Isto por que a produção de biogás da pecuária é um subproduto complementar de um sistema de produção de alimento. Para culturas energéticas a área potencialmente produtora de alimentos precisa ser destinada exclusivamente para a produção de biomassa.

O presente trabalho teve como objetivo estudar o potencial de produção de metano a partir de esterco ovino. Para tal, foram desenvolvidos experimentos de biodegradabilidade a fim de gerar dados preliminares para aplicação de digestores anaeróbios em unidades de pecuária ovina visando o aproveitamento energético.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar a biodegradabilidade anaeróbia do esterco ovino e avaliar o potencial uso de metano para fins energéticos.

### **2.2 Objetivo específico**

- Avaliar a biodegradabilidade do esterco ovino em processo anaeróbio submetido a diferentes relações Alimento/Microorganismo;
- Determinar a produtividade de metano e a eficiência de degradação da fração orgânica do esterco ovino;
- Estimar o aproveitamento energético do metano considerando a produção de esterco à escala real.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Contextualização**

Na década de 70, com a crise do petróleo o Brasil procurou investir em alternativas de abastecimento energético a partir de fontes renováveis. Neste período foram importadas tecnologias da China e Índia para produção de biogás através do uso de biodigestores (COSTA, 2006; DEGANUTTI et al., 2002). Com a crescente demanda energética do país, o interesse em aumentar a produção de energia e a diversificação das fontes contribuintes também aumentou.

A alternativa dos biodigestores vem apresentando potencial nas regiões rurais, onde as atividades agropecuárias contribuem com uma importante quantidade de carga orgânica (NEVES, 2010).

O estudo relacionado a tecnologias aplicáveis a propriedades rurais é de interesse nacional, como uma opção para a descentralização das fontes de energia e potencial difusão da ideia de saneamento no meio rural. Tal situação pode representar uma alternativa econômica e a promoção da saúde pública no meio rural, aliado a benefícios para o meio ambiente (BOND, TEMPLETON, 2011).

Os reatores de biodigestão anaeróbia apresentam baixa demanda de área, pouca ou nenhuma demanda de equipamentos, fácil operação, geração de material com alto valor fertilizante e menor potencial poluidor relativo ao decaimento da demanda bioquímica de oxigênio no biodigestor e a produção do biogás (QUADROS et al., 2010).

Segundo Duarte, et al, (2012) a pecuária ovina é uma atividade em expansão em vários estados do Brasil. Predominam propriedades agrícolas de pequeno e médio porte, nas quais, o sistema de criação mais utilizado é o semi-extensivo, onde a permanência dos animais nos apriscos nos períodos noturnos gera o acúmulo do esterco.

O uso inadequado de dejetos pecuários na agricultura pode representar um aporte de nutrientes ao solo danoso. A aplicação de

matéria orgânica não estabilizada no solo pode levar a contaminação das águas pela lixiviação e provocar crescimento vegetal débil causado por efeitos fitotóxicos e pela competição por oxigênio (FERNÁNDEZ et al., 2007; SEGANFREDO, 2001).

O uso de biodigestores confere um grau de tratamento aos dejetos. As principais vantagens dos digestores anaeróbios são: a produção de biogás, produção de fertilizante de baixo impacto ambiental, redução de patógenos do resíduo em questão, melhoria das condições de saúde dos animais e pessoas, promoção do desenvolvimento rural sustentável e descentralização da produção energética (NIELSEN, AL SEADI, POPIEL, 2009).

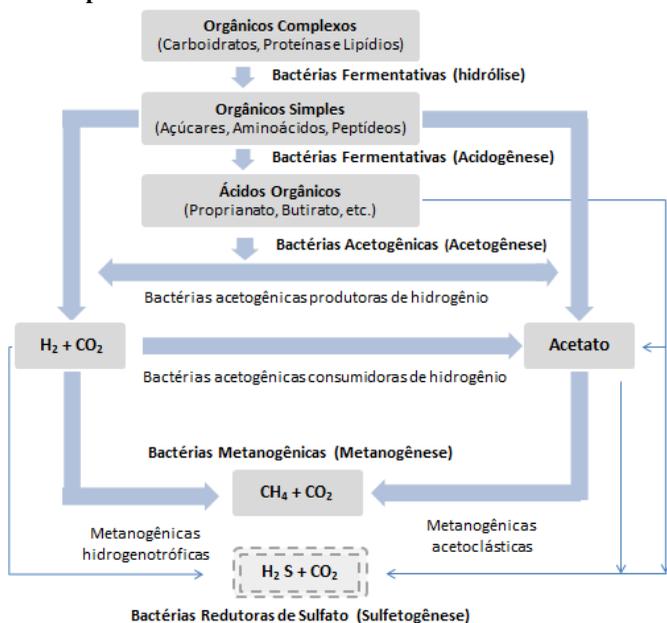
Atualmente, no Brasil, o uso do biogás está limitado a aplicações pontuais. Porém, países como a China, a Índia, a Alemanha, os Estados Unidos e a Dinamarca já acumulam bastante experiência em projetos e programas de produção de biogás (SALOMON, LORA, 2009).

## **3.2 Biodigestão anaeróbia**

### **3.2.1 Processo de biodigestão anaeróbia**

A biodigestão anaeróbia consiste na degradação de matéria orgânica em ausência de oxigênio por um processo fermentativo, resultando na produção de dióxido de carbono, metano e novas células. O processo é dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na (Figura 1), podem ser observadas as etapas relacionadas ao processo de digestão anaeróbia com seus respectivos grupos microbiológicos responsáveis.

**Figura 1- Processo de digestão anaeróbia e microrganismos envolvidos em cada procedimento.**



**Fonte (CHERNICHARO, 1997)**

No processo de digestão anaeróbia existem diversos tipos de microrganismos envolvidos. Sendo que o estabelecimento de um equilíbrio ecológico entre as espécies de microrganismos anaeróbios é de importância fundamental para a eficiência do sistema de tratamento (CHERNICHARO, 1997).

### 3.2.1.1 Hidrólise

A hidrólise consiste na primeira fase da digestão anaeróbia onde componentes não dissolvidos, como celulose, proteínas e gorduras são hidrolisados em materiais mais solúveis e simples (moléculas menores) por exo-enzimas (hidrolase) de bactérias anaeróbias facultativas ou obrigatórias. As proteínas são degradadas formando aminoácidos. Carboidratos se transformam

em açúcares (mono e dissacarídeos). E os lipídios são convertidos em ácidos graxos de longa cadeia de carbono. (LETTINGA et al. 1997).

A hidrólise dos carboidratos acontece em algumas horas, a hidrólise de proteínas e lipídeos em alguns dias e lignocelulose e lignina são degradadas de modo incompleto e seu processo é lento. Como todo ruminante, os ovinos têm a alimentação baseada em matéria vegetal, que possui grandes quantidades de lignocelulose e lignina (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Em muitos casos a velocidade da etapa de hidrólise é o limitante do processo de digestão anaeróbia, ou seja, esta é a etapa limitante da velocidade de conversão da matéria orgânica em biogás. (CAMPOS, 1999).

### **3.2.1.2 Acidogênese**

Os produtos formados na fase hidrolítica são utilizados por diferentes bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias na fase acidogênica e degradados a substâncias mais simples como: ácidos graxos voláteis de cadeia curta, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfetos de hidrogênio, além de nova biomassa composta de células bacterianas. (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

A fermentação acidogênica é realizada por um grupo diversificado de bactérias, das quais a maioria é anaeróbia obrigatória (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Entretanto, algumas espécies são facultativas e podem metabolizar material orgânico por via oxidativa. Isso é importante nos sistemas de tratamento porque o oxigênio dissolvido, eventualmente presente, poderia se tornar tóxico para as bactérias metanogênicas se não fosse removido pelas bactérias acidogênicas facultativas. (CAMPOS, 1999).

