

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM  
MISTURA DE DEJETOS SUÍNOS E LODOS DE ETE  
DE FRIGORÍFICOS E LATICÍNIOS EM  
BIODIGESTOR ANAERÓBIO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Tiago Feldkircher**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

# **POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM MISTURA DE DEJETOS SUÍNOS E LODOS DE ETE DE FRIGORÍFICOS E LATICÍNIOS EM BIODIGESTOR ANAERÓBIO**

**Tiago Feldkircher**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**

**Orientador: Profa. Dra. Delmira Beatriz Wolff**

**Co-orientador: Dr. Djalma Dias da Silveira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Feldkircher, Tiago

Potencial de produção de biogás com mistura de dejetos suínos e lodos de ete de frigoríficos e laticínios em biodigestor anaeróbio / Tiago Feldkircher.-2015.

95 p.; 30cm

Orientadora: Delmira Beatriz Wolff

Coorientador: Djalma Dias da Silveira

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2015

1. Biodigestão anaeróbia 2. Lodo de ETE 3. Biogás 4. Metano I. Wolff, Delmira Beatriz II. Silveira, Djalma Dias da III. Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Feldkircher. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: tiagofeldkircher@yahoo.com.br

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado.**

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM MISTURA DE  
DEJETOS SUÍNOS E LODOS DE ETE DE FRIGORÍFICOS E  
LATICÍNIOS EM BIODIGESTOR ANAERÓBIO**

elaborada por  
**Tiago Feldkircher**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Ambiental**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Delmira Beatriz Wolff, Dr<sup>a</sup>.**  
(Presidente/Orientadora)

**Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, Dr<sup>a</sup>.**  
(UFSM)

**Odorico Konrad, Dr.**  
(Centro Universitário UNIVATES)

Santa Maria, 26 de junho de 2015.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico essa dissertação de mestrado à minha família, em especial a meus pais, Claudio e Marlice, e a minha irmã, Marcele, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis. Também dedico à minha noiva Vanessa, pela compreensão nos momentos de ausência e o auxílio através de palavras e gestos.

## **AGRADECIMENTO**

À minha família pelos ensinamentos da vida e por me apoiar e incentivar em todos os meus objetivos.

A professora e orientadora Delmira Wolff, agradeço o apoio, os ensinamentos e a compreensão, serei sempre grato pelo auxílio.

Ao professor Djalma pelo auxílio direto na elaboração do trabalho, sem os apontamentos do senhor não teria condições de concluir o mesmo.

Especial a Cooperativa Languiru, pelo apoio e liberação nos horários de trabalho e o incentivo no desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu colega e amigo Vitor Schneider, pelo companheirismo durante a jornada do Mestrado e os ensinamentos e troca de experiências realizadas.

Ao professor Odorico, as amigas e colegas Munique Marder, Camila Hassam e todos os colegas do Laboratório de Biorreatores do Centro Universitário UNIVATES, que de uma forma ou outra tenham auxiliado na realização dos experimentos, para que o trabalho pudesse ser concluído.

Aos colegas do PPGEAMB, pela parceria e companheirismo durante as aulas e trabalhos.

A secretária Rosa pelo auxílio e belo trabalho realizado.

Aos companheiros de jornada e viagem até Santa Maria.

Enfim, agradeço todos que dê uma forma ou outra, tenham auxiliado na realização e na conquista de mais esse objetivo.

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
Universidade Federal de Santa Maria

### **POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM MISTURA DE DEJETOS SUÍNOS E LODOS DE ETE DE FRIGORÍFICOS E LATICÍNIOS EM BIODIGESTOR ANAERÓBIO**

AUTOR: TIAGO FELDKIRCHER  
ORIENTADORA: DELMIRA BEATRIZ WOLFF  
Santa Maria, 26 de junho de 2015.

A crescente necessidade pelo tratamento de efluentes e controle da destinação de lodo, resíduos e dejetos da produção agrícola (principalmente de suínos), preocupa a sociedade em razão dos grandes impactos ambientais que a inadequada destinação pode acarretar. Em razão disso e visando a possibilidade de geração de energia através de um sistema de biodigestão anaeróbia, com o aproveitamento desses resíduos, que este estudo visa quantificar e qualificar a geração de biogás proveniente da biodigestão anaeróbia em diferentes substratos provenientes de uma empresa atuante em diferentes segmentos (produção primária, abatedouros de aves e suínos e indústria de laticínios) no interior do Rio Grande do Sul. Foram realizados seis experimentos junto ao Laboratório de Biorreatores do Centro Universitário Univates, utilizando reatores de um litro, os quais foram preenchidos com 600 mL de diferentes substratos, em diversas concentrações de cada substrato e em escala de bancada, sendo que após preenchidos, os reatores eram mantidos em estufa sob controle de temperatura a 35°C. Realizado por meio de processos por batelada, o biogás gerado em cada experimento foi quantificado utilizando um aparelho desenvolvido pelo próprio laboratório. O metano presente nesse biogás foi quantificado através de um sensor específico denominado Advanced Gasmeter, da empresa PRONOVA Analysetechnik GmbH & Co. Foram obtidos diferentes resultados para cada mistura de substratos, sendo que a maior quantidade de biogás foi de 13.282,72 mL, verificada na amostra 1 do experimento VI, a qual também apresentou a maior concentração de metano que foi de 8.897,72 mL. Foi possível verificar que a tripa celulósica e o lodo flotado são ótimos incrementos para aumentar a produção de biogás e conseqüentemente metano no processo de biodigestão. A quantificação dos substratos também apresentou um volume satisfatório para possível construção de um biodigestor em escala real visando a geração de energia.

**Palavras-chave:** Biodigestão anaeróbia. Lodo de ETE. Biogás. Metano.

## **ABSTRACT**

Master's Degree Dissertation  
Program of Post-Graduation in Environmental Engineer  
Federal University of Santa Maria

### **POTENTIAL OF BIOGAS PRODUCTION WITH MIX OF WASTE PIG AND SLUDGES FROM ETE OF FRIGORIFICS AND DAIRIES IN ANAEROBIC DIGESTER**

AUTHOR: TIAGO FELDKIRCHER

ADVISOR: DELMIRA BEATRIZ WOLFF

Santa Maria, June 26, 2015.

The growing need for wastewater treatment and control of disposal of sludge, residues and waste of agricultural production (mainly of pigs) worries the society because of the major environmental impacts that the improper disposal may result. Because of this and targeting the possibility of power generation through an anaerobic digestion system, with the reuse of this waste, this study aims to quantify and qualify the generation of biogas from the anaerobic digestion in different substrates derived from an Company active in different segments (primary production, chicken and poultry slaughterhouses and dairy industry) of the countryside of Rio Grande do Sul. There were performed six experiments in the Bioreactor Laboratory of Univates University Center, by using reactors of one liter, which were filled with 600 mL of different substrates at various concentrations of each substrate and in bench scale, and after filled, the reactors were kept in greenhouse under temperature control at 35°C. Performed through batch processes, the biogas generated in each experiment was quantified by using a device developed by the laboratory itself. The methane present in this biogas was quantified by a specific sensor called Advanced Gasmeter, of the company PRONOVA AnalysetechnikGmbH&Co. Different results were obtained for each mixture of substrates; the largest amount of biogas was 13.282,72 mL, observed in sample 1 of the VI experiment, which also showed the greatest concentration of methane, that was 8.897,72 mL. It was possible to verify that the cellulosic casing and the float sludge are great increment for increasing the production of biogas and consequently methane in the digestion process. The quantification of substrates also presented an satisfactory volume for possible construction of a digester in full scale aiming the energy generation.

**Keywords:** Anaerobic digestion. Sludge of ETP. Biogas. Methane.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de aeração por meio de difusores porosos .....	23
Figura 2 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios .....	24
Figura 3 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia .....	31
Figura 4 – Biodigestor modelo indiano .....	42
Figura 5 – Biodigestor modelo chinês .....	43
Figura 6 – Biodigestor modelo lagoa coberta .....	44
Figura 7 – Reator UASB com detalhe de seu funcionamento interno. ....	45
Figura 8 – Biodigestor de alto rendimento .....	46
Figura 9 – Estufa e sistema de medição do biogás.....	51
Figura 10 – Sistema de medição para quantificar o biogás .....	52
Figura 11 – Sensor específico para medir a concentração de gás metano .....	53
Figura 12 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 1.....	68
Figura 13 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 2.....	72
Figura 14 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 3.....	75
Figura 15 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 4.....	79
Figura 16 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 5.....	83
Figura 17 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 6.....	86
Figura 18 – Comparativo da geração de metano e biogás em todas as amostras. .	88

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição básica do biogás gerado em biodigestor.....	38
Quadro 2 – Técnicas de remoção de impurezas do biogás .....	40
Quadro 3 – Comparação do poder calorífico do biogás.....	48
Quadro 4 – Equivalência entre o biogás e outros combustíveis .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentuais utilizados em cada triplicata .....	56
Tabela 2 – Percentuais utilizados em cada triplicata .....	57
Tabela 3 – Percentuais utilizados em cada triplicata .....	58
Tabela 4 – Percentuais utilizados em cada triplicata .....	59
Tabela 5 – Percentuais utilizados em cada triplicata .....	61
Tabela 6 – Quantificação dos substratos da Cooperativa.....	63
Tabela 7 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento .....	68
Tabela 8 – Análise de pH no início e fim do experimento .....	69
Tabela 9 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento .....	73
Tabela 10 – Análise de pH no início e fim do experimento .....	73
Tabela 11 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento .....	76
Tabela 12 – Análise de pH no início e fim do experimento .....	77
Tabela 13 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento .....	80
Tabela 14 – Análise de pH no início e fim do experimento .....	81
Tabela 15 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento .....	84
Tabela 16 – Análise de pH no início e fim do experimento .....	85
Tabela 17 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento .....	87
Tabela 18 – Análise de pH no início e fim do experimento .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AME	– Atividade metanogênica específica
C	– Carbono
CH <sub>4</sub>	– Metano
CO	– Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	– Dióxido de Carbono
CONAMA	– Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	– Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	– Demanda Química de Oxigênio
ETE	– Estação de Tratamento de Efluentes
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	– Óxido de ferro
GLP	– Gás liquefeito de petróleo
H <sub>2</sub>	– Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	– Água
H <sub>2</sub> S	– Gás sulfídrico
MDL	– Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N	– Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	– Amônia
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	– NitratoO <sub>2</sub> - Oxigênio
P	– Fósforo
pH	– Potencial hidrogeniônico
PSA	– <i>Pressure Swing Adsorption</i>
SF	– Sólidos fixos
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	– Sulfato
SS	– Sólidos em suspensão ou suspensos
SSed	– Sólidos sedimentáveis
ST	– Sólidos totais
SV	– Sólidos voláteis
UASB	– <i>Upflow anaerobic sludge blanket</i> (Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo)

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Tratamento de efluentes</b>	<b>19</b>
3.1.1	Sistemas aeróbios de tratamento	21
3.1.2	Sistemas anaeróbios de tratamento	23
3.1.3	Tratamento de efluentes em unidades industriais	25
<b>3.2</b>	<b>Produção agropecuária e geração de dejetos</b>	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>Problemas ambientais</b>	<b>27</b>
<b>3.4</b>	<b>Fontes de energia</b>	<b>28</b>
3.4.1	Problemas energéticos	28
3.4.2	Fontes de energia renováveis	29
<b>3.5</b>	<b>Energia de biomassa/ biogás</b>	<b>29</b>
3.5.1	Biodigestão anaeróbia	30
3.5.1.1	Hidrólise	31
3.5.1.2	Acidogênese	32
3.5.1.3	Acetogênese	32
3.5.1.4	Metanogênese	33
3.5.2	Condições necessárias para geração de biogás	33
3.5.2.1	Temperatura	34
3.5.2.2	pH	34
3.5.2.3	Sólidos	35
3.5.2.4	Alcalinidade	36
3.5.2.5	Composição e concentração do substrato	36
3.5.3	Composição do biogás	37
3.5.4	Purificação do biogás	38
3.5.5	Modelos de biodigestores	41
3.5.5.1	Modelo indiano	41
3.5.5.2	Modelo chinês	42
3.5.5.3	Modelo lagoa coberta	43
3.5.5.4	Reatores tipo UASB	44
3.5.5.5	Biodigestores de alto rendimento	45
3.5.6	Vantagens da aplicação do biodigestor	46
3.5.7	Desvantagens da aplicação do biodigestor	47
<b>3.6</b>	<b>Utilização do biogás como energia</b>	<b>47</b>
<b>3.7</b>	<b>Utilização do biofertilizante</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Realização do experimento</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Quantificação do substrato gerado</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Elaboração do experimento 1</b>	<b>53</b>
<b>4.4</b>	<b>Elaboração do experimento 2</b>	<b>55</b>
<b>4.5</b>	<b>Elaboração do experimento 3</b>	<b>55</b>
<b>4.6</b>	<b>Elaboração do experimento 4</b>	<b>56</b>

4.7	<b>Elaboração do experimento 5</b> .....	58
4.8	<b>Elaboração do experimento 6</b> .....	60
4.9	<b>Análise de sólidos e pH</b> .....	61
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Quantificação dos substratos</b> .....	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>Experimento 1</b> .....	<b>64</b>
5.2.1	Amostra 1 .....	64
5.2.2	Amostra 2 .....	64
5.2.3	Amostra 3 .....	65
5.2.4	Amostra 4 .....	65
5.2.5	Amostra 5 .....	65
5.2.6	Amostra 6 .....	66
5.2.7	Amostra 7 .....	66
5.2.8	Amostra 8 .....	66
5.2.9	Amostra 9 .....	67
5.2.10	Comparação das amostras.....	67
5.2.11	Análises de sólidos .....	68
5.2.12	Avaliação do pH.....	69
<b>5.3</b>	<b>Experimento 2</b> .....	<b>70</b>
5.3.1	Amostra 1 .....	70
5.3.2	Amostra 2 .....	71
5.3.3	Amostra 3 .....	71
5.3.4	Comparação das amostras.....	71
5.3.5	Análises de sólidos .....	72
5.3.6	Avaliação do pH.....	73
<b>5.4</b>	<b>Experimento 3</b> .....	<b>74</b>
5.4.1	Amostra 1 .....	74
5.4.2	Amostra 2 .....	74
5.4.3	Amostra 3 .....	74
5.4.4	Comparação das amostras.....	75
5.4.5	Análises de sólidos .....	76
5.4.6	Avaliação do pH.....	76
<b>5.5</b>	<b>Experimento 4</b> .....	<b>77</b>
5.5.1	Amostra 1 .....	77
5.5.2	Amostra 2 .....	78
5.5.3	Amostra 3 .....	78
5.5.4	Amostra 4 .....	78
5.5.5	Amostra 5 .....	79
5.5.6	Comparação das amostras.....	79
5.5.7	Análises de sólidos .....	80
5.5.8	Avaliação do pH.....	81
<b>5.6</b>	<b>Experimento 5</b> .....	<b>82</b>
5.6.1	Amostra 1 .....	82
5.6.2	Amostra 2 .....	82
5.6.3	Amostra 3 .....	82
5.6.4	Comparação das amostras.....	83
5.6.5	Análises de sólidos .....	84
5.6.6	Avaliação do pH.....	84
<b>5.7</b>	<b>Experimento 6</b> .....	<b>85</b>
5.7.1	Amostra 1 .....	85

5.7.2	Amostra 2 .....	85
5.7.3	Comparação das amostras.....	86
5.7.4	Análises de sólidos .....	86
5.7.5	Avaliação do pH.....	87
<b>5.8</b>	<b>Comparação das amostras dos experimentos .....</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>6.1</b>	<b>Recomendações .....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>92</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A expansão industrial e agrícola é extremamente necessária, visto que a demanda por alimentos aumenta gradativamente, fazendo-se necessária a produção de alimentos e também de produtos industrializados em larga escala, produtos esses que geram muitos resíduos e usufruem muito rapidamente os recursos naturais tornando-os, assim, cada vez mais escassos.

Especialmente com o acentuado crescimento populacional iniciou-se a busca pelo desenvolvimento e por novas tecnologias, conseqüentemente o consumo aumentou trazendo graves problemas sociais e, principalmente, ambientais.

Esse desenvolvimento, tanto na área industrial como na agricultura, acaba resultando na produção, em larga escala, de resíduos sólidos e efluentes, que, em muitos casos, especialmente na área rural, não são corretamente manejados e muito menos destinados de forma adequada, retornando para a natureza sem utilização de técnicas de manejo e mitigação do potencial causador de poluição (KUNZ e PAULILLO, 2014).

Para as indústrias, as exigências em relação ao tratamento de efluentes ficaram mais rigorosas, já que os órgãos ambientais federais, estaduais e municipais acabam fiscalizando mais as instituições privadas. Entretanto, ainda assim, essa cobrança continua sendo muito aquém do que deveria ser na realidade, e muitas indústrias permanecem operando e emitindo agentes poluidores no ambiente (ALBERGUINI et al., 2005).

Com as resoluções do CONAMA 357 de 2005 e 430 de 2011, que dispõem sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, a exigência no atendimento aos parâmetros de lançamento de efluentes somente aumentou, fazendo com que indústrias, poder público e produtores rurais buscassem otimizar e melhorar a qualidade do efluente, para atender os requisitos de emissão ou incorporação em recursos hídricos. O grande empecilho para o total atendimento da legislação, continua sendo a falha e insuficiente fiscalização dos órgãos ambientais sobre essas atividades.

Segundo Braile (1979), para os países em desenvolvimento, a proteção do meio ambiente contra agentes poluidores de origem industrial é um problema muito



complexo. A poluição está diretamente associada à elevação do padrão de vida da população.

Na agricultura ocorre da mesma forma. De acordo com Jorge (2004) os dejetos provenientes da produção em larga escala de suínos, aves e produção leiteira, acabam por degradar e impactar o meio ambiente, já que os sistemas de tratamento para essas atividades, em muitos casos, ainda continua aquém do necessário para que não ocorram impactos significativos nos recursos hídricos, no solo e no ar.

Outra questão conflitante, é a necessidade de geração de energia em grande escala para manter o desenvolvimento e até mesmo a qualidade de vida da população. Como no Brasil quase 50% da matriz energética está baseada em fontes não renováveis de energia (combustíveis fósseis), é de extrema importância a busca por alternativas de energia mais sustentáveis.

Com esses aspectos, unindo a necessidade de tratamento para dejetos e efluentes e também a necessidade de energia para o contínuo desenvolvimento da humanidade, o presente projeto visa estudar a biodigestão anaeróbia com objetivo de produção de energia.

O estudo visa avaliar, em escala de bancada e em batelada, o uso de dejetos de produção agrícola e também os resíduos produzidos na operação de tratamento de efluentes de unidades industriais (frigoríficos e laticínios) para geração de energia, encontrando assim alternativas para destinação dos resíduos da produção de suínos e também de lodos e gorduras provenientes de estações de tratamento de efluentes industriais, do abate de suínos, aves e de uma indústria de beneficiamento do leite e a necessidade de geração de energia para indústrias ou produtores rurais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Quantificar e qualificar a geração de biogás proveniente da biodigestão anaeróbia com substratos de lodo de estações de tratamento de efluentes, lodo de flotadores e dejetos de suínos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Quantificar os substratos que podem ser utilizados na biodigestão anaeróbia;
- Avaliar e mensurar a quantidade de biogás gerado utilizando substratos formados por diferentes componentes, em diferentes concentrações;
- Avaliar a produção de metano presente no biogás gerado através das diferentes misturas e concentrações de substratos.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Tratamento de efluentes

O tratamento de efluentes é necessário em todas as escalas, tanto na área industrial como doméstica. Existem vários modelos de tratamento, alguns anaeróbios e outros aeróbios.

Para Braga et al. (2005) e Nuvolari (2003) esgoto é o termo utilizado para caracterizar todo e qualquer tipo de despejo resultante dos usos da água. Entre os principais estão o doméstico, o comercial, o industrial e os agrícolas. O resíduo líquido industrial é o esgoto resultante de algum processo industrial, podendo conter características muito específicas, de acordo com o tipo de atividade industrial.

Em relação aos despejos industriais, é fácil de ser observada uma grande variabilidade do efluente gerado e também das metodologias de tratamento, mesmo sendo a mesma tipologia industrial (BRAILE, 1979). Existem diversos fatores dentro das indústrias que podem alterar e assim explicar tamanha variação – as práticas de trabalho adotadas, a idade dos equipamentos, o tipo de matéria-prima utilizada, entre outros (SPERLING, 2001).

Conforme Sperling (2001) e Nunes (2004), o tratamento dos esgotos pode ser classificado nos seguintes níveis ou fases:

- Preliminar;
- Primário;
- Secundário;
- Terciário ou avançado (apenas em casos de necessidade especial).

Os processos do tratamento primário podem ser os seguintes, de acordo com Nunes (2004): decantação primária ou simples; precipitação química com baixa eficiência e flotação. Já para Crespo (2005), as operações dessa etapa de tratamento são o adensamento; espessamento gravitacional ou por flotação do lodo; digestão anaeróbia ou aeróbia.

Os tanques de sedimentação ou decantação podem ser circulares ou retangulares, onde os efluentes fluem lentamente e os sólidos suspensos, devido a

sua densidade maior, sedimentam para o fundo. Esse processo também pode ser realizado com o auxílio de agentes coagulantes, como, por exemplo, sulfato de alumínio ou cloreto férrico. Também pode-se, ou não, utilizar polímeros, o que aumenta a produção do lodo, que é o material sedimentado no fundo do decantador. Ele pode ser retirado através de raspadores ou tubulações, para posterior destino e tratamento ou destinação final (SPERLING, 2001).

Já conforme Leme (2008) e Costa (2007), as estruturas do tratamento primário podem ser os decantadores primários e os flotadores. Nos decantadores, o efluente escoar, permitindo que os sólidos em suspensão possam sedimentar gradualmente no fundo, formando uma massa de lodo. Os materiais flutuantes, como graxas, óleos e gorduras, tendem a subir para superfície, assim facilitando sua remoção.

Já os processos de tratamento secundário, segundo Sperling (2005) e Nuvolari (2003), tem como principal objetivo a remoção de matéria orgânica, ou seja, a diminuição da carga de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) presente no efluente. A essência do tratamento nessa etapa é a adição de um processo biológico no sistema, o qual, através de reações bioquímicas realizadas por microrganismos (bactérias, fungos e protozoários), remove a matéria orgânica, formando o lodo.

Leme (2008) afirma que, além de remover a matéria orgânica remanescente no efluente, essa etapa é utilizada para, eventualmente, remover nutrientes como fósforo (P) e nitrogênio (N).

O tratamento secundário, realizado por processos biológicos, reproduz os mecanismos naturais de oxidação e estabilização da matéria orgânica, como ocorrem naturalmente nos corpos d'água, porém utiliza-se menor espaço e realiza-se em menor período de tempo, mediante condições controladas nos reatores, a fim de atingir os padrões de lançamento estipulados na legislação (LEME, 2008).

O processo de tratamento funciona com os microrganismos utilizando a matéria orgânica como substrato, convertendo a mesma em gás carbônico e água, multiplicando-se e podendo, em condições anaeróbias, produzir também o metano (SPERLING, 2001).

De acordo com Sperling (2001), existem diversas metodologias de tratamento secundário, e as principais são: lagoas de estabilização e variantes; processos de disposição sobre o solo; reatores anaeróbios; lodos ativados e variantes; e reatores anaeróbios com biofilmes. Já conforme Nunes (2004), os processos de tratamento

nessa etapa são: processos de lodos ativados; lagoas de estabilização; sistemas anaeróbios com alta eficiência; lagoas aeradas; filtros biológicos e precipitação química com alta eficiência.

Todos os tipos de tratamento, especialmente o processo de lodos ativados, acarretam na geração significativa de lodo, que precisa ser tratado e destinado corretamente (SPERLING, 2001).

Na etapa terciária do tratamento, que serve para realizar um polimento final no efluente antes de ser lançado ao corpo hídrico, usualmente não ocorre uma geração significativa de lodo, sendo assim, a mesma não será abordada a fundo no presente trabalho (LEME, 2008).

A seguir, serão descritos dois sistemas de tratamento para a etapa secundária, o tratamento com sistemas aeróbios de lodos ativados e o sistema anaeróbio. Segundo Nunes (2004) e Sperling (2001), os dois acabam gerando significativa quantidade de lodo que precisa ser destinada de forma adequada ou que pode ser utilizada para geração de energia através de processos de biodigestão anaeróbia.

### 3.1.1 Sistemas aeróbios de tratamento

Conforme Cavalcanti (2009), todas as formas de tratamento biológico são derivadas de processos que ocorrem na natureza, os quais são acelerados graças ao controle da ação dos microrganismos sobre o substrato. Esse controle fica muito evidenciado no processo aeróbio, no qual é inserido oxigênio para o crescimento dos microrganismos.

A aglomeração de flocos formados continuamente pelo crescimento de várias espécies de microrganismos (fungos, bactérias, algas, rotíferos e protozoários), a partir da matéria orgânica do efluente, na presença do oxigênio dissolvido, é denominada “lodos ativados” (CAVALCANTI, 2009).

De acordo com Sperling (2002), o sistema de lodos ativados é amplamente utilizado no mundo, para o tratamento de despejos industriais e domésticos, em situações que exigem uma elevada qualidade do efluente tratado com pequena área para a ETE. Porém, esse sistema inclui um alto índice de mecanização, comparado

com outros sistemas de tratamento, implicando assim em maiores custos com energia elétrica.

Após o tratamento primário, o efluente pré-decantado é direcionado para um tanque de aeração com grande potencial nutritivo, constituído pela matéria orgânica quantificada pela DBO. Nesse tanque, também chamado de reator aeróbio, existe uma gama de microrganismos destinada a processar esse nutriente. Essa população de microrganismos (lodo biológico) é gerada e mantida em níveis compatíveis com o substrato do efluente introduzido (CRESPO, 2005).

Para Leme (2008), em processos aeróbios biológicos, a remoção é feita por meio da ação metabólica e da floculação de partículas em suspensão. O principal objetivo desse sistema é remover a matéria orgânica, constituída por sólidos em suspensão (que contém DBO suspensa ou particulada) e eventualmente auxiliam na remoção de nutrientes (N e P).