### **3.2.1.3 Acetogênese**

A acetogênese é a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para produção de metano: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Ou seja, as bactérias

acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário. Na formação dos ácidos acético e propiônico, uma grande quantidade de  $H_2$  é formada, levando a uma queda do pH (CAMPOS, 1999). De todos os produtos metabolizados pelas acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

Microrganismos metanogênicos e acetogênicos devem viver em simbiose. Organismos metanogênicos sobrevivem somente com maiores pressões parciais de hidrogênio. Eles constantemente removem produtos do metabolismo das bactérias acetogênicas do substrato, o que mantém a pressão parcial de hidrogênio a um nível baixo adequado para as bactérias acetogênicas. Quando há alta pressão parcial de hidrogênio, predomina a formação dos ácidos butírico, capróico, propiônico, e valérico e etanol. Cerca de 30% da produção de  $CH_4$  em lodo anaeróbico pode ser atribuída à redução de  $CO_2$  pelo  $H_2$  (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

#### **3.2.1.4 Metanogênese**

A quarta e última etapa compreende a formação do metano sob condições estritamente anaeróbicas (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Segundo Campos (1999) e Chernicharo (1997), as bactérias metanogênicas são divididas em dois grupos em função de suas afinidades com o substrato: um produz o metano a partir de ácido acético ou metanol, e o segundo a partir de hidrogênio e dióxido de carbono.

As bactérias metanogênicas acetoclásticas, segundo Soubes, 1994, são normalmente os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia. Essas são responsáveis por aproximadamente dois terços de toda a produção de metano. Os principais gêneros são *Methanosaeta* (*Methanotrix*) e *Methanosarcina*, esta última é observada como predominante em tanque de estocagem diária de dejetos suínos (BARRET et al., 2013).

A reação é basicamente representada pela equação (Eq. 1) (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008):



As bactérias metanogênicas hidrogenotróficas compreendem um grupo no qual, praticamente, todas as bactérias metanogênicas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Os gêneros mais comuns em reatores anaeróbios são *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter*. A sua atividade pode ser representada pela equação (Eq. 2) (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008):



### **3.2.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia**

Diversos fatores influenciam o desempenho da digestão anaeróbia. Dentre os principais destacam – se a temperatura, o pH, a alcalinidade e a presença de nutrientes. (CAMPOS,1999).

#### **3.2.2.1 Temperatura**

A temperatura consiste em um importante fator da digestão anaeróbia. O valor da temperatura ambiente será usualmente um valor abaixo de 35° C (em regiões de clima tropical). O processo de digestão pode ser mesofílico (temperatura ótima de 35 a 37° C) ou termófilico (temperatura ótima de 55° C).

Naturalmente, a taxa de digestão é maior a temperaturas termofílicas, a qual gera lodos mais facilmente desidratáveis e maior taxa de remoção de microorganismos patogênicos (AMORIM, JÚNIOR, RESENDE, 2004; SASAKI et al., 2011; BOND & TEMPLETOM, 2011; NIELSEN, AL SEADI, POPIEL, 2009). Além disso, as bactérias metanogênicas são bastante sensíveis a variações de temperaturas. Dessa forma, é importante que o sistema opere sem variações significativas (CAMPOS, 1999).

### **3.2.2.2 pH**

Quando há um aumento da concentração de ácidos voláteis há uma queda no pH do meio quando a alcalinidade do sistema não é suficientemente elevada. A diminuição do pH a valores abaixo de 6,8 beneficia o desenvolvimento das bactérias acidogênicas (pH ótimo entre 5,5 a 6,0), prejudicando o desenvolvimento das bactérias metanogênicas (pH ótimo entre 6,7 a 7,2) (CAMPOS, 1999).

### **3.2.2.3 Nutrientes**

Os microrganismos anaeróbios possuem uma menor taxa de crescimento comparado aos aeróbios, o que resulta em uma menor demanda nutricional e crescimento de biomassa. De maneira geral, admite-se a relação DQO:N:P de 700:5:1 como suficiente para atender às necessidades de macronutrientes dos microrganismos anaeróbios (SPEECE, 1996, apud CAMPOS, 1999). Além de N e P, o enxofre (S) é também considerado um dos nutrientes importantes para a metanogênese. Em geral, a concentração de S deve ser da mesma ordem de grandeza ou levemente superior a de P. Entre os micronutrientes destacam-se o ferro, o cobalto, o níquel e o zinco.

## **3.3 Reatores anaeróbios**

### **3.3.1 Biodigestores**

Biodigestores são reatores que se constituem em uma câmara fechada onde um resíduo permanece em solução aquosa reagindo e gerando o biogás que vai ocupar a parte superior desta câmara. A reação de decomposição que ocorre dentro do biodigestor é chamada de digestão anaeróbia. Em geral, digestores anaeróbicos são relativamente simples de instalar e operar (ABBASI, ABBASI, TAUSEEF, 2013).

Os gasômetros geralmente têm seu volume calculado para a produção diária de biogás; entretanto, o real volume é definido pelo regime de utilização do biogás. Caso o biogás seja utilizado para aquecer o biorreator, o gasômetro pode ser dispensável. Os tipos e materiais dos gasômetros são definidos pela pressão de operação como pode ser observado no Quadro 1.

**Quadro 1 - Materiais e formas de gasômetros para diferentes pressões de operação.**

<b>Pressão</b>	<b>Tamanho usual [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Material e forma</b>
<b>Baixa pressão</b> 0,05-5mbar	10-2000	Bioreator coberto lona plástica ou bolsas de gás
10-50 mbar	5-2	Gasômetro de cúpula
<b>Média pressão</b> 5-20 bar	1-100	Tanque pressurizado em aço
<b>Alta pressão</b> 200-300 bar	0,1-0,5	Frascos de aço

**Fonte: (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).**

As lonas plásticas devem ser resistentes a luz UV, tempo, fungos, micróbios e biogás. Por exemplo, a lona de poliéster revestidos de PVC nos dois lados. Para garantir a vida útil do equipamento, pode-se fazer para as membranas uma cobertura para proteger o material, e para os tanques em aço fazer uma construção para abrigo (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

### **3.3.2 Tipos de biodigestores rurais no Brasil**

A escolha de um biodigestor rural depende basicamente das características do substrato, disponibilidade de mão-de-obra, necessidade de depuração e ordem econômica. Os biodigestores podem ser concebidos em regime de batelada ou em regime contínuo.

Os biodigestores em batelada são mais simples e de pequena exigência operacional. Podem ser instalados com um ou mais tanques anaeróbios. Quanto aos digestores contínuos, no Brasil, os modelos clássicos são o indiano e o chinês, aplicáveis em pequenas e médias comunidades rurais. Estes são indicados para diversos resíduos orgânicos, tanto animais quanto vegetais, no entanto demandam carregamento periódico. (BENINCASA et al., 1990 apud ALVES, 2006).

A partir dos anos 70 a Índia e China desenvolveram seus modelos de biodigestores para disseminação em áreas rurais, apresentando sistemas bastante comentados (BOND & TEMPLETOM, 2011).

### **3.3.2.1 Biodigestor indiano**

O biodigestor de modelo indiano é caracterizado por ter uma cúpula móvel de ferro ou fibra de vidro que consiste no gasômetro. Esta cúpula é mergulhada na biomassa a fim de criar um selo d'água. Dessa maneira à medida que o gás se forma, o mesmo é armazenado nesta cúpula. Este modelo conta com uma parede central que divide o reator em duas câmaras, e faz com que o material circule por todo o interior evitando curtos circuitos. Devido à formação contínua de gás, esse tipo de biodigestor mantém uma pressão constante que permite que o gás seja usado sem interrupção (ALVES, 2006).

O resíduo utilizado para alimentar o biodigestor indiano deverá apresentar uma concentração de ST menor ou igual a 8% para facilitar a circulação e evitar entupimentos. Este deve ser alimentado continuamente, ou seja, geralmente é alimentado com dejetos bovinos ou suínos que apresentam boa regularidade no fornecimento de dejetos (DEGANUTTI et al., 2002).

Apesar de ser construtivamente simples, o gasômetro metálico pode apresentar um custo importante, o que pode inviabilizar a implantação deste modelo. Na Figura 1 e Figura 2, pode-se visualizar a configuração básica do modelo indiano.

**Figura 2 - Representação do modelo indiano de biodigestor.**

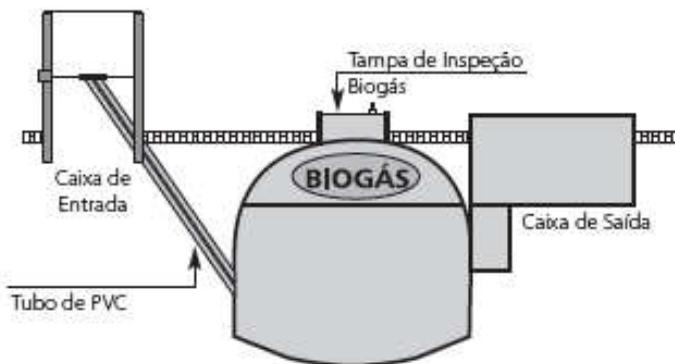


**Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)**

### **3.3.2.2 Biodigestor modelo chinês**

Este biodigestor é formado por uma câmara cilíndrica de alvenaria para fermentação, e um teto abobadado destinado ao armazenamento do gás. Este modelo pode ser construído totalmente em alvenaria, dispensando o uso do gasômetro metálico o que reduz custos. Porém, aumenta a probabilidade de existência de vazamentos de gás. Este tipo de reator geralmente não é usado em instalações de grande porte. Semelhante ao modelo indiano, este modelo necessita de alimentação contínua e uma concentração de sólidos abaixo de 8% a fim de evitar entupimentos (DEGANUTTI et al., 2002).

**Figura 3- Representação do modelo chinês de biodigestor.**



**Fonte:** (ALVES, 2006)

### **3.3.2.3 Biodigestor em batelada**

Este modelo é abastecido uma vez e o material é retirado quando acaba a fermentação e produção do biogás. Enquanto modelos como o chinês e o indiano atendem biomassas de bovinos de leite, por exemplo, que apresentam uma oferta regular de biomassa, o modelo em batelada é mais indicado quando a oferta de biomassa ocorre pontualmente em períodos longos. Como por exemplo, em granjas avícolas de corte, onde a biomassa fica disponível após a venda de um lote. A Figura 4 mostra um exemplo de digestor em batelada (DEGANUTTI et al., 2002).

**Figura 4 - Representação do modelo em batelada de biodigestor.**



Fonte (DEGANUTTI et al., 2002)

#### **3.3.2.4 Lagoa anaeróbio coberta**

O digestor do tipo lagoa coberta tem uma construção simplificada, onde a câmara de biodigestão anaeróbia é escavada no solo (Figura 5 e Figura 6) e o gasômetro é do tipo inflável com material plástico ou similar. Este modelo é mais recente, apresenta tecnologia mais avançada e ainda assim, mais simples. Segundo Deublein e Steinhauser, (2008), a lagoa coberta é constituído de uma caixa de carga, geralmente em alvenaria, com largura maior que a profundidade, o que possibilita uma maior exposição ao sol e conseqüentemente uma maior produção de biogás, evitando entupimentos. A medida que o biogás é produzido, a cúpula (gasômetro) do biodigestor infla devido as propriedades elásticas do plástico (PVC) da manta de cobertura.

Este biodigestor é muito difundido em propriedades rurais, sendo a tecnologia mais adotada neste meio. O biogás pode

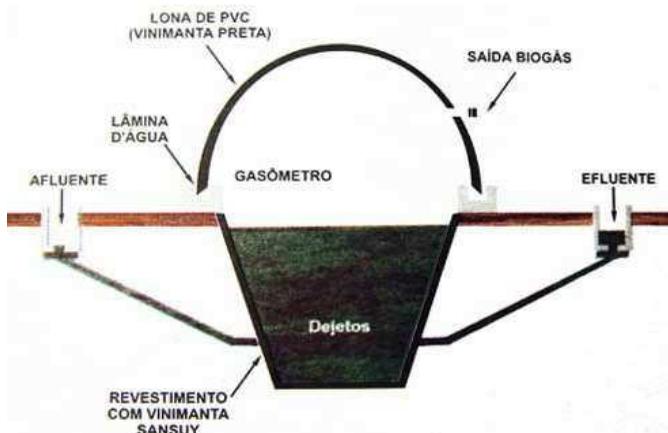
ainda ser enviado a um gasômetro separado, permitindo maior controle da logística de armazenagem do biogás. Embora apresente vantagens atrativas, sua principal desvantagem é a durabilidade, visto que caso a lona seja perfurada, o biogás será perdido.

**Figura 5 - Lagoa anaeróbia coberta.**



Fonte: (QUADROS et al., 2007).

**Figura 6 - Diagrama de funcionamento de uma lagoa anaeróbia coberta.**



Fonte: (OLIVER et al., 2008)

### 3.4 PPB (Potencial de produção de biometano)

O teste PPB (BMP em inglês) é conduzido em batelada e em escala de bancada, medindo o volume máximo de biogás produzido por grama de sólidos totais voláteis (SV) contidos no substrato. Este teste é usado para avaliar tanto o potencial de produção de metano possível de um substrato orgânico quanto sua biodegradabilidade, dados que auxiliam a concepção de biodigestores. No teste de BMP a solução de substrato orgânico é misturada à solução de inóculo anaeróbio, e dessa maneira o gás produzido pela digestão desta mistura é medido em função do tempo (ESPOSITO et al., 2012).

Para o cálculo do PPB utiliza-se a Eq. 3 (RODRIGUEZ, 2011):

$$PPB = \frac{V_{S\&I} - V_I}{\text{gramas de SV do substrato adicionado}} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

- $V_{S\&I}$  é o volume acumulado de metano produzido em um reator com substrato e inóculo.

- $V_I$  é o volume de metano produzido em um reator apenas com inóculo (branco).

-PPB é o potencial de produção medido em NmL/g SV.

Utilizando a primeira parte da curva de produção do metano é possível calcular, a constante  $k_h$  (dias<sup>-1</sup>) para um modelo de primeira ordem, como pode ser observado na (Eq. 4).

$$\frac{dS}{dt} = -k_h \quad \text{Eq.4}$$

Onde:

S é o substrato biodegradável;

t é o tempo (d);

$k_h$  é a constante de primeira ordem (dias<sup>-1</sup>).

Uma vez que a equação diferencial ordinária (EDO) é rearranjada e integrada (Eq.5), tem-se a seguinte relação (Eq.6):

$$\int \frac{dS}{S} = \int -k_h \cdot dt \quad \text{Eq.5}$$

$$\ln\left(\frac{B_\infty - B}{B_\infty}\right) = -k_h \cdot t \quad \text{Eq.6}$$

Onde:

$B_\infty$  é valor máximo de produção de metano em unidade de volume;  
 $B$  é a produção de metano dada em um determinado tempo.

Desta maneira, o valor da constante de primeira ordem pode ser determinado com a inclinação da curva linear obtida.