O oxigênio é inserido de forma mecanizada, com o auxílio de aeradores. A massa biológica (lodo biológico) formada é separada fisicamente do líquido (decantação), sendo que o líquido clarificado constitui-se o efluente tratado. O lodo excedente pode, em parte, retornar ao sistema, para a manutenção das atividades microbianas, e o restante deve ser encaminhado para tratamento ou disposição final (CAVALCANTI, 2009).

Esse tipo de sistema é aplicado para o tratamento dos efluentes provenientes das plantas industriais de abate de suínos, aves e também na indústria de beneficiamento de leite da Cooperativa Agrícola em que será realizado o projeto, gerando assim uma quantidade muito grande de lodo, que necessita de tratamento e disposição final adequada, mas que serve também como substrato para utilização em biodigestores anaeróbios.

Na figura 1, mostra-se o sistema de aeração por difusores porosos. Esse sistema é utilizado no abatedouro de suínos e como informado anteriormente, gera uma quantidade significativa de lodo para descarte.

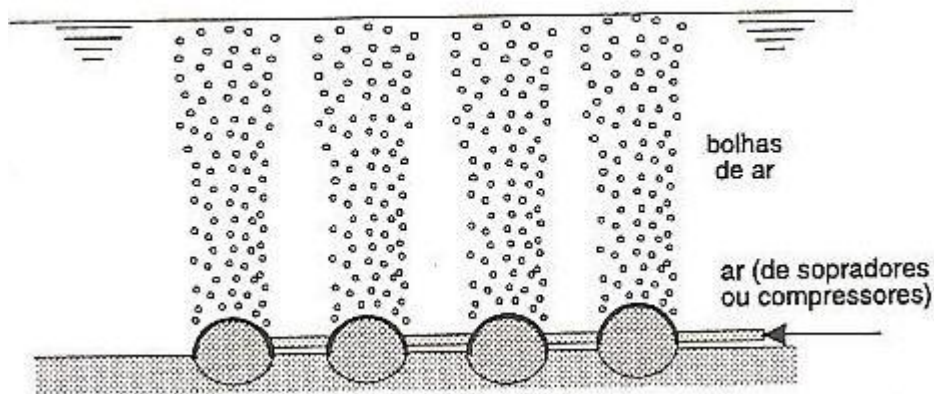


Figura 1 – Sistema de aeração por meio de difusores porosos

Fonte: SPERLING (2002)

O lodo gerado em grande quantidade nos processos aeróbios é um fator importante na avaliação do estudo, já que o mesmo precisa ser destinado corretamente, seja para incorporação no solo ou para compostagem.

O custo dessa destinação é alto e identificar uma opção de destinação para esses resíduos torna-se importante, pois além de diminuir custos, gera renda com a geração de energia.

### 3.1.2 Sistemas anaeróbios de tratamento

Para Chernicharo (2001), no Brasil, os sistemas anaeróbios de tratamento encontram uma grande aplicabilidade, possuindo diversas características favoráveis, como o baixo custo, simplicidade operacional, baixa produção de sólidos, produção de biogás (que pode ser utilizado como combustível), além de adequadas condições ambientais, principalmente os reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). Na Figura 2, pode-se avaliar as vantagens do tratamento anaeróbio em relação ao aeróbio.

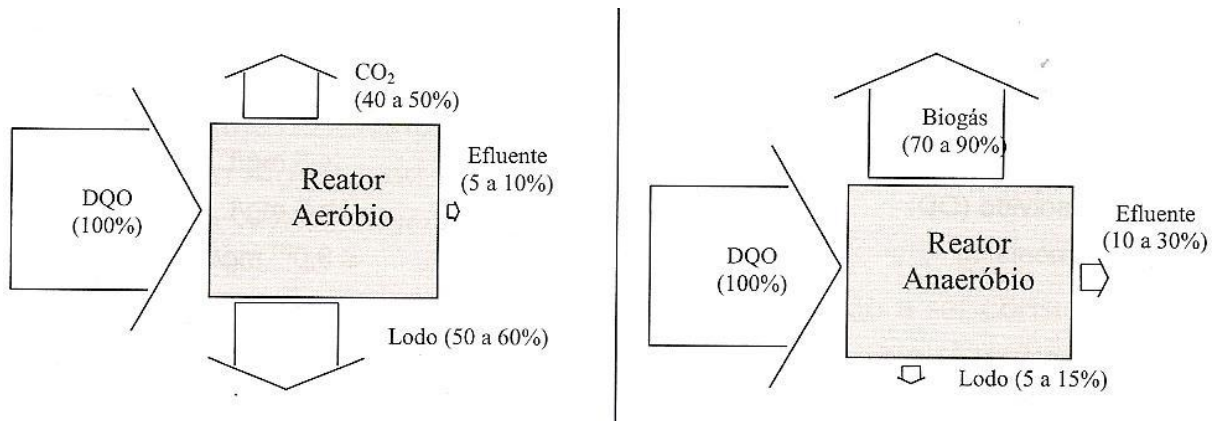


Figura 2 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios

Fonte: CHERNICHARO (2001)

Conforme Leme (2008), os sistemas anaeróbios mais utilizados para o tratamento de efluentes são o filtro anaeróbio, o reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente, reator anaeróbio com chicanas e o reator anaeróbio de fluxo expandido. Esses sistemas não utilizam muita área e a mão-de-obra operacional também é pequena.

Em condições anaeróbias, para a conversão da matéria orgânica são utilizados aceptores de elétrons inorgânicos, como  $\text{NO}_3^-$  (redução de nitrato),  $\text{SO}_4^{2-}$  (redução de sulfato) ou  $\text{CH}_4$  (formação de metano). Na digestão anaeróbia, cada microrganismo tem uma função essencial – as bactérias metanogênicas produzem um gás insolúvel (metano) possibilitando assim a remoção do carbono orgânico do ambiente anaeróbio e utilizam o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), favorecendo a atividade das bactérias acidogênicas, que fermentam compostos orgânicos produzindo ácido acético, que também é convertido em metano (CHERNICHARO, 2007).

As bactérias anaeróbias têm uma taxa metabólica e de reprodução mais lenta do que as bactérias aeróbias. Mesmo assim, a remoção da DBO pode chegar na ordem de 50 a 70%. No caso de ocorrer problemas operacionais durante o tratamento anaeróbio, pode haver a liberação de gás sulfídrico, responsável por maus odores, portanto é sempre importante manter o sistema de tratamento equilibrado (SPERLING, 2001).

Apesar das grandes vantagens desses reatores, algumas desvantagens ainda podem ser constatadas, como necessidade de uma etapa de pós-tratamento, possibilidade de emanar maus odores e elevado intervalo de tempo para a partida do sistema sem a utilização de um inóculo. Estes problemas podem ser



minimizados, ou até evitados, quando o sistema for bem projetado, construído e operado (CHERNICHARO, 2007).

É necessário realizar a separação e coleta dos gases gerados, já que os mesmos também podem interferir negativamente no sistema. Essa coleta pode ser realizada com a instalação de dispositivos específicos, geralmente vertedouros. A produção de gás no reator é bastante variável e o gás produzido pode conter cerca de 60 a 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ), que pode ser utilizado como geração de energia (NUVOLARI, 2003).

Como mencionado anteriormente, esses sistemas acabam gerando lodo, material orgânico, que de acordo com o tipo de efluente tratado e as condições de operação (como uso ou não de produtos químicos), deve ser encaminhado para posterior tratamento ou também diretamente incorporado ao solo.

Com a escassez de áreas para disposição dos lodos provenientes desses sistemas e também a necessidade intensiva de todo tipo de energia para a sociedade atual, existem diversas opções de usos e destinos para esse tipo de material, porém existe um meio que pode atender a necessidade de disposição adequada e também demanda de geração de energia, através da produção do gás metano, esse processo é a biodigestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007).

### 3.1.3 Tratamento de efluentes em unidades industriais

O tratamento de efluentes em unidades industriais, dos mais diferentes segmentos, segue basicamente duas linhas de tratamento biológico: anaeróbio ou aeróbio.

Nas unidades industriais onde o estudo foi realizado não é diferente disso. No Abatedouro de Suínos, aplica-se um sistema totalmente biológico, através do processo por lodo ativado, com a adição de coagulante orgânico para uma melhor flotação, com isso, ocorre a geração de grande quantidade de lodo, o qual, como mencionado necessita de um descarte e destinação adequado.

Já no Frigorífico de Aves, não ocorre a adição de qualquer substância química no processo por flotação, dessa forma não incide numa geração tão grande de lodo como no outro abatedouro, porém, em função da grande vazão de efluente,

o sistema biológico aeróbio acaba gerando uma quantidade muito grande de lodo, sendo necessário realizar a incorporação desse lodo no solo.

Na Indústria de Laticínios, a etapa primária do tratamento também conta com a adição de coagulante orgânico, o que acaba gerando uma grande quantidade de lodo flotado, como é chamada a gordura removida na primeira etapa. Posteriormente, com o sistema biológico por lodo ativado, é gerado também lodo para descarte diário e incorporação no solo.

A grande dificuldade da empresa proprietária dos Abatedouros e da Laticínios, mesmo que podendo realizar a disposição do lodo no solo, é encontrar áreas suficientes e que tenham condições de receber a aplicação desse lodo, em função do grande volume de lodo gerado.

### **3.2 Produção agropecuária e geração de dejetos**

Na atualidade, o tratamento dos dejetos de produção agropecuária, especialmente da produção de suínos, além da atividade de aves e bovinos, é um dos problemas que o crescimento da produção trouxe para o meio ambiente e para a sociedade (GALBIATTI, 2010; GASPAR, 2003).

Uma característica da produção de suínos é o alto potencial poluidor, já que um suíno pode produzir 2,5 vezes mais dejetos do que um ser humano, sendo que a concentração da DBO é em torno de 260 vezes maior que o ser humano, atingindo em alguns casos uma DBO de  $52.000 \text{ mgL}^{-1}$ .

Além do alto impacto que pode causar no meio ambiente, o dejetos de suínos é um substrato com grande potencial para geração de energia, através da biodigestão anaeróbia, que é uma das formas de tratamento utilizadas nessa atividade (CERVI, 2010).

A produção avícola, de acordo com Orrico Junior (2010), é caracterizada pelo grande consumo de energia, seja para aquecimento ou resfriamento dos aviários. Nesse tipo de produção, também ocorre a geração da cama de aviário, que pode ser processada e também utilizada em processos de geração de energia renovável.

Segundo Orrico Junior et al. (2010), existe uma dificuldade para o tratamento dos dejetos avícolas, já que através do sistema de compostagem, que atualmente é

bastante utilizado, ocorre a geração de fortes odores (com a liberação de amônia para a atmosfera) e com isso também a perda de nitrogênio, que, em um processo de biodigestão, poderia estar sendo aproveitado e incorporado ao biofertilizante para ser aplicado no solo.

Na produção de bovinos, segundo Kunz (2014), o grande consumo de água, a alta quantidade de dejetos gerados, a geração de diversos tipos de resíduos, como embalagens de agrotóxicos, medicamentos e fertilizantes e a natural emissão de gás metano, por se tratarem de animais ruminantes, são alguns dos impactos gerados por essa atividade.

A empresa em estudo, possui atividades nos três segmentos, gerando assim uma grande quantidade de dejetos que necessitam de uma destinação adequada. Muitas vezes o produtor rural não tem a capacidade de armazenamento necessária para os seus dejetos, podendo ocasionar contaminações e impactos ambientais.

Pensando nessa dificuldade e na minimização dos impactos, que o estudo também visa abranger uma avaliação da quantidade de dejetos gerados pelos produtores associados da empresa e a possibilidade de utilização desses dejetos no sistema de biodigestão anaeróbia, permitindo assim ganhos energéticos, ambientais e conseqüentemente econômicos.

### **3.3 Problemas ambientais**

Segundo Jorge (2004), alguns problemas ambientais vividos na atualidade são provenientes da produção agrícola, além, é claro, da contaminação por efluentes e resíduos industriais e esgoto doméstico. A preocupação com esses impactos ambientais, tem gerado um aporte financeiro muito grande em pesquisa e busca por melhoria no destino de dejetos e na geração de fontes alternativas de energia.

Com a aplicação do lodo proveniente de estações de tratamento no solo, existe a possibilidade de contaminação dos recursos hídricos, através da percolação e infiltração desses resíduos no solo. Toda essa aplicação deve ser controlada, para minimizar ao máximo a possibilidade de impacto ambiental (SPERLING, 2001).

Na produção agrícola-pecuária, conforme mencionado, existe dificuldade na destinação adequada de dejetos pelos produtores, já que na maioria dos casos as esterqueiras estão subdimensionadas e sem nenhuma proteção contra as precipitações pluviométricas que podem causar o transbordo desses depósitos. Com isso, muitas vezes o produtor se vê obrigado a incorporar um dejetos ainda não maturado no solo, para impedir o transbordo do seu depósito. Essas situações ocorrem principalmente na produção extensiva de suínos (JORGE, 2004; GASPAR, 2003).

### **3.4 Fontes de energia**

A busca pelo desenvolvimento da civilização humana está diretamente vinculada a pesquisa e descoberta de fontes de energia, sendo elas renováveis ou não (GALBIATTI, 2010).