### 3.4.1 Correções dos volumes de metano medidos

Os volumes relativos à velocidade máxima de produção de metano ( $dV/dt$ ) devem ser calculados baseados no volume seco de metano nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), ou seja, a 1 Atm e a 0°C. Para tal, pode-se corrigir o volume, inicialmente, no que diz respeito à temperatura e à pressão pela Eq. 7 (SANTANA, 2002):

$$V_{CH_4, CNTP} = \frac{P_{CH_4} \cdot V_{CH_4} \cdot T_{CNTP}}{T_{CH_4} \cdot P_{CNTP}} \quad \text{Eq.7}$$

Onde:

$P_{CH_4}$ =Pressão de metano no frasco [Pa];

$V_{CH_4}$ =Volume medido experimentalmente [mL];

$T_{CH_4}$ =Temperatura ambiente [°K];

$T_{CNTP}$ =273,15 °K

$P_{CNTP}$ =101325 Pa

Após correções de T e P é ainda necessário corrigir o volume de metano, considerando a pressão de vapor d'água existente no volume de biogás produzido no reator, a qual varia de acordo com a temperatura. E este é chamado volume seco e pode ser calculado pela equação Eq. 8:

$$V_{seco} = V_{gás\ CNTP} \cdot F_c \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$V_{seco}$ =Volume de gás seco [mL];

$V_{gás\ CNTP}$ =Volume de gás corrigido para as CNTP [mL];

$F_c$ =Fator de umidade

O fator de umidade pode ser calculado a partir da Eq.9:

$$F_c = 2.10^{-8} \cdot T_A^3 - 5.10^{-5} \cdot T_A^2 - 2,6.10^{-3} \cdot T_A + 0,981 \quad \text{Eq.9}$$

Onde:

$T_A$ =Temperatura ambiente [°C]

### **3.4.2 Características do biogás**

O biogás é uma mistura gasosa produzida pela degradação anaeróbia de matéria orgânica de resíduos sólidos ou líquidos de origem rural, urbana ou industrial. Sua composição é basicamente  $CH_4$  e  $CO_2$ , onde o metano é a molécula combustível que atribui a característica energética da mistura. Sendo assim, uma maior fração de metano no biogás, atribui-lhe um maior poder calorífico. Ainda existem, em menores quantidades, outros gases como o gás sulfídrico, que atribui o mau cheiro e é proveniente da degradação de compostos com átomos de enxofre, como proteínas (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

O biogás é incolor, geralmente inodoro e insolúvel em água. É composto pelas moléculas apresentadas no Quadro 2:

**Quadro 2 - Composição do biogás.**

<b>Molécula</b>	<b>Porcentagem na mistura gasosa</b>
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	50 a 70
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	25 a 40
<b>Hidrogênio (H<sub>2</sub>)</b>	1 a 3
<b>Nitrogênio gasoso (N<sub>2</sub>)</b>	0,5 a 2,5
<b>Oxigênio (O<sub>2</sub>)</b>	0,1 a 1
<b>Gás Sulfídrico (H<sub>2</sub>S)</b>	0,1 a 0,5
<b>Amonía (NH<sub>3</sub>)</b>	0,1 a 0,5
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	0 a 0,1
<b>Água (H<sub>2</sub>O)</b>	Variável

Fonte: (ZACHOW, 2000).

O poder calorífico do biogás varia de acordo com a quantidade de metano na mistura. De maneira geral, considerando uma proporção de 65 % de metano na mistura, tem-se um poder calorífico inferior (P.C.I.) de 5500 kcal/m<sup>3</sup>. O comportamento desse valor com a variação desta proporção pode ser observado no Quadro 3.

**Quadro 3 - Poder calorífico inferior.**

<b>Composição Química Biogás</b>	<b>Peso Específico (kg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>P.C.I. (kcal/kg)</b>	<b>P.C.I. (kcal/Nm<sup>3</sup>)</b>
10% CH <sub>4</sub> , 90% CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43	856
40% CH <sub>4</sub> , 60% CO <sub>2</sub>	1,4643	2.338,52	3.424
60% CH <sub>4</sub> , 40% CO <sub>2</sub>	1,2143	4.229,98	5.136
65% CH <sub>4</sub> , 35% CO <sub>2</sub>	1,1518	4.831,14	5.565
75% CH <sub>4</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	1,0268	6.253,01	6.420
95% CH <sub>4</sub> , 05% CO <sub>2</sub>	0,7768	10.469,60	8.133
99% CH <sub>4</sub> , 01% CO <sub>2</sub>	0,7268	11.661,02	8.475

Fonte: Adaptado de (ZACHOW, 2000).

**Quadro 4 - Comparativo de P.C.I. entre biogás e outros gases.**

<b>Gás</b>	<b>P.C.I. (kcal/Nm<sup>3</sup>)</b>
Metano	8.500
Propano	22.000
Butano	28.000
Gás natural	8.554
Biogás (65% CH <sub>4</sub> )	5.500

**Fonte (ZACHOW, 2000).**

Por ser um gás de baixa densidade (mais leve que o ar), contrariamente ao butano e ao propano, ele apresenta menores riscos de explosão. Porém, a sua acumulação se torna mais difícil. A baixa densidade implica, também, que ele ocupe um volume maior e que sua liquefação seja mais difícil, o que lhe confere algumas desvantagens em termos de transporte e utilização (IANNICELLI, 2008).

### **3.4.3 Queima do biogás**

O metano é um gás combustível, incolor, queimando com chama azul lilás sem deixar fuligem (DEGANUTTI et al., 2002).

Quando a combustão é completa (Eq.10) não há produção de gases tóxicos e o CO<sub>2</sub> ajuda a manter a temperatura da Terra. Porém em quantidades desequilibradas, contribui para o “efeito estufa”. O problema principal é em situações onde a queima é incompleta (Eq.11). Ocorre em situações de escassez de oxigênio, onde há a formação do monóxido de carbono, o qual é perigosamente letal (LACERDA, LEROUX, MORATA, 2005).



## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da pesquisa**

O estudo foi realizado do dia 15/06/2013 ao dia 13/07/13 no LABEFLU, a duração foi de 28 dias. Este experimento foi preparado em três réplicas de reatores, cada réplica com uma determinada relação A/M a ser estudada, e uma duplicata de amostras representando as testemunhas (amostras brancas). O experimento consistiu em preparar as diferentes soluções contendo substrato, inóculo e meio de cultura em diferentes proporções, colocá-los em banho termostatizado a 55 °C para garantir condições termofílicas, e consequente monitoramento da reação de digestão anaeróbia através da medição da atividade metanogênica de cada reator.

### **4.2 Experimento laboratorial**

Este experimento foi baseado no protocolo proposto por Angelidaki et al., (2009), para ensaios em batelada para definição do potencial de produção de biometano de resíduos sólidos orgânicos e culturas energéticas.

O objetivo do trabalho de Angelidaki et al. (2009) é gerar diretrizes experimentais para uma confiável e reproduzível avaliação da biodegradabilidade anaeróbica de qualquer composto ou material indefinido para metano e dióxido de carbono.

Para esta avaliação o protocolo proposto sugere montar os reatores com substrato, inóculo e meio de cultura. O substrato deve ser caracterizado previamente em termos de ST, SV,  $DQO_{total}$ ,  $P_{total}$ .

### **4.3 Procedimento do estudo**

#### **4.3.1 Coleta das amostras**

Foram coletados dois litros de amostra de esterco ovino de um aprisco que representaram o substrato do qual se deseja analisar

e medir a biodegradabilidade e produção metanogênica. Foram coletados também dois litros de lodo de digestor anaeróbico de lodo secundário para servir de inóculo.

#### 4.3.2 Análise

Após a coleta das amostras, foram medidos a DQO e os SV do inóculo e do substrato com a finalidade de caracterizá-los para elaborar as soluções com as relações alimento microrganismo que foram estudadas. A relação A/M (alimento/microrganismo) será obtida dividindo o valor de DQO (g/L) da solução de substrato pela concentração de SV do inóculo (g/L). Os dados foram analisados e o experimento foi conduzido de forma a gerar uma relação A/M de 1:1, A/M de 0,7:1 e 0,4:1.

Devido ao fato de o substrato (dejeito ovino) apresentar característica sólida, foram medidos os parâmetros para a caracterização relativa à massa de substrato Tabela 1.

**Tabela 1 - Parâmetros de caracterização do substrato (dejeito ovino).**

<b>Variáveis</b>	<b>m/m</b>	
<b>ST</b>	227,10	mg/g Esterco
<b>SF</b>	65,52	mg/g Esterco
<b>SV</b>	161,62	mg/g Esterco
<b>DQO</b>	110,84	mg/g Esterco
<b>P<sub>total</sub></b>	1,92	mg/g Esterco

Com o conhecimento das concentrações e parâmetros, foram calculados, para um volume constante de solução de inóculo, diferentes volumes de solução de substrato, sendo o restante completado sempre com meio de cultura, o volume final de cada reator foi 300 mL (ver Figura 9). Para a amostra testemunha (branco) foi adicionado somente o inóculo e meio de cultura, a fim de medir a contribuição do conjunto da solução de inóculo mais meio de cultura, nas respostas dos reatores montados com inóculo, meio de cultura e substrato.

### **4.3.3 Soluções**

A solução do substrato foi obtida diluindo uma determinada massa do esterco em um volume conhecido de água destilada, devido ao fato das características consistências do resíduo.

O inóculo utilizado nesta pesquisa foi obtido de um digestor de lodo secundário e apresentava consistência líquida.

### **4.3.4 Montagem do experimento de bancada**

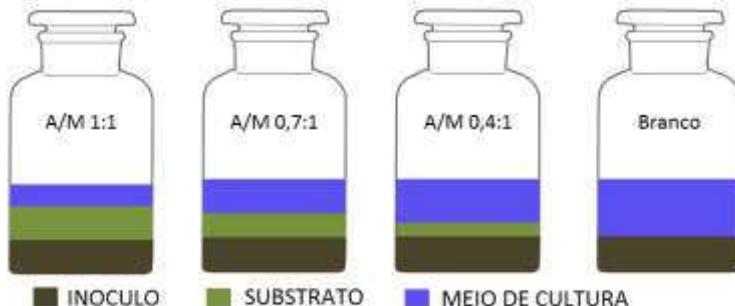
Em lodo granular, a maior parte dos SV consiste em biomassa bacteriana, enquanto no esterco, os SV são principalmente resíduos de lignocelulose recalcitrante e não biomassa microbológica ativa (ANGELIDAKI et al., 2009).

Logo, adota-se como alimento a massa de DQO do substrato; e como carga microbológica, a massa de SV do inóculo. Com base nas características medidas para substrato e inóculo pode se montar os reatores com as relações A/M que se deseja estudar. A Tabela 2 mostra os volumes de substrato, inóculo e meio de cultura adicionados em cada reator de volume útil de 300 mL a fim de preparar soluções com as relações A/M de 1:1, 0,7:1 e 0,4:1. A Figura 9 representa graficamente os reatores montados.

**Tabela 2 – Representação dos valores absolutos de DQO e SV adicionados em cada reator.**

<b>Relação A/M</b>	<b>Solução</b>	<b>Substrato</b>	<b>Inóculo</b>	<b>Meio de cultura</b>
<b>1:1</b>	Volume adicionado [mL]	112	112	76
	Massa adicionada	299,87 mgDQO	299,88 mgSV	-
<b>0,7:1</b>	Volume adicionado [mL]	78	112	110
	Massa de DQO/ SV adicionada	208,84 mgDQO	299,88 mgSV	-
<b>0,4:1</b>	Volume adicionado [mL]	45	112	143
	Massa de DQO/ SV adicionada	120,48 mgDQO	299,88 mgSV	-
<b>Branco</b>	Volume adicionado [mL]	0	112	188
	Massa de DQO/ SV adicionada	0	299,88 mgSV	-

**Figura 7 - Representação esquemática da composição dos reatores.**



Foi realizada uma caracterização dos reatores antes do início do experimento. A Tabela 3 apresenta os dados de partida do experimento. Para o cálculo de DQO e SV foi usado as equações Eq. 17 e Eq.18.

$$DQO_{\text{reator } x} = \frac{DQO_{\text{Substrato}} \cdot V_{\text{substrato}} + DQO_{\text{inóculo}} \cdot V_{\text{inóculo}}}{V_{\text{substrato}} + V_{\text{inóculo}} + V_{\text{Meio de cultura}}} \quad \text{Eq.17}$$

$$SV_{\text{reator } x} = \frac{SV_{\text{Substrato}} \cdot V_{\text{substrato}} + SV_{\text{inóculo}} \cdot V_{\text{inóculo}}}{V_{\text{substrato}} + V_{\text{inóculo}} + V_{\text{Meio de cultura}}} \quad \text{Eq.18}$$

Sendo assim, tem-se a seguinte tabela de parâmetros para os reatores na partida:

**Tabela 3 - Parâmetros relativos aos reatores na partida do experimento t=0 s.**

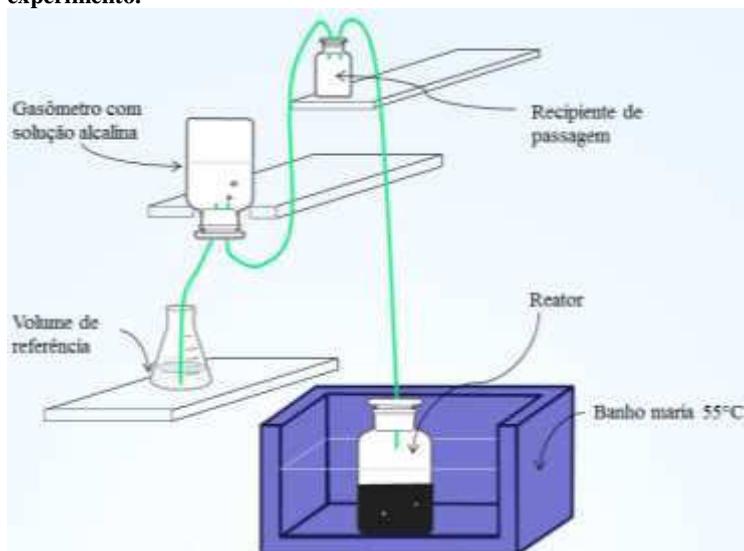
Parâmetro (mg/L)	A/M 1:1	A/M 0,7:1	A/M 0,4:1	Branco
DQO total	2444,02	2140,58	1846,06	1444,45
SV	2456,80	2014,39	1585,05	999,60
SF	1498,99	1319,62	1145,53	908,13
ST	3955,72	3334,01	2730,58	1907,73

Em posse das soluções e das relações de volumes calculadas foram montados os 11 reatores. Os reatores foram

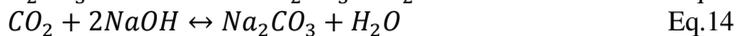
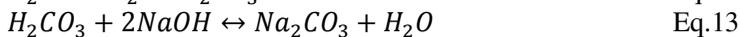
nomeados como: B1 e B2 para os reatores testemunhas (brancos); O1, O2, O3 para os reatores com relação A/M 1:1; O4, O5, O6 para os reatores com relação A/M 0,7:1 e O7, O8, O9 para os reatores com relação A/M 0,4:1.

Após a adição das soluções, foi conferido em cada reator o pH e realizada a regulação do mesmo, para ajuste entre 6 e 7,5 quando necessário. Foi realizada, por 10 minutos, a purga, que consiste na adição de  $N_{2(g)}$  com finalidade de retirar o oxigênio da solução. Após os reatores prontos foram levados em banho termostaticado a 55 °C (ver Figura 8Figura 7) na parte inferior da bancada. Foram tampados com rolhas de silicone ligadas no topo a um recipiente de passagem, que por sua vez estava ligado a um gasômetro invertido. O gasômetro continha uma solução alcalina onde toda a unidade de volume de metano gerada, deslocava uma mesma unidade de volume do gasômetro para o Erlenmeyer. Este último possuía o volume de referência, o qual foi medido periodicamente com uma proveta, mantendo sempre um volume de referência de 100 mL.

Figura 8 - Representação esquemática das estruturas da bancada de experimento.