O Brasil se caracteriza pelo uso de energia renovável, especialmente pelo uso da energia hidrelétrica, que representa cerca de 76,9% da produção de energia elétrica do país. Apesar desses dados, a energia renovável, através de outros segmentos como energia eólica, energia de biomassa, energia solar, tem grandes possibilidades de crescimento no Brasil (BEN, 2013).

#### **3.4.1 Problemas energéticos**

Na sociedade atual, um dos grandes problemas existentes é a demanda por energia. Como a matriz energética mundial está baseada em combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, a sustentabilidade desse sistema está comprometida, por isso a intensa busca por novas formas de geração de energia (KUNZ, 2014).

A energia é uma propriedade de todo corpo ou sistema, com a qual o seu estado ou sua situação podem ser alterados, ou seja, é o potencial natural para executar um trabalho ou realizar uma ação e é um recurso imprescindível para existir a vida no planeta Terra. Ela pode se manifestar de diversas maneiras, através das

diferentes formas de energia, como por exemplo energia térmica, eólica, hídrica, mecânica, elétrica, radiante, nuclear, química, entre outras. Não será abordada a especificidade de cada uma das energias, já que esse poderá ser o objeto de um estudo posterior para avaliar qual o modelo de energia que deverá ser gerada com o produto da biodigestão anaeróbia (KUNZ, 2014).

#### 3.4.2 Fontes de energia renováveis

Para Kunz (2014), as energias renováveis são de extrema importância, pois sua principal característica é de não possuírem um limite de tempo para a sua utilização, sendo consideradas fontes limpas de energia. As energias renováveis podem ser produzidas pelo calor do sol, pela força do vento ou da água e através de reações que ocorrem naturalmente na natureza, mas que podem ser otimizadas pelo homem, visando sua utilização.

Segundo Ben (2013), a participação das energias renováveis na geração da energia elétrica brasileira é de 83,3% do total de energia produzida no Brasil, elas podem servir como uma fonte alternativa ou um complemento para o uso de combustíveis fósseis.

De acordo com Galbiatti (2010), uma das alternativas tecnológicas para geração de novas opções de energia é o aproveitamento da biomassa. Entre as principais vantagens desse sistema, a geração do biogás e de biofertilizantes, produtos com um alto valor agregado, além dos ganhos ambientais.

### **3.5 Energia de biomassa/ biogás**

O biogás é gerado através de processos de biodigestão anaeróbia de materiais orgânicos, esse biogás é composto especialmente pelo metano, que é um gás com grande poder calorífico e com grande potencial para produção de energia. Em seguida serão descritas as etapas, as condições, os modelos de biodigestores e outras informações acerca do processo de biodigestão (BEN, 2013).

### 3.5.1 Biodigestão anaeróbia

De acordo com Chernicharo (2007), os reatores anaeróbios podem ser utilizados para tratamento de diversos tipos de materiais ou efluentes, neles ocorrem degradação de matéria orgânica através de microrganismos (bactérias), na ausência de oxigênio. Os produtos finais do processo anaeróbio são o biogás e o fertilizante.

Pode-se definir o biogás como uma mistura de gases, composta principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e outros em menor quantidade.

Já o biofertilizante pode-se definir como matéria orgânica decomposta, nas formas sólida, líquida ou pastosa. Esse material pode ser enviado para incorporação no solo de forma controlada, pois contém nutrientes importantes para melhoria das condições do mesmo (CHERNICHARO, 2007).

Para Chernicharo (2007) e Gomez ([200-]), a bioquímica do processo de biodigestão anaeróbia divide-se principalmente nas quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme pode ser observado na figura 3.

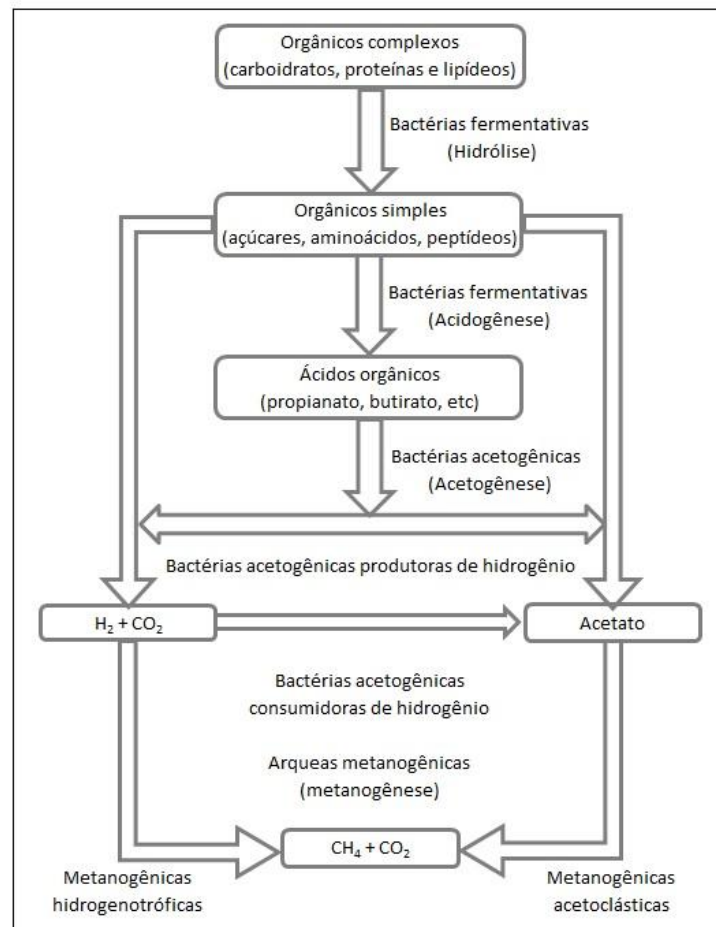


Figura 3 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (2007)

Ainda de acordo com Chernicharo (2007), os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três grupos de bactérias: fermentativas, acetogênicas e metanogênicas. Cada um desses grupos é responsável pela concretização das fases do processo de biodigestão.

### 3.5.1.1 Hidrólise

A hidrólise é a fase em que ocorre a conversão de materiais particulados complexos em materiais dissolvidos, com um menor peso molecular. Esse processo ocorre através da atuação de bactérias fermentativas, que converte proteínas,

lipídios, amidos (materiais complexos) em aminoácidos, monossacarídeos, dissacarídeos, ou seja, em compostos solúveis (CHERNICHARO, 2007; VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994 apud SILVA, 2009).

Como esse é um processo de quebra de moléculas, é um processo lento, podendo demorar de horas, a dias para que ocorra por completo, variando conforme o tempo de retenção.

#### 3.5.1.2 Acidogênese

Segundo Chernicharo (2007) e Gomez ([200-]) na acidogênese ocorre a continuação da quebra de moléculas, também através de bactérias fermentativas. Essa etapa acaba transformando os materiais dissolvidos em ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico e compostos minerais como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Nessa etapa ocorre a eliminação total do oxigênio, não restando nenhum traço de  $\text{O}_2$ , já que o mesmo pode ser tóxico para o sistema caso não seja removido.

#### 3.5.1.3 Acetogênese

A fase de acetogênese é uma etapa importante do processo, pois é reguladora do mesmo, permitindo a transformação dos produtos da acidogênese em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Essa fase é realizada para atuação da bactérias acetogênicas (produtoras de hidrogênio) e acabam reduzindo o pH do meio e também minimizando a demanda química de oxigênio (DQO) do substrato. A etapa serve também como preparação para que as bactérias metanogênicas possam atuar (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994 apud SILVA, 2009).



#### 3.5.1.4 Metanogênese

De acordo com Chernicharo (2007), a metanogênese é a etapa final de oxidação dos substratos, nela ocorre o consumo principalmente do hidrogênio ainda presente nos substratos. Os ácidos orgânicos simples são transformados em metano, dióxido de carbono e água.

Nessa etapa se faz necessário o controle da temperatura do substrato, pois com uma temperatura muito baixa, pode ocorrer a inibição do processo ou diminuir a velocidade do mesmo. Dessa forma, essa etapa ajuda a determinar a velocidade do processo de biodigestão. O maior precursor do metano é o ácido acético, já que mais de 70% dele provém desse ácido (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994 apud SILVA, 2009).

Os principais responsáveis pela efetiva mineralização, transformando orgânicos de pequena cadeia, contendo em geral, um ou dois átomos de carbono em metano e gás carbônico ou produzindo metano e água a partir de hidrogênio e gás carbônico são as arqueas metanogênicas. Em função dos substratos utilizados (acetato ou hidrogênio/gás carbônico), as metanogênicas são classificadas em acetotróficas e hidrogenotróficas (SANT'ANNA, 2010).

Ainda de acordo com Sant'Anna (2010), a diversidade morfológica das metanogênicas é muito grande (cocos, bastonetes, cocos irregulares, bastonetes longos e filamentos). Apresentam também variedade quanto a composição química de suas paredes celulares. Os gêneros mais comuns encontrados em digestores anaeróbios são *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacteres*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum*, *Methanosaeta*.

#### 3.5.2 Condições necessárias para geração de biogás

Algumas condições são indispensáveis para que possa ocorrer a biodigestão anaeróbia, tanto em escala real como em estudos laboratoriais. Sem essas condições mínimas o processo tende a diminuir sua eficiência e, inclusive chegar ao ponto de não ocorrer a geração de biogás, o que inviabilizaria todo o projeto para geração de energia através da biomassa.

Como os micro-organismos produtores de biogás são anaeróbios, a condição primordial para que ocorra o processo de degradação por via anaeróbia é a ausência de oxigênio. Caso haja contato com oxigênio, a decomposição da matéria orgânica somente resultará em dióxido de carbono.

Entre os principais parâmetros de controle e que afetam os processos anaeróbios, pode-se citar algumas características (condições) físicas, químicas e biológicas, como por exemplo a temperatura, pH, sólidos, alcalinidade, composição do substrato (CHERNICHARO, 2007; KUNZ, 2014; MERCADO, 2010).

#### 3.5.2.1 Temperatura

De acordo com Mota (2003) e Richter e Netto (2007), a temperatura é a medida de intensidade de calor, sendo considerado um importante parâmetro, pois influencia diretamente nas propriedades da água e seu aumento provoca alterações, acelerando reações químicas, reduzindo a solubilidade dos gases e acentuando as sensações de sabor e odor.

Para um processo de biodigestão, segundo Szymanski (2008), ocorrendo variações bruscas de temperatura, acima de 5°C, acontece uma inibição da atividade microbiológica. De forma geral, temperaturas mais elevadas aceleram os processos e as reações microbiológicas dentro de um biodigestor.

Segundo Chernicharo (2007), considera-se como temperatura ideal num processo de biodigestão, 35°C para a fase mesofílica e na termofílica 50°C, adotando-se a fase mesofílica como a mais eficiente e estável para a atividade metanogênica.

#### 3.5.2.2 pH

É o potencial hidrogeniônico e representa o equilíbrio entre os íons  $H^+$  e os íons  $OH^-$ . Sua variação é expressa em uma escala de 0 a 14, sendo considerada

uma água ácida a que possui pH abaixo de 7, neutra quando apresenta pH igual a 7 e alcalina quando tem pH acima de 7.

Para Richter (2007), o pH pode ser medido pelo método colorimétrico, porém sua utilização fica difícil quando houver uma água turva ou colorida, sendo assim, necessária a utilização de um método mais preciso – os peagômetros, que são equipamentos com um eletrodo que consegue medir o pH sem a interferência de cor ou turbidez.

A faixa de pH considerada ideal para as bactérias que realizam o processo anaeróbio é entre 6 a 8. Para alguns autores, o ponto ótimo para que ocorram as reações seria o pH 7,2. De forma geral, caso o processo anaeróbio ocorra sem anormalidades, naturalmente o pH tende a se manter próximo da neutralidade (COMASTRI FILHO, 1981; CHERNICHARO, 2007).

### 3.5.2.3 Sólidos

Conforme Metcalf & Eddy (2003) e Piveli e Kato (2005), sólidos correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação com a temperatura e o tempo previamente estabelecido, dessa forma consegue-se definir as diferentes frações de sólidos existentes no substrato. O teste padrão para sólidos sedimentáveis é realizado no Cone de Imhoff e consiste na colocação de uma amostra do efluente em um cone e, após um período de tempo, geralmente uma hora, avalia-se o volume de sólidos sedimentáveis presentes através da altura em que os sólidos se encontram no cone.

Para Piveli e Kato (2005), os sólidos são divididos em: sólidos totais (ST), sólidos em suspensão ou suspensos (SS), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF) e sólidos sedimentáveis (SSed).

Ainda de acordo com Metcalf & Eddy (2003), normalmente, cerca de 60% dos sólidos em suspensão em um efluente doméstico são sedimentáveis. Os sólidos totais podem ser obtidos por evaporação de uma amostra de efluente até sua secagem e a posterior medição de sua massa.

A concentração de sólidos voláteis de um substrato também é um fator determinante para a geração do biogás, sendo que, quanto maior a concentração de sólidos na biomassa, maior será a geração de biogás (KONRAD, 2010).