A solução alcalina reage com o  $\text{CO}_2$  produzido nas reações, permitindo que o volume deslocado corresponda somente à produção de metano. A absorção do gás carbônico é regida pelas seguintes equações (AQUINO et al. 2007):



**Figura 9 - Vistas laterais da bancada montada e operando.**



#### **4.3.5 Metodologia de medições do volume de metano produzido**

Com a estrutura de bancada e os reatores montados e operantes, realizou-se, nas primeiras 6 horas, medições a cada duas horas; na primeira semana, três vezes ao dia e no restante do período do experimento, duas vezes ao dia.

Nas medições periódicas foram monitorados: a temperatura ambiente, a temperatura de cada banho termostaticado e a produção volumétrica de gás metano. O procedimento de medição consistiu em isolar cada frasco gasômetro com grampos, transferir o volume de solução de hidróxido de sódio (solução alcalina) para uma proveta, medindo o volume excedente ao volume de referência, que equivale ao volume de gás metano produzido. Nesta rotina estavam incluídas eventuais recargas de gasômetros e de água no banho termostaticado. Tomou-se o cuidado de conferir se todas as tubulações encontravam-se submersas no Erlenmeyer. Os dados e observações foram anotados em uma tabela (Apêndice 1).

### 4.3.6 Caracterização dos reatores no final de experimento

Com a finalidade de se comparar os valores de entrada e saída dos reatores, ao final do estudo foram realizadas as análises de cada reator em termos de  $DQO_{total}$  e SV. Com isto obtiveram-se dados para o cálculo da eficiência do tratamento e da produção de metano por massa de dejetos.

### 4.3.7 Procedimentos laboratoriais

**Quadro 5 – Princípio e método dos procedimentos laboratoriais para determinação dos parâmetros estudados.**

<b>Análise Físico-Química</b>	<b>Método</b>	<b>Princípio</b>
Sólidos Totais (ST)	SM 2540B	Gravimetria
Sólidos Totais Voláteis (SV)	SM 2540E	Gravimetria
Sólidos Totais Fixos (SF)	SM 2540E	Gravimetria
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	SM 5220C	Colorimetria
Fósforo Total ( $P_{total}$ )	SM 4500C	Colorimetria

### 4.4 Cálculo da redução de sólidos voláteis

Para o cálculo da redução em sólidos voláteis, é utilizada a Eq.19 (RODRIGUEZ, 2011).

$$RSV(\%) = \frac{SV_{início} - SV_{final}}{SV_{início}} \times 100 \quad \text{Eq. 19}$$

RSV = Redução em sólidos totais voláteis;

SV = Sólidos Voláteis.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização do substrato e inóculo

A partir do esterco sólido, foi preparada uma solução de 24,15 g de matéria original de esterco/L para realização dos ensaios dos quais os resultados constam na

A Tabela 4 apresenta a caracterização do inóculo (lodo anaeróbio de digestor de lodo secundário) utilizado no estudo.

**Tabela 4 - Parâmetros de caracterização do inóculo (lodo anaeróbio de digestor secundário).**

Variável	Inóculo (mg/L)	Solução substrato* (mg/L)
ST	5110,00	5485,70
SF	2432,50	1582,70
SV	2677,50	3903,90
DQO	3869,05	2677,37

\* Solução com 24,15 g de substrato / L

### 5.2 Caracterização dos reatores no fim do experimento

Ao final de 28 dias de experimento foram retiradas amostras de cada reator para a caracterização do meio reacional. A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados para cada relação A/M testada, assim como para o reator testemunha (branco).

**Tabela 5 - Caracterização do meio reacional ao final do experimento.**

	A/M=1:1	A/M=0,7:1	A/M=0,4:1	Branco
<b>DQO (mg/L)</b>	2172,10	1957,70	1695,40	1056,55
<b>ST (mg/L)</b>	3152,50	2981,67	3752,50	2672,50
<b>SF (mg/L)</b>	1262,50	1730,00	2474,17	1718,75
<b>SV (mg/L)</b>	1890,00	1251,67	1278,33	953,75
<b>P total (mg/L)</b>	144,40	123,60	119,87	108,40

Verificou-se que a concentração de matéria orgânica com base na DQO foi maior quanto maior a quantidade de substrato no reator. Por outro lado em relação à concentração de SV não se observou esta tendência, ainda que a quantidade de sólidos voláteis no final do experimento foi sempre inferior em relação ao t=0 (Tabela 3).

Relativamente à disponibilidade de nutrientes no efluente do digestor, a relação DQO:P foi aproximadamente 15:1, inferior àquela sugerida em literatura que varia entre 500:1 a 250:1 (METCALF e EDDY, 2003). Desta forma, a quantidade de P existente no dejetos pós processo anaeróbio apresenta elevada concentração e grande interesse de reaproveitamento agrícola quanto fonte orgânica de nutriente. Ressalta-se, porém, que uma solução enriquecida de nutrientes foi utilizada na montagem dos reatores (vide item 4.3.3); desta forma, uma avaliação mais específica para desconsiderar o aporte externo de P é essencial para resultados mais específicos.

### 5.3 Biodegradabilidade do substrato

O experimento ocorreu do dia 15/06/2013 até o dia 15/07/2013. No entanto, no dia 13/07/2013 as 18:30 horas foi observado que o equipamento de banho termostatizado onde se encontrava a duplicata de reatores em branco e a triplicata de reatores com relação A/M 0,7:1, não estava em funcionamento e a temperatura da água estava a temperatura ambiente. Logo, não

mais em condições termofílicas. Sendo assim, foram adotados para os cálculos os dados até o dia em questão, totalizando 675 horas e 30 min de reação.

Nota-se a existência da atividade microbiológica ao calcular a redução em sólidos voláteis (RSV) a partir da Eq.19 (RODRIGUEZ, 2011). Parâmetro que auxilia na estimação da biodegradabilidade do substrato.

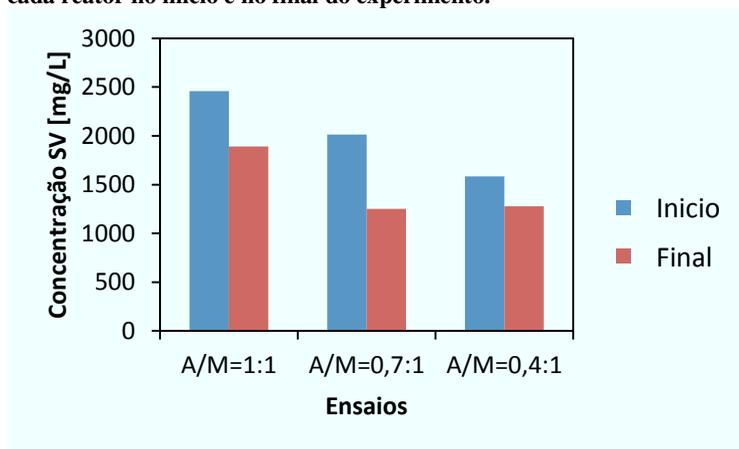
A RSV deve ser interpretada com atenção, visto que quando a matéria orgânica é degradada a SV diminui. Porém, há também a produção de nova massa de microrganismos que aumenta SV. No entanto, a SV predominantemente diminui devido ao fato de os microrganismos metanogênicos apresentarem um crescimento lento.

As eficiências na remoção de SV foram de 23,2% 37,8% 19,5% para as relações 1:1, 0,7:1 e 0,4:1, respectivamente, próximo aos valores publicados por Rodrigues, 2011.

Foi verificado um pico de rentabilidade em remoção de SV para a relação A/M a 0,7:1, apontando esta relação como sendo próxima de um ideal para potencialização da degradação de SV. A amostra testemunha, que continha apenas o inóculo, apresentou uma pequena remoção de SV o que significa que a fração exógena foi degradada e possivelmente também a endógena.

A Figura 10 exhibe o perfil de desempenho dos reatores testados.