Segundo Comastri Filho (1981), é recomendado o mínimo de 120g de sólidos voláteis por kg de matéria seca para que o processo anaeróbio ocorra de forma adequada.

#### 3.5.2.4 Alcalinidade

Para Piveli (2005) a alcalinidade de uma amostra é definida como a capacidade dela reagir quantitativamente com um ácido forte, até atingir um valor definido de pH. Seus principais componentes são os sais do ácido carbônico (bicarbonatos e carbonatos) e os hidróxidos.

A alcalinidade é uma medida do poder tampão do biodigestor, sendo definida como a resistência para as alterações de pH que poderiam ocorrer durante o processo. Em um reator anaeróbio, a alcalinidade é gerada devido as reações como amonificação, perdendo assim acidez. Porém no momento que ocorre a metanogênese, acontece a remoção do ácido acético, aumentando assim também a alcalinidade (VAN HAANDEL & LEETINGA, 1994 apud MERCADO, 2010).

Segundo Kunz (2014), com a produção de ácidos e dióxido de carbono pelas ação das bactérias, ocorre a redução do pH, dessa forma o carbonato/bicarbonato irá consumir os ácidos, evitando a grande variação do pH. Quando existe grande quantidade de ácidos voláteis, eles são neutralizados pela alcalinidade do bicarbonato. De outra maneira, quando os ácidos voláteis diminuem, a alcalinidade total é semelhante a alcalinidade em bicarbonato.

#### 3.5.2.5 Composição e concentração do substrato

Para facilitar a degradação dos materiais em um biodigestor, é importante que sejam incorporados, preferencialmente, materiais orgânicos, que podem ser

degradados mais facilmente e gerar uma quantidade maior de metano, entre essas substâncias pode-se citar: as proteínas, os carboidratos e lipídios. Já substâncias de difícil degradabilidade podem atrapalhar ou até mesmo inibir os processos anaeróbios. Algumas substâncias que podem impedir o processo são a celulose, a lignina, entre outros compostos artificiais (KUNZ, 2014).

Em relação a carga nutricional do substrato, tem-se como relação ideal de 30 a 43:1 na relação carbono/nitrogênio (C/N), sabendo que quanto menor a relação C/N, maior a produção de biogás (SZYMANSKI, 2008).

Comastri Filho (1981) reforça que a relação de C/N ideal para uma grande produção de biogás é de 30:1.

### 3.5.3 Composição do biogás

Como mencionado anteriormente, o biogás é uma mistura gasosa de caráter combustível. Naturalmente ele pode ser encontrado em pântanos, mangues, rios e lagos e sua concentração nesses locais é bastante variável, mas de difícil controle e utilização. O biogás é um gás incolor e que, se queimado, produz uma chama azul-clara e que não deixa fuligem (COMASTRI FILHO, 1981; DEGANUTTI, 2002).

De acordo com Galbiatti (2010) e Comastri Filho (1981), essa mistura é bastante variável e pode ser influenciada pelos fatores determinantes para o processo de biodigestão, assim o biogás poderá conter de 40 a 80% de metano.

Conforme Torres (2012), a composição do biogás pode ser representada segundo o quadro 1.

Quadro 1 – Composição básica do biogás gerado em biodigestor.

Composto	% na Mistura
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 75%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 40%
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1 a 3%
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0,5 a 2,5%
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1 a 1%
Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 a 0,5%
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,1 a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1%
Água (H <sub>2</sub> O)	Variável

Fonte: Torres (2012)

### 3.5.4 Purificação do biogás

A presença de diferentes gases no biogás pode-se tornar um grande limitador do uso do biogás, já que o gás passível de ser utilizado como geração de energia é o metano (CH<sub>4</sub>).

Segundo Comastri Filho (1981), o metano, que é o principal gás na composição do biogás, é o hidrocarboneto mais simples da série dos etanos, é acíclico, saturado, possui densidade de 0,55, peso molecular de 16,04 e é formado pela composição de uma molécula de carbono e quatro de hidrogênio. Naturalmente ele é incolor, inodoro e sob condições normais de temperatura encontra-se em estado gasoso.

Para Avaci (2013) e Mercado (2010), o gás metano contribui de forma mais intensa, cerca de 21 vezes mais, do que o dióxido de carbono para o efeito estufa, por isso apresenta-se outra necessidade de uso do metano a fim de evitar o impacto desta formação.

Especialmente com a remoção o ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), tem-se a purificação do biogás, melhorando assim as possibilidades de uso e aumentando a vida útil dos equipamentos onde o biogás será utilizado (MERCADO, 2010). Para o homem, o

H<sub>2</sub>S pode causar irritações nos olhos e nariz, convulsões e até a morte, caso haja uma grande exposição ao gás (BLEY JR., C. et al., 2009).

Segundo Szymanski (2008), uma metodologia para remoção principalmente de H<sub>2</sub>S é o uso de limalha de ferro oxidado, que ao entrar em contato com o H<sub>2</sub>S gera o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Existe também a necessidade de remoção de CO<sub>2</sub>, com isso ocorre naturalmente o aumento da concentração do metano, aumentando assim também o poder calorífico do biogás (PRICE; CHEREMISINOFF, 1995 apud FRARE et al., 2009).

De acordo com Silva (2009), existem diversas maneiras de realizar a remoção desses componentes prejudiciais ao biogás, visando somente a obtenção do metano purificado. Entre as opções se pode citar:

- Purificação por membrana;
- *Water scrubbing*;
- *Pressure Swing Adsorption* (PSA);
- Tecnologia criogênica;
- Processo CO<sub>2</sub> wash;

Segundo Mercado (2010), existem diversas substâncias que precisam ser removidas do biogás, para que o metano possa ser utilizado de forma mais eficaz. No quadro 2, são apresentadas as principais substâncias que precisam ser removidas e as possíveis metodologias e técnicas utilizadas para a purificação do biogás.

Quadro 2 – Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Impureza	Descrição	Detalhes
Umidade	Adsorção	Sílica Gel
		Peneira Molecular
		Alumina
	Absorção	Etilenoglicol (temperatura a - 6,7°C)
		Selexol
Refrigeração	Resfriamento a 6°C	
Hidrocarbonetos	Adsorção	Carvão Ativado
	Absorção	Óleo leve
		Etileno Glicol e Selexol
Combinação	Refrigeração com Etileno Glicol e adsorção em carvão ativado	
Impureza	Descrição	Detalhes
CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> S	Absorção	Solventes orgânicos
	Absorção	Selexol
		Fluor
		Rectisol
		Soluções de Sais Alcalinos
		Potássio quente e Potássio inibido
		Alcalonaminas
		Mono, di-tri-etanol amina
		Deglicolamina
		Água (contra corrente ao gás)
		Soluções Aquosas (Alcalonamina)
	Urcarsol-CR	
	Adsorção	Peneiras moleculares
		Óxido de ferro
		Carvão ativado
Separação por membranas	Membrana de fibra oca	

Fonte: Adaptado de Mercado (2010)



### 3.5.5 Modelos de biodigestores

Segundo Deganutti (2002) o biodigestor é uma câmara fechada, onde pode ser colocado o resíduo orgânico e na qual ocorrerá a decomposição desse material (processo de degradação anaeróbia). Existem diversos modelos de biodigestores, quanto maior o nível tecnológico dos biodigestores, maior será a eficiência no processo e conseqüentemente, na geração de metano para uso como energia. Os modelos apresentados são os que seguem descritos a seguir.

Para Gomez ([200-]), os biodigestores podem ser construídos tanto na horizontal como na vertical, variando devido a razões técnicas e econômicas. De acordo com a sua disposição, deverão ser avaliados os sistemas de agitação e controle e manutenção da temperatura.

#### 3.5.5.1 Modelo indiano

O biodigestor de modelo indiano é instalado abaixo do nível do solo, portanto é necessário um grande cuidado para evitar vazamentos e contaminações do lençol freático ou do solo (BRONDANI, 2010; DEGANUTTI, 2002).

Esse modelo acaba utilizando a baixa variação de temperatura no solo, para auxiliar na melhoria das condições do processo, favorecendo e agilizando assim a degradação dos materiais orgânicos. Como premissa básica, ele possui uma parede divisória no meio, fazendo com que o substrato circule por todo o compartimento, possui uma campânula como gasômetro. A figura 4 representa em vista frontal o biodigestor modelo indiano, porém sem as medidas indicativas.

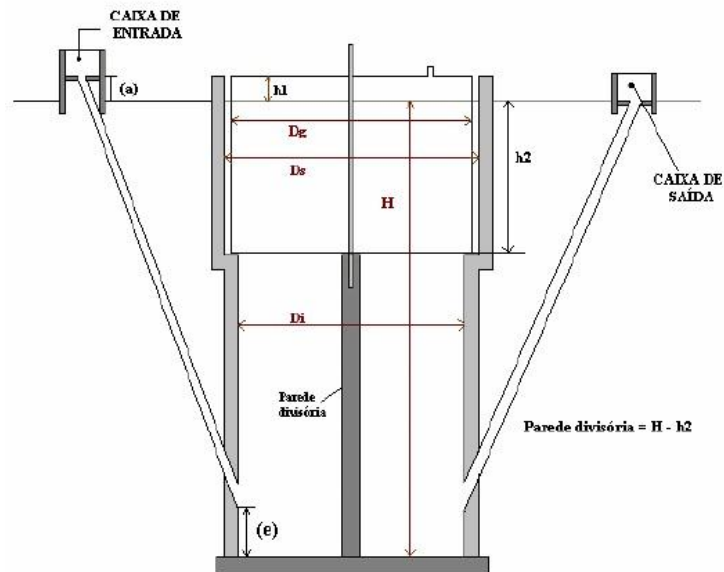


Figura 4 – Biodigestor modelo indiano

Fonte: DEGANUTTI (2002)

### 3.5.5.2 Modelo chinês

Segundo Deganutti (2002) e Kuntz (2014), o biodigestor modelo chinês é formado por uma câmara cilíndrica, geralmente construída em alvenaria, que possui um espaço na parte superior destinado ao armazenamento do biogás. Da mesma forma que o modelo indiano, ele geralmente é construído abaixo do nível do solo, o que auxilia no controle da temperatura.

O sistema funciona automaticamente, já que quando houver o aumento da pressão interna, em função do biogás, o substrato líquido se deslocará para a câmara de saída. Caso ocorra uma descompressão, o sistema também ocorre no sentido contrário, com o substrato retornando para a câmara central de biodigestão. Pode-se verificar um modelo de biodigestor chinês na figura 5.

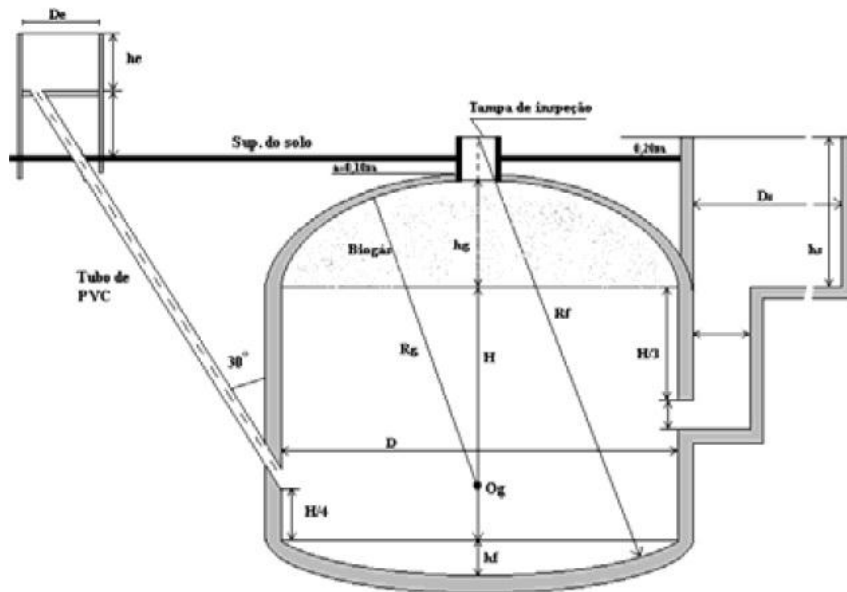


Figura 5 – Biodigestor modelo chinês

Fonte: DEGANUTTI (2002)

### 3.5.5.3 Modelo lagoa coberta

Esse é o modelo de biodigestor mais fácil de ser encontrado em sistemas de produção agropecuária com geração de dejetos em grande quantidade, pelo fato do biodigestor ser usualmente instalado sobre as esterqueiras de armazenamento dos dejetos animais, servindo o biodigestor como o armazenamento do biogás gerado (BRONDANI, 2010).

De acordo com Kunz (2014), o modelo também é conhecido como modelo canadense ou da marinha e são instalados pela facilidade de manuseio e custo da geomembrana que enclausura os dejetos e evita seu contato com o solo. Na figura 6 pode ser visualizado o biodigestor instalado em uma granja produtora de leitões, pertencente a empresa onde foi realizada a pesquisa.



Figura 6 – Biodigestor modelo lagoa coberta

Nas últimas décadas aumentou a procura por esse modelo de biodigestores em função da venda de créditos de carbono, que pode viabilizar o retorno do dinheiro investido pelo produtor na instalação desses biodigestores (KUNZ, 2014).

#### 3.5.5.4 Reatores tipo UASB

A principal característica dos reatores anaeróbios do tipo UASB (Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo) é o fluxo ascendente dos substratos em seu interior. Eles podem ser construídos em diversos materiais (inox, alumínio, alvenaria) (KUNZ, 2014).

Segunda Kunz (2014), um dos problemas desse modelo de biodigestor é a dificuldade para tratamento de materiais muito sólidos, portanto é necessário que o substrato esteja bem líquido para que haja um bom rendimento no processo.

Na figura 7 pode ser visualizado um reator do tipo UASB, com os detalhes de seu funcionamento interno.

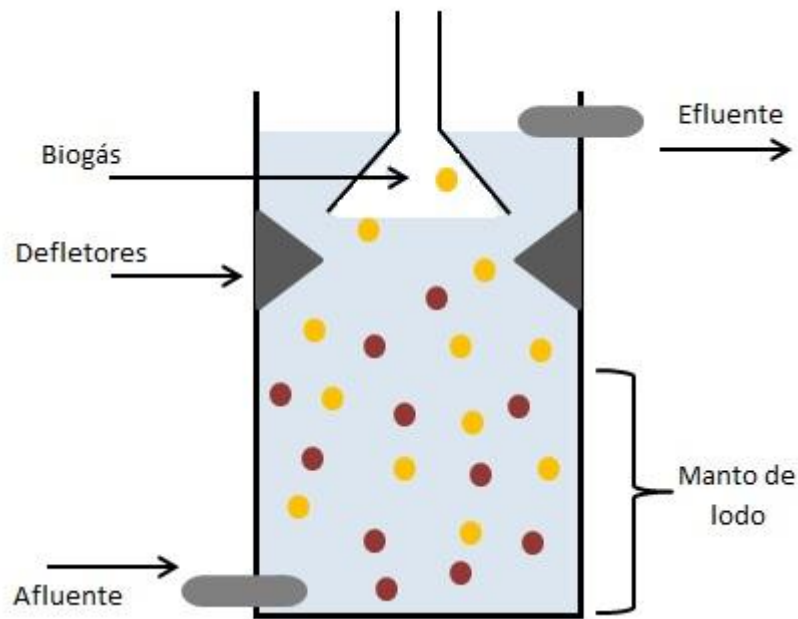


Figura 7 – Reator UASB com detalhe de seu funcionamento interno.

Fonte: Adaptado de KUNZ (2014)

### 3.5.5.5 Biodigestores de alto rendimento

Esse tipo de biodigestores, como bem diz o nome, são desenvolvidos para o alto rendimento na geração de biogás. Utilizam alta tecnologia e com isso podem controlar de forma mais confiável os parâmetros que interferem no processo de biodigestão anaeróbia.

Segundo Kunz (2014), o modelo de alto rendimento é geralmente encontrado em países desenvolvidos, principalmente Alemanha, Áustria e Dinamarca, onde são utilizados tanto em propriedades rurais para geração de energia elétrica para pequenos produtores, como em grandes centros para geração de energia térmica para a população.

A figura 8 mostra um biodigestor modelo de alto rendimento, instalado na cidade de Ramstein, na Alemanha, o mesmo é utilizado para geração de energia térmica para um bairro da cidade e o substrato utilizado é a silagem, com um incremento de dejetos bovinos.



Figura 8 – Biodigestor de alto rendimento

### 3.5.6 Vantagens da aplicação do biodigestor

Segundo Chernicharo (2007) e Cassini (2003) a degradação anaeróbia é um processo fermentativo e oxidativo, que só acontece na ausência de oxigênio. As principais vantagens de processos anaeróbios são: a baixa produção de sólidos, diferente de um sistema aeróbio; possibilidade de aplicação em pequena ou grande escala; baixa necessidade de área; custo de operação relativamente baixo em função da pouca energia necessária no sistema; suporte de grandes variações de cargas orgânicas; mediante controle adequado, pode ocorrer redução de odores; facilidade operacional e a produção do biogás, que pode, através do metano, servir como fonte de energia devido ao seu grande poder calorífico.

Para Orrico Junior (2010), as vantagens desse sistema são principalmente a diminuição de odores e de microrganismos patogênicos, a ocupação de menores áreas para o tratamento dos resíduos e a liberação dos gases e efluentes é facilmente controlada.

Pode-se acrescentar como benefício a alta redução da DBO, o que minimiza os impactos em recursos hídricos ou diretamente no solo (BRONDANI, 2010).

De acordo com Mercado (2010), algumas das vantagens da aplicação do biodigestor são os benefícios com o controle de emissões de gases de efeito estufa, benefícios energéticos de diversas maneiras, benefícios para o meio ambiente com o controle da poluição, benefícios no tratamento de resíduos e todos esses fatores levam a uma vantagem econômica no final do processo.

### 3.5.7 Desvantagens da aplicação do biodigestor

Segundo Chernicharo (2007), apesar de ser bastante vantajoso em diversos aspectos, o sistema anaeróbio também apresenta algumas desvantagens, entre elas pode-se citar: a variabilidade na produção do biogás; a partida do processo pode ser lenta em caso de ausência de inóculo adaptado; custo inicial de instalação alto; as bactérias anaeróbias são bastante suscetíveis à inibição por variados tipos de compostos; dificuldade no armazenamento do biogás gerado e a microbiologia da biodigestão anaeróbia ainda é muito complexa e necessita de maiores estudos.

Já para Jorge (2004), as desvantagens do biodigestor são a adequação de mão de obra especializada para operação do biodigestor, dificuldade do armazenamento do biogás e também do biofertilizante e a localização do mesmo, já que muitas pessoas não aceitariam a instalação de um biodigestor próximo as suas residências e essa situação nem é possível de ser concretizada em centros urbanos, sendo necessário assim, o transporte do biogás, do substrato e do biofertilizante.

## 3.6 Utilização do biogás como energia

O metano pode ser utilizado como energia nas mais diversas formas, sendo transformado em energia elétrica, mecânica ou térmica. De acordo com Brondani (2010), o metano pode ser utilizado no aquecimento de animais (principalmente na produção de suínos). Também pode ser utilizado na geração de energia elétrica, como substituto ao gás liquefeito de petróleo (GLP) - utilizado como gás de cozinha

e até mesmo na obtenção de créditos de carbono, mediante projeto de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo).

De acordo com Kunz (2014), turbinas a gás, motores de combustão, geradores de energia elétrica, queima como fonte de energia térmica, queima como substituto ao gás de cozinha são algumas das opções de uso do biogás como energia.

O poder calorífico do metano, segundo Konrad (2010) é estimado em 5.000 a 6.000 kcal/m<sup>3</sup>, podendo variar em relação a sua pureza. Quanto mais puro o metano, maior será seu poder calorífico, podendo chegar até 12.000 kcal/m<sup>3</sup>.

O poder calorífico do metano em comparação com outras substâncias pode ser verificado no quadro 3.

Quadro 3 – Comparação do poder calorífico do biogás.

Combustível	Biogás	Metano	Álcool
Quantidade	1m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>	1litro
Calor liberado KJ	23.400	36.000	19.812
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	1,2	0,72	809
Poder calorífico (KJ/kg)	19.500	50.000	24.490

Fonte: SILVA E LUCAS JR. (1992) apud KUNZ (2014).

Ainda em relação aos benefícios do biogás, o quadro 4, apresenta a equivalência entre o biogás e outras fontes de energia.

Quadro 4 – Equivalência entre o biogás e outros combustíveis

Combustíveis	1m <sup>3</sup> de biogás equivale a
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,579 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás de cozinha (GLP)	0,454 litros
Lenha	1,536 Kg
Álcool hidratado	0,790 litros
Elettricidade	1,428 Kw

Fonte: Adaptado de BRONDANI (2010)



### 3.7 Utilização do biofertilizante

Além da geração do biogás, outro grande benefício dos sistemas de biodigestão anaeróbia é a geração do biofertilizante.

Segundo Galbiatti (2010), o biofertilizante tem sido utilizado na agricultura orgânica, substituindo os fertilizantes sintéticos ou minerais, dessa forma é possível manter o equilíbrio nutricional de plantas e tornar as mesmas mais resistentes ao ataque de pragas.

A disposição do biofertilizante no solo adiciona uma série de substâncias que podem alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo assim afetar de forma positiva, como também negativa em caso de um manejo e disposição inadequada. No caso de uma aplicação de forma adequada do biofertilizante, os nutrientes presentes no material podem aumentar a fertilidade do solo, também em virtude da matéria orgânica adicionada com a formação do húmus (SILVA, 2012).

Para Comastri Filho (1981), o biofertilizante funciona como um corretor da acidez do solo, possui um pH em torno de 7,5, podendo até minimizar os problemas de alumínio e ferro no solo. O mesmo pode ser aplicado no solo diretamente na forma líquida ou desidratado, variando conforme o tipo de solo.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

Neste item são apresentadas as metodologias utilizadas no desenvolvimento da pesquisa, a fim de atingir os objetivos propostos. O trabalho foi realizado com recursos provenientes de uma pesquisa contratada por uma empresa, localizada no interior do estado do Rio Grande do Sul. O estudo visou avaliar o potencial para instalação de um biodigestor anaeróbio, com a finalidade de geração de energia e ganhos ambientais com a melhor destinação de seus resíduos.

### **4.1 Realização do experimento**

O experimento foi realizado no laboratório de Biorreatores do Centro Universitário UNIVATES, localizado na cidade de Lajeado - RS. O período para realização das avaliações foi de novembro de 2013 a dezembro de 2014.

De acordo com metodologia de Backes (2011) e Konrad (2013), o equipamento que foi utilizado para quantificação do biogás gerado no processo, foi projetado pelo laboratório de Biorreatores. O substrato a ser analisado foi incorporado em frascos (reatores) de um litro cada, que foram preenchidos com 600 mL de material (exceto as amostras de inóculo), e foram mantidos em estufa sob controle de temperatura a 35°C, conforme pode ser visualizado na figura 9.



Figura 9 – Estufa e sistema de medição do biogás

A quantificação do biogás gerado no processo anaeróbio foi realizada em um aparelho desenvolvido pelo laboratório de Biorreatores, em escala de bancada e em processos por batelada. Utilizando um coletor de biogás, constituído por um tubo em forma de U, um sensor óptico, uma esfera de isopor e para o cálculo do volume, um circuito eletrônico que registra a quantidade de biogás que passou pelo sistema. A operação do equipamento se dá através do deslocamento do fluido contido no interior do tubo em formato de U. Na medida em que o biogás enche o tubo, ocorre o deslocamento do fluido (água) que se encontra no interior do mesmo, elevando assim o fluido no lado oposto, assim ativando o sensor óptico, que envia a informação para o circuito elétrico. A quantificação do biogás gerado é expressa através da equação dos gases ideais, que descreve a relação entre temperatura, pressão e o volume de um gás (KONRAD, 2010; KONRAD, 2014). Tal sistema pode ser visualizado na figura 10.

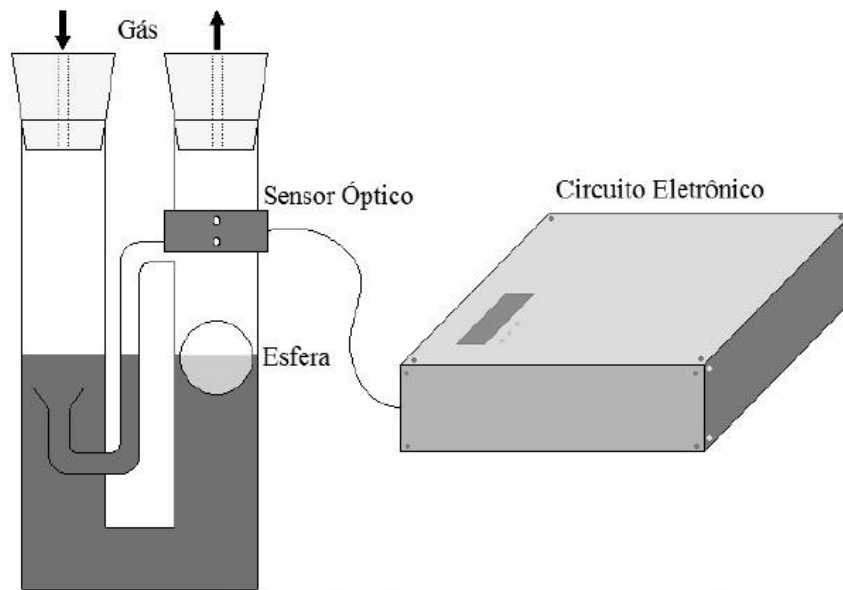


Figura 10 – Sistema de medição para quantificar o biogás

Fonte: BACKES (2011)

Foi quantificado o total de biogás gerado em cada processo por batelada e também mensurado a quantificação de metano gerado. De acordo com a metodologia de Konrad (2013), a quantificação do metano é realizada através da injeção do biogás gerado no processo, em um sensor específico para tal finalidade, denominado Advanced Gasmeter, construído pela empresa PRONOVA Analysetechnik GmbH & Co, conforme pode ser visualizado na figura 11.