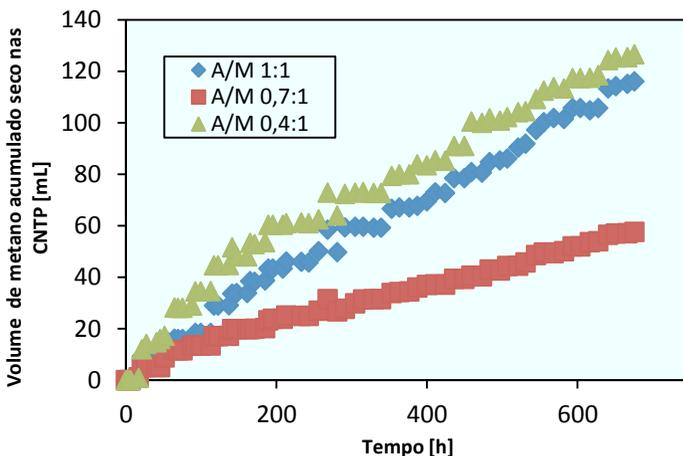
**Figura 10 - Dinâmica da concentração média de sólidos totais voláteis em cada reator no início e no final do experimento.**



Foi observado que os reatores apresentaram baixas taxas de remoção de DQO, isto ocorre devido ao fato de o substrato ser de um resíduo de difícil biodegradabilidade, com células vegetais das quais a presença de parede celular torna difícil a degradação (ANGELIDAKI et al., 2009).

Os dados brutos de volumes acumulados de metano foram corrigidos para condições secas e nas CNTP, estes dados acumulados podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 – Produção acumulada de biogás para cada relação A/M.



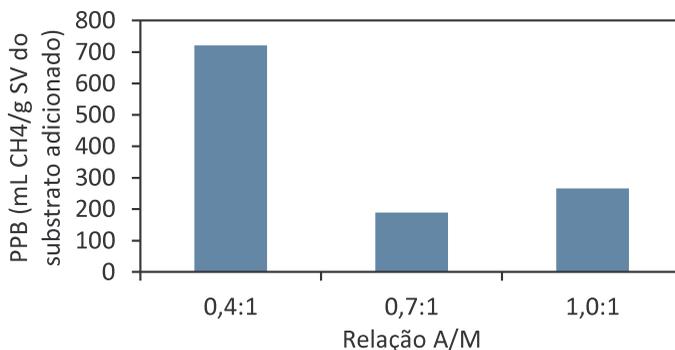
O reator 1:1 teve uma produção de biogás acumulado semelhante ao de 0,4:1, porém o seu rendimento ( $\text{mLCH}_4/\text{gDQO}$  adicionada) foi quase três vezes menor que o de 0,4:1. Isto é, no reator 0,4:1 o substrato seguiu à metanogênese mais facilmente que no reator 1:1. O reator 0,7:1 apresentou maior atividade fermentativa e menor atividade metanogênica, ou seja, nem todos os substratos da hidrólise, acidogênese e acetogênese foram convertidos em metano. Desta forma, para valores semelhantes de degradação de carga orgânica (DQO), houve menor produção do gás. O SV que o reator 0,7:1 degradou (37,8%) provavelmente só fez liberar ácidos orgânicos que não seguiram a metanogênese.

Dessa maneira, para um TDH de 28 dias a carga orgânica deve ser baixa a fim de proporcionar tempo para os microrganismos fazerem hidrólise desse material de difícil biodegradabilidade e depois haver fermentação de ácidos e finalmente a metanogênese.

#### 5.4 Bio-methane Potential (BMP)

O resultado do cálculo da Eq. 3 pode ser observado na Figura 12, que mostra o PPB para cada relação A/M estudada.

**Figura 12 - BMP mensurados para cada relação A/M estudada.**



Percebe-se que para a menor relação de A/M (0,4:1) ocorreu a produção de um grande volume de metano, em relação a quantidade de substrato adicionada. Ou seja, a eficiência de produção de metano é favorizada a baixas cargas orgânicas. Isso se deve ao fato de que a baixas cargas, tem-se uma maior disponibilidade bacteriana (menor relação A/M) para o processo de hidrólise, importante antecessor do processo para formação do biogás, visto que a hidrólise consiste na etapa que limita a velocidade da reação de digestão (CAMPOS, 1999)

O experimento apontou uma média de 391,8 NmL de metano/g SV adicionado, ou seja, 0,39 m<sup>3</sup>/ kg SV. Como 1 kg de esterco contém 0,16 kg de SV, logo, a produção média foi de 0,0624 Nm<sup>3</sup>/kg de esterco na matéria original, semelhante ao valor 0,061 m<sup>3</sup>/kg de esterco ovino, medido por Quadros et al., 2010.

Com a Eq. 6 e um ponto de volume produzido em um determinado tempo é possível estimar o valor de  $k_h$  relativo a velocidade de produção do gás.

A Tabela 6 mostra os valores de  $k_h$  calculados para cada conjunto de reatores, onde os ensaios realizados apresentaram um  $k_h$  médio de 0,0603  $d^{-1}$ .

**Tabela 6 - Definição dos valores de  $k_h$  de cada conjunto de reatores.**

	$B_{\infty}$ [mL]	$B(t=400h)$ [mL]	$k_h$ [ $d^{-1}$ ]
<b>A/M 1:1</b>	116,06	69,47	0,0548
<b>A/M 0,7:1</b>	57,6	36,93	0,0615
<b>A/M 0,4:1</b>	126,62	83,48	0,0646

Desta forma, pode-se prever, através da (Eq. 6), a produção de metano acumulada em função do tempo.

## 5.5 Análise de disponibilidade energética

Segundo Deganuti et al., 2002, para uma família de 5 pessoas, as necessidades em termos de uso de biogás são as informadas na Tabela 7:

**Tabela 7 - Consumo em biogás para cada finalidade de uso por dia.**

Uso	Volume de biogás	Energia kcal
<b>Cozinha</b>	2,10 $m^3$	11.550
<b>Iluminação</b>	0,63 $m^3$	3.465
<b>Geladeira</b>	2,20 $m^3$	12.100
<b>Banho quente</b>	4,00 $m^3$	22.000
<b>Total</b>	8,93 $m^3$	49.115

O biogás possui em média 5500 kcal de PCI. Quando a fração de metano é muito alta, este valor pode alcançar 8.500 kcal. Como a demanda diária é de 49.115 kcal e no experimento realizado os volumes calculados foram exclusivamente de metano (com base na Quadro 1 adota-se um P.C.I. de 8.500 kcal/  $m^3$  de metano), seriam necessários 5,78  $Nm^3$  de metano diários para atender uma família.

Considerando que um animal ovino em regime semi-extensivo (estabulado) produz cerca de 0,5 kg de esterco

(QUADROS et al., 2010) e que a produção de metano é 0,0624 Nm<sup>3</sup>/kg de esterco, seriam necessários 93 kg de esterco diários para suprir esta demanda.

Uma massa 93 kg de esterco diários corresponde a 186 ovinos, ou seja, um criatório de médio porte.

## 5 CONCLUSÕES

Para os 28 dias de tempo de detenção hidráulico estudados, o reator com relação A/M 0,4:1 apresentou um desempenho mais satisfatório para a produção de bio-metano, pois os 8% de degradação da DQO ou os 19% de SV foram convertidos com maior integralidade em metano. Nos demais reatores tiveram-se maiores degradações do substrato, porém os subprodutos do substrato permaneceram ainda no reator, isto é, não foram convertidos a metano. O reator com relação A/M 1:1 teve uma produção de biogás acumulado semelhante ao de relação A/M 0,4:1, porém o seu rendimento (mLCH<sub>4</sub>/gDQOadicionada) foi muito menor que o de relação A/M 0,4:1. Isto é, no reator 0,4:1 o substrato segue à metanogênese mais facilmente que no reator com relação A/M 1:1, por consequência, é vantajoso que o biodigestor opere a uma carga orgânica volumétrica de esterco ovino baixa a fim de proporcionar tempo para os microrganismos fazerem hidrólise, fermentação de ácidos e finalmente a metanogênese.