Figura 11 – Sensor específico para medir a concentração de gás metano

Fonte: KONRAD (2013)

#### 4.2 Quantificação do substrato gerado

Junto a empresa na qual foi realizado o trabalho, efetuou-se uma investigação e levantamento da quantidade de material (lodos, dejetos, sangue e gordura), passíveis de serem utilizados como substrato no sistema de biodigestão e que são produzidos em todas as unidades industriais da mesma e também nos produtores primários, que geram esse tipo de material.

A quantificação do material deu-se através da análise dos relatórios mensais de destinação de resíduos, enviados pelas unidades industriais, para os órgãos de controle ambiental. Com as informações dos balanços mensais, realizou-se a média estimada de geração por mês, durante o período do estudo (doze meses).

#### 4.3 Elaboração do experimento 1

O experimento 1 teve início no dia 28 de novembro de 2013 e finalizou no dia 17 de dezembro do mesmo ano. Os substratos foram coletados na estação de

tratamento de efluentes da indústria de laticínios, frigorífico de suínos e aves e em uma propriedade com produção de suínos, no sistema de terminação.

O experimento foi realizado no Laboratório de Biorreatores da UNIVATES, com 26 reatores de escala laboratorial, os quais foram separados em oito triplicatas com amostras diferentes e uma duplicata com inóculo, ou seja, a amostra controle. O inóculo foi coletado em um reator anaeróbio de indústria alimentícia da região e somente foi utilizado para verificar se causaria ou não interferência na geração de biogás da mistura dos substratos.

As amostras de 2 a 7 foram realizadas com a mesma proporção de dejetos suínos, para identificar a produção de biogás individual de cada substrato, já na amostra 9 realizou-se a mistura de todos os substratos, em proporções conforme a quantidade estimada de material disponível nas unidades da empresa, com a mesma proporção inicial de dejetos suínos.

**Amostra 1:** 30% (180 mL) de inóculo (lodo anaeróbio de reator UASB da ETE de indústria alimentícia);

**Amostra 2:** 30% (180 mL) de inóculo e 70% (420 mL) de dejetos suínos;

**Amostra 3:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos e 12% (72 mL) de lodo flotado do frigorífico de suínos;

**Amostra 4:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos e 12% (72 mL) de lodo ativado do frigorífico de suínos;

**Amostra 5:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos e 12% (72 mL) de lodo flotado de laticínios;

**Amostra 6:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos e 12% (72 mL) de lodo ativado de laticínios;

**Amostra 7:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos e 12% (72 mL) de lodo flotado do frigorífico de aves;

**Amostra 8:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos e 12% (72 mL) de lodo ativado do frigorífico de aves;

**Amostra 9:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suínos, 2% (12 mL) de lodo flotado (frigorífico suínos), 2% (12 mL) de lodo ativado (frigorífico suínos), 2% (12 mL) de lodo ativado (laticínios), 2% (12 mL) de lodo flotado (laticínios), 2% (12 mL) de lodo ativado (frigorífico aves) e 2% (12 mL) de lodo flotado (frigorífico aves).

#### 4.4 Elaboração do experimento 2

A coleta e início do experimento 2 se deram no dia 20 de janeiro de 2014, sendo finalizado no dia 16 de março do mesmo ano. Os substratos utilizados neste experimento foram: dejetos suíno, sangue e tripa, sendo coletados, respectivamente, numa propriedade com produção de suínos e no frigorífico de aves.

No experimento 2 utilizou-se nove reatores de vidro, com 600 mL de amostra, separados em duas triplicatas com misturas diferentes e uma triplicata com a amostra controle, ou seja, inóculo.

Assim como no experimento 1, realizou-se a mesma proporcionalidade na mistura dos substratos, de acordo com a quantidade estimada de produção dos materiais nas unidades industriais da empresa.

**Amostra 1:** 30% (180 mL) de inóculo (lodo anaeróbico de reator UASB da ETE de indústria alimentícia).

**Amostra 2:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suíno e 12% (72 mL) de sangue.

**Amostra 3:** 30% (180 mL) de inóculo, 58% (348 mL) de dejetos suíno e 12% (72 mL) de tripa celulósica.

#### 4.5 Elaboração do experimento 3

No dia 07 de abril de 2014 teve início a coleta e o experimento 3, sendo o mesmo finalizado no dia 11 de maio do mesmo ano. Na indústria de laticínios foram coletados o lodo flotado e ativado da ETE, no frigorífico de aves foi coletado sangue, tripa celulósica e lodos flotado e ativado. No frigorífico de suínos coletou-se sangue e lodo flotado. O inóculo foi coletado em um reator anaeróbico de indústria alimentícia da região.

No experimento 3 utilizou-se dez reatores de vidro, completos com 600 mL de amostra, onde cinco destes foram preenchidos com uma mistura de lodos, nomeada "Mix", os outros cinco reatores foram supridos com o "Mix" e tripa celulósica. Um reator preenchido com inóculo, foi mantido como amostra controle.

O “Mix” também foi elaborado de acordo com a quantidade estimada de resíduos gerados pelas unidades industriais da empresa.

**Amostra 1:** 30% (180 mL) de inóculo (lodo anaeróbio de reator UASB da ETE de indústria alimentícia).

Tabela 1 – Percentuais utilizados em cada triplicata

Amostra 2			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
70,00%	Mix	26,00%	Lodo flotado suíno
		8,00%	Sangue suíno
		11,50%	Lodo flotado Laticínios
		11,50%	Lodo ativado Laticínios
		32,00%	Lodo ativado+ativado aves
		11,00%	Sangue Aves
Amostra 3			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
10,00%	Tripa celulósica		
60,00%	Mix	26,00%	Lodo flotado suíno
		8,00%	Sangue suíno
		11,50%	Lodo flotado Laticínios
		11,50%	Lodo ativado Laticínios
		32,00%	Lodo ativado+ativado aves
		11,00%	Sangue Aves

#### 4.6 Elaboração do experimento 4

A coleta e o início do experimento 4 foi realizada no dia 21 de maio de 2014, com fim no dia 08 de julho do mesmo ano. Os substratos utilizados foram: lodo flotado e sangue do frigorífico de suínos, lodo flotado e ativado da indústria de laticínios, lodo flotado, ativado, tripa e sangue do frigorífico de aves e dejetos suíno da Unidade Produtora de Leitões. Um inóculo foi coletado do reator anaeróbio da empresa de produtos alimentícios (inóculo B) e o outro inóculo foi nomeado “inóculo L”, pois era resultante das sobras do experimento III realizado anteriormente.



Foram utilizados 17 reatores de vidro, com 600 mL de amostra, para realização do experimento IV. Um reator foi preenchido com inóculo B, cinco reatores foram preenchidos com inóculo B e uma mistura de substratos, chamada “Mix”, outros cinco reatores foram suplementados com o inóculo B, “Mix” e 10% de tripa celulósica. A mistura com o “Mix”, complementado pela tripa celulósica, visou verificar o incremento que a tripa celulósica pode alcançar na produção de biogás.

Outro teste realizado foi com o inóculo L, este se constituiu de um reator com inóculo L e cinco reatores com inóculo L misturados com o “Mix”.

**Amostra 1:** 30% (180 mL) inóculo B.

Tabela 2 – Percentuais utilizados em cada triplicata

Amostra 2			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo B		
70,00%	Mix	13,00%	Lodo flotado suíno
		4,00%	Sangue suíno
		5,75%	Lodo flotado Laticínios
		5,75%	Lodo ativado Laticínios
		16,00%	Lodo ativado+ativado aves
		5,50%	Sangue Aves
		50,00%	Dejeto Suíno UPL
Amostra 3			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo B		
10,00%	Tripa celulósica		
60,00%	Mix	13,00%	Lodo flotado suíno
		4,00%	Sangue suíno
		5,75%	Lodo flotado Laticínios
		5,75%	Lodo ativado Laticínios
		16,00%	Lodo ativado+ativado aves
		5,50%	Sangue Aves
		50,00%	Dejeto Suíno

**Amostra 4:** 30% (180 mL) de inóculo L.

Tabela 3 – Percentuais utilizados em cada triplicata

Amostra 5			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
70,00%	Mix	13,00%	Lodo flotado suíno
		4,00%	Sangue suíno
		5,75%	Lodo flotado Laticínios
		5,75%	Lodo ativado Laticínios
		16,00%	Lodo ativado+ativado aves
		5,50%	Sangue Aves
		50,00%	Dejeto Suíno UPL

#### 4.7 Elaboração do experimento 5

A coleta e início do experimento 5 ocorreu no dia 30 de julho de 2014, com conclusão no dia 30 de setembro do mesmo ano. Coletou-se lodo flotado e ativado na indústria de laticínios, lodo flotado e sangue no frigorífico de suínos, lodo flotado, ativado, tripa e sangue do frigorífico de aves e dejeto suíno da Unidade Produtora de Leitões (UPL). O inóculo utilizado foi o inóculo L, referente às sobras do experimento IV, realizado anteriormente.

Utilizou-se 9 reatores de vidro com capacidade de 1L, onde cada reator foi preenchido com 600 mL de amostra. Os reatores foram separados em três triplicatas, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Percentuais utilizados em cada triplicata

Amostra 1 (Controle)			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
70,00%	Mix	13,00%	Lodo flotado suíno
		4,00%	Sangue suíno
		5,75%	Lodo flotado Laticínios
		5,75%	Lodo ativado Laticínios
		16,00%	Lodo ativado+ativado aves
		5,50%	Sangue Aves
		50,00%	Dejeto Suíno UPL
Amostra 2			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
10,00%	Tripa celulósica		
60,00%	Mix	13,00%	Lodo flotado suíno
		4,00%	Sangue suíno
		5,75%	Lodo flotado Laticínios
		5,75%	Lodo ativado Laticínios
		16,00%	Lodo ativado+ativado aves
		5,50%	Sangue Aves
		50,00%	Dejeto Suíno UPL
Amostra 3			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
70,00%	Mix	6,50%	Lodo flotado suíno
		2,00%	Sangue suíno
		3,00%	Lodo flotado Laticínios
		3,00%	Lodo ativado Laticínios
		8,00%	Lodo ativado+ativado aves
		2,50%	Sangue Aves
		75,00%	Dejeto Suíno UPL

Nas amostras 1 e 2, o objetivo foi verificar a geração de biogás com e sem o incremento da tripa celulósica, considerando uma concentração de 50% de dejetos suínos no “Mix”, já na amostra 3, objetivou-se avaliar a geração de biogás com um acréscimo de dejetos suínos, em comparação a amostra 1.

#### **4.8 Elaboração do experimento 6**

A coleta e início do experimento 6 ocorreu no dia 7 de outubro de 2014, sendo que o mesmo foi finalizado dia 27 de novembro do mesmo ano. Coletou-se lodo flotado e ativado nas estações de tratamento de efluentes (ETE) da indústria de laticínios, lodo flotado e sangue no frigorífico de suínos, lodo flotado, ativado, tripa e sangue do frigorífico de aves e dejetos suíno da Unidade Produtora de Leitões (UPL). O inóculo utilizado foi novamente inóculo L, constituído da sobra do experimento V, realizado anteriormente.

Utilizou-se 6 reatores de vidro com capacidade de 1L, onde cada reator foi preenchido com 600 mL de amostra. Os reatores foram separados em três triplicatas, conforme mostrado na tabela 5.

Objetivou-se com essas duas amostras, verificar até que ponto a quantidade de dejetos suíno pode influenciar na geração de biogás, já que na amostra 1 trabalhou-se com 50% do “Mix” composto por dejetos suínos e na amostra 2, com 75% do “Mix” mesclado por dejetos suínos.

Tabela 5 – Percentuais utilizados em cada triplicata

Amostra 1 (Controle)			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
70,00%	Mix	13,00%	Lodo flotado suíno
		4,00%	Sangue suíno
		5,75%	Lodo flotado Laticínios
		5,75%	Lodo ativado Laticínios
		16,00%	Lodo ativado+ativado aves
		5,50%	Sangue Aves
		50,00%	Suíno UPL
Amostra 2			
Porcentagem	Substrato	Porcentagem	Descrição
30,00%	inóculo L		
70,00%	Mix	6,50%	Lodo flotado suíno
		2,00%	Sangue suíno
		3,00%	Lodo flotado Laticínios
		3,00%	Lodo ativado Laticínios
		8,00%	Lodo ativado+ativado aves
		2,50%	Sangue Aves
		75,00%	Suíno UPL

#### 4.9 Análise de sólidos e pH

No próprio laboratório de Biorreatores do Centro Universitário UNIVATES foram realizadas as análises físico-químicas de sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos e pH em todas as misturas de substratos analisadas, a fim de avaliar o comportamento anterior e posterior ao processo anaeróbio.

O pH foi determinado continuamente, com o uso do pHmetro, marca DIGIMED, modelo DM-2P, visando monitorar a fase da digestão anaeróbia.

Para a determinação de sólidos totais, as amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana, previamente calcinados e em seguida pesados para saber o

peso úmido do material. Posteriormente, foram levados à estufa para secagem, marca SP LABOR, modelo SP-400. Na estufa foi utilizada a técnica do calor seco, para eliminar o teor de umidade da amostra. Os cadinhos foram mantidos na estufa sob uma temperatura de 105°C por 24 horas. Após esse período, os mesmos foram colocados em um dessecador até atingirem a temperatura ambiente, na sequência foram pesados para que se pudesse obter o valor do material seco.