## **6 RECOMENDAÇÕES**

Devido a característica observada de o esterco ovino apresentar estrutura fibrosa e matéria vegetal em sua composição, sua velocidade de degradação é mais lenta. Assim sugere-se a adoções de TDH maiores para este tipo de biomassa.

Com o objetivo de aproximar-se das condições reais de operação de biodigestores no estado de Santa Catarina, é interessante realizar o experimento em condições mesofílicas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, T.; ABBASI, S.A.; TAUSEEF, S.M. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 704-741, Mar. 2013.

ALVES, João Wagner Silva. **Biogás : projetos e pesquisas no brasil**. Companhia de tecnologia de saneamento ambiental – CETESB. São Paulo-SP, 184 p. 2006.

AMORIM, A. C.; JÚNIOR, J. de L.; RESENDE, K. T. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos obtidos nas diferentes estações do ano. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.16-24, jan./abr. 2004.

ANGELIDAKI, M.; ALVES, D.; BOLZONELLA, L.; BORZACCONI, J. L.; CAMPOS, A. J.; GUWY, S.; KALYUZHNYI, P.; JENICEK and J. B. VAN LIER. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science & Technology**. 2009.

APHA; AWWA; WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21<sup>o</sup> ed. Washington D.C. 2005.

AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; SANTOS, M. L. F.; MONTEGGIA, L. O. Metodologia para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 12, n. 2, abr./jun., p. 192-201. 2007.

BARRE, T M.; GAGNON, N.; TOPP, E.; MASSE, L.; MASSÉ, D. I.; TALBOT, G. Physico-chemical characteristics and methanogen communities in swine and dairy manure storage tanks: Spatio-temporal variations and impact on methanogenic activity, **Water Research**, v. 47, n 2, p. 737-746, fev. 2013.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A. F.; e LUCAS JUNIOR, J. Biodigestores convencionais. **Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias UNESP**. Jaboticabal, 1990.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world, **Energy for Sustainable Development**, v. 15, p. 347-354, 2011.

CAMPOS, José Roberto. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro. ABES, 464 p. 1999.

CHERNICHARO, Cesar Augusto Lemos . **Princípios de tratamento biológico de águas residuárias volume 5: Reatores anaeróbios**. v.5, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 246 pg. 1997.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. 2006. 194p. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Energia – IEE/EPUSP/FEA/IF da Universidade de São Paulo. São Paulo.

DEGANUTTI, R.; PALHACI M. do C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, B. R.; SANTOS, B. C. dos. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **In Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas-SP. 2002

DEUBLEIN, D. & STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction**. Wiley-VCH, Weinheim, 472p, 2008.

DUARTE, E. R.; SILVA, R. B.; VASCONCELOS, V. O.; NOGUEIRA, F. A., & OLIVEIRA, N. J.F. Diagnóstico do controle e perfil de sensibilidade de nematódeos de ovinos ao albandazol e ao levamisol no norte de Minas Gerais. **Pesq. Vet. Bras**. v.32, p.147-152, 2012.

ESPERANCINI, M. S. T.; COLEN, F.; BUENO, O. C.; PIMENTEL, A. E. B.; SIMON, E. J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.1, p.110-118, 2007.

ESPOSITO, G.; FRUNZO, L.; LIOTTAL, F.; PANICO, A.; PIROZZI, F. Bio-methane potential tests to measure the biogás production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. **The Open Environmental Engineering Journal**. v.5, p 1-8. 2012.

FERNÁNDEZ, J.M.; HERNÁNDEZ, D.; PLAZA, C.; POLO, A. Organic Matter in degraded agricultural soils amended with composted and thermally-dried sewage sludges. **Science of The Total Environment**, v. 378, p. 75-80. 2007.

IANNICELLI, André. Luiz. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. 83 p. Dissertação de mestrado – Universidade de Taubaté; orientador, José Rui Camargo. – Taubaté, SP.

LACERDA, A.; LEROUX, T. & MORATA, T. Efeitos ototóxicos da exposição ao monóxido de carbono: uma revisão. **Pró-Fono R. Atual**. v.17, n.3, p. 403-412. 2005.

LEITE, W. R. M.. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto**. 2011. 143p. Dissertação de mestrado - UFSC; orientador, Paulo Belli Filho. – Florianópolis, SC.

LETTINGA, G.; FIELD, J.; VAN LIER, J.; ZEEMAN, G. & HULSHOFF POL, L.W. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. **Wat. Sci. Tech** ., v. 35, Nº 10, pp. 5-12, 1997.

LÖTJÖNEN, T.; LAITINEN, T. Energy from field energy crops – a handbook for energy producers. **Jyväskylä Innovation Oy & MTT Agrifood Research**. Finland, 2009.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1819 p. 2003.

NEVES, V. L. V. **Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino**. 2010. 57p. Trabalho de graduação. Tecnologia em biocombustíveis. FATEC – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. Araçatuba.

NIELSEN J. B. H.; AL SEADI, T, P.; POPIEL, O. The future of anaerobic digestion and biogas utilization, **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5478-5484. 2009.

OLIVER, A. de P. M.; NETO, A. de A. S.; QUADROS, D. G. de.; VALLADARES, R. E. Manual de treinamento em biodigestão, **USAID – United States Agency for International Development and Winrock international Brasil**. v. 2.0, Fev. 2008.

QUADROS, D. G. de; OLIVER, A. de P. M; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P. H. F. de; FERREIRA, E. de J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. v.14, n.3, p.326–332, 2010.

QUADROS, D.o G. de; VALLADARES, R.; REGIS, U. **Aproveitamento dos dejetos caprinos e ovinos na geração de energia renovável e preservação do meio ambiente**. Universidade do Estado da Bahia – Núcleo de Estudos e Pesquisas em Produção Animal, Instituto Winrock International, Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola. Programa Renova Bahia. UNEB-Barreiras 2007. Artigo disponível no site <http://www.caprtec.com.br/>, acessado dia 15/05/2014.

RODRIGUEZ, Lourdes. **Methane potential of sewage sludge to increase biogas production**. 2011. 22p. Degree Project at Masters Level - Department of Land and Water Resources Engineering. Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm - Sweden.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil, **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 1101-1107. 2009.

SANTANA, F. B. **Tratamento anaeróbio de águas residuárias da indústria de couro**. 2002, 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SASAKI, D.; HORI, T.; HARUTA, S.; UENO, Y.; ISHII, M.; IGARASHI, Y. Methanogenic pathway and community structure in a thermophilic anaerobic digestion process of organic solid waste, **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 111, p. 41-46. 2011.

SEGANFREDO, M. A. A aplicação do princípio do balanço de nutrientes, no planejamento do uso de dejetos de animais para adubação orgânica. **Embrapa Suínos e Aves**, CT 291, p. 1–5. Novembro/2001.

SPEECE R.E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. **Archea Press**, Tennessee, 1996.

SOUBES, M.. **Microbiologia de la digestion anaeróbia**. Taller e seminario latinoamericano, 3. Tratamiento anaerobio de aguas residuales. Montevideo - Uruguay, p. 15 - 27. 1994.

TAUSEEF, S. M.; PREMALATHA M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Methane capture from livestock manure, **Journal of Environmental Management**, v. 117, 15, p. 187-207. Mar. 2013.

Van HAANDEL, A. & LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente.** Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1994.

VISSER A. (1995). **Anaerobic treatment of sulphate containing in wastewater.** 1995. Tese de doutorado - Landbouwwuniversiteit te Wageningen (Universidade agrícola de Wageningen). Wageningen.

ZACHOW, Charlan Ricardo. **Biogás.** 2000. 12p. Dissertação de graduação. UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - DeTEC – Departamento de Tecnologia. Panambi, RS.