O valor dos sólidos voláteis e fixos foi determinado a partir do material seco obtido na determinação de sólidos totais. O material seco foi levado ao forno, tipo mufla, marca SP LABOR, modelo SP-1200, sob a temperatura de 550°C por oito horas. Este equipamento é utilizado no processo de calcinação, que consiste em oxidar as substâncias em determinada amostra. Posteriormente, as amostras foram esfriadas em dessecador e pesadas, obtendo-se assim o peso das cinzas (sólidos fixos) e pela diferença obteve-se o valor de sólidos voláteis.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados neste item os resultados dos seis experimentos realizados com diferentes misturas de substratos provenientes das unidades da empresa em estudo.

### 5.1 Quantificação dos substratos

Com as informações obtidas nos relatórios mensais, foi possível realizar a média das quantidades de materiais gerados pelas unidades da empresa e, com isso, definir as proporções das misturas a serem realizadas. Os valores médios podem ser verificados na tabela 6.

Tabela 6 – Quantificação dos substratos da Cooperativa

Unidade	Material	Quantidade (kg/mês)	
			Total
UPL	Dejetos suínos		1.650.000
Frigorífico de Suínos	Lodo flotado	500.000	
	Lodo ativado	21.000	671.000
	Sangue	150.000	
Laticínios	Lodo flotado		450.000
	Lodo ativado		
Frigorífico de Aves	Lodo flotado		
	Lodo ativado	625.000	857.000
	Gordura		
	Sangue	225.00	
	Tripa celulósica	7.000	

A maior quantidade de material gerado são os dejetos suínos, com isso foi possível trabalhar diferentes possibilidades, utilizando maior ou menor quantidade desse substrato nas misturas. A unidade de abate de Aves é a segunda maior geradora de materiais passíveis de serem utilizados na biodigestão e de lá que provém a tripa celulósica (resíduo de descarte na produção da salsicha), que pode fornecer um incremento na geração de metano. O restante dos materiais pode ser utilizado como substrato, em diferentes concentrações, conforme a porcentagem da sua geração.

Diante dos dados quantitativos apresentados e do conhecimento de logística para transporte do material foram realizadas as misturas dos substratos em diferentes proporções e dessa forma pode-se avaliar a geração de biogás e metano em cada uma das diferentes misturas.

## **5.2 Experimento 1**

### **5.2.1 Amostra 1**

A duplicata 1, refere-se à amostra controle do experimento, pois foi composta apenas pelo inóculo. Esta foi mantida em experimentação durante 6 dias já que, após o terceiro dia a geração de biogás cessou, até mesmo em função de ser somente 180mL de inóculo no reator. O total de biogás acumulado ao final do processo foi de 106,98 mL.

O teor de CH<sub>4</sub> durante os dias de avaliação foi inferior a 50%, com um valor mínimo de 20% e máximo de 35%.

### **5.2.2 Amostra 2**

A triplicata com inóculo e dejetos suínos foi mantida durante 20 dias, a geração de biogás se encerrou após o quarto dia de experimentação, ocorrendo dois picos



durante o décimo quarto e décimo sexto dia. Essa amostra produziu 198,84 mL de biogás, ou seja, 91,86 mL a mais que a amostra 1 (controle).

A concentração de CH<sub>4</sub> durante o período de vinte dias foi inferior a 23%, com mínima de 15,54% no segundo dia e máxima de 22,85% no décimo quarto dia.

### 5.2.3 Amostra 3

A geração de biogás da amostra 3 ocorreu durante os vinte dias de experimento, onde observou-se uma geração de biogás de 1084,87 mL, representando um volume 10 vezes superior ao produzido pela amostra controle.

A porcentagem de CH<sub>4</sub> apresentou valores estáveis variando de 25 a 35%, ocorrendo o maior valor no sétimo e décimo quinto dia e menor valor no segundo dia 24,54%.

### 5.2.4 Amostra 4

A triplicata com 30% de inóculo, 58% de dejetos suíno e 12% de lodo ativado (refrigerado suíno) gerou 219,52 mL de biogás durante os vinte dias de experimentação, apresentando praticamente o dobro de volume gerado em relação a amostra controle. Após o quinto dia houve a paralisação da geração de biogás, voltando a ocorrer alguns picos entre o 9º e o 20º dia de experimento.

A porcentagem de CH<sub>4</sub> presente no biogás variou de 18% a 25%, apresentando o menor valor (18,74%) no oitavo e décimo sexto dia, e maior valor (24,84%) no sétimo e décimo quinto dia.

### 5.2.5 Amostra 5

A amostra 5, permaneceu durante 20 dias de experimentação gerando 272,54 mL de biogás, ou seja, 1,5 vezes a mais que o volume produzido pela amostra controle.

O teor de CH<sub>4</sub> apresentou valores entre 15 e 25%, ocorrendo o maior valor no sétimo e décimo quinto dia 22,51% e menor valor no segundo dia 16,31%.

#### 5.2.6 Amostra 6

A amostra 6 apresentou uma geração de biogás de 204,51 mL, durante vinte dias, isto representou um incremento de 91,16% em relação a amostra controle.

A porcentagem de CH<sub>4</sub> variou de 15% a 20%, apresentando maior valor no quinto e décimo sexto dia 19,84% e menor valor no segundo dia 16,16%.

#### 5.2.7 Amostra 7

A amostra 7 da triplicata com 30% de inóculo, 58% de dejetos suínos e 12% de lodo flotado (refrigerado aves) gerou 611,48 mL de biogás nos 20 dias de experimento, ou seja, 4,7 vezes a mais que o volume produzido pela amostra. Houve geração de biogás até o oitavo dia, em seguida, ocorreram alguns picos entre o 9º e o 19º dia.

A porcentagem de CH<sub>4</sub> variou de 16% a 22%, apresentando o menor valor (16,53%) no oitavo e décimo sexto dia, e maior valor (21,15%) no segundo dia.

#### 5.2.8 Amostra 8

A triplicata com 30% de inóculo, 58% de dejetos suínos e 12% de lodo ativado (refrigerado aves) gerou 316,72 mL de biogás durante vinte dias de experimento, ou seja, 1,96 vezes a mais que o volume produzido pela amostra controle.

A porcentagem de CH<sub>4</sub> variou de 16% a 22%, apresentando o menor valor (16,62%) no oitavo e décimo sexto dia, e maior valor (21,87%) no segundo dia.

### 5.2.9 Amostra 9

A amostra 9 gerou 316,72 ml de biogás durante vinte dias de experimento, ou seja, 2,4 vezes a mais que o volume produzido pela amostra controle.

A porcentagem de CH<sub>4</sub> presente no biogás variou de 21,73% a 35%.

### 5.2.10 Comparação das amostras

Realizou-se uma comparação da quantidade de biogás e metano gerado entre a amostra controle e as oito amostras divididas com substratos diferentes. Como pode ser observado na figura 12, a maior parte da geração de metano e biogás, se deu na amostra 3, com 30% inóculo, 58% dejetos suínos e 12% lodo flotado de frigorífico de suínos.

Conforme mencionado, a amostra controle serviu para verificar que o inóculo está ativo e em condições de produzir o biogás e conseqüentemente o metano. De acordo com Backes (2011), mesmo sendo necessário um período de aclimação das bactérias com o substrato, a geração de biogás ocorre ainda que em menores quantidades.

O objetivo dessas amostras foi de realizar uma avaliação individual da capacidade de geração de biogás, sendo assim, pode-se verificar que o lodo flotado do frigorífico de suínos (amostra 3) e da laticínios (amostra 5) acabaram gerando uma quantidade maior de biogás, se comparado com as outras misturas.

Em todas as amostras do experimento, pode-se verificar também que a concentração de metano no biogás é relativamente baixa, conforme Torres (2012), que menciona que em média o biogás é composto entre 50 a 75% por metano. Tal situação pode ser explicada pela maior produção de CO<sub>2</sub>, em função talvez do oxigênio residual dos processos de tratamento das unidades industriais.

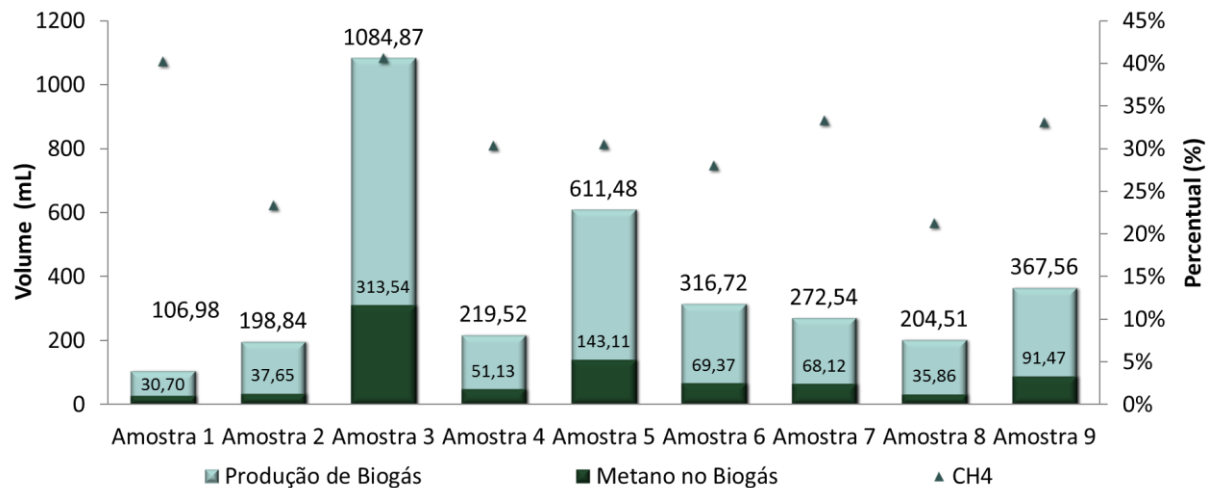


Figura 12 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 1.

### 5.2.11 Análises de sólidos

As análises de sólido totais, fixos e voláteis referentes ao experimento 1 são apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento

	Sólidos início do experimento			Sólidos final do experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Flotado Laticínios	10,83	51,71	48,29	-	-	-
Flotado Aves	7,41	97,80	2,20	-	-	-
Flotado Suínos	4,04	89,05	10,95	-	-	-
Ativado Laticínios	0,42	70,08	29,92	-	-	-
Ativado Aves	1,19	88,17	11,83	-	-	-
Ativado Suínos	20,2	89,01	10,99	-	-	-
Dejeto	2,99	67,48	35,52	-	-	-
Amostra 1	8,31	78,10	21,90	7,43	78,01	21,99

	Sólidos início do experimento			Sólidos final do experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Amostra 2	4,81	73,51	26,49	3,90	67,42	32,58
Amostra 3	4,21	73,57	26,43	3,34	66,28	33,72
Amostra 4	4,15	74,01	25,99	3,29	66,78	33,22
Amostra 5	5,23	68,68	31,32	4,30	66,51	33,49
Amostra 6	3,97	70,01	29,99	3,32	67,75	32,25
Amostra 7	4,60	74,54	25,46	4,42	71,07	28,93
Amostra 8	4,17	72,11	27,89	2,32	67,79	37,21
Amostra 9	3,96	70,20	29,80	3,59	66,98	33,02

### 5.2.12 Avaliação do pH

A avaliação de pH foi realizado no início e no fim de cada experimento para verificar o comportamento desse item durante o processo anaeróbico, pois sabe-se que durante os processos podem ocorrer variações de pH, sendo que os valores neutros ou um pouco básicos são os mais favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela geração do metano. A avaliação do pH pode ser visualizada na tabela 8.

Tabela 8 – Análise de pH no início e fim do experimento

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Flotado Laticínios	7,11	-
Flotado Aves	6,57	-
Flotado Suínos	6,59	-
Ativado Laticínios	7,57	-
Ativado Aves	6,36	-
Ativado Suínos	7,33	-

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Dejeto	7,43	-
Amostra 1	6,82	7,39
Amostra 2	-	7,37
Amostra 3	-	7,42
Amostra 4	-	7,27
Amostra 5	-	7,23
Amostra 6	-	7,31
Amostra 7	-	7,37
Amostra 8	-	7,28
Amostra 9	-	7,31

De forma geral, o pH dos substratos e da mistura dos substratos se apresentaram abaixo do neutro antes do experimento, sendo talvez esse um dos motivos para a baixa presença de metano no biogás, já que segundo Chernicharo (2007), o processo de biodigestão ocorre de forma mais eficaz, com pH neutro ou até alcalino.

### 5.3 Experimento 2

#### 5.3.1 Amostra 1

A triplicata 1 foi mantida durante 4 dias, após o segundo dia apresentou uma queda na geração de biogás, também em função de somente conter 180 mL de inóculo. O volume total de biogás gerado foi de 89,67 mL e o volume de CH<sub>4</sub> foi de 4,65 mL, a porcentagem de metano foi inferior a 5%.

### 5.3.2 Amostra 2

A amostra com inóculo, dejetos suínos e sangue foi mantida durante 56 dias, apresentando variações na produção de biogás, sendo o período de maior produção entre o 17º e 37º dia. A produção total de biogás foi de 2735,46 mL, sendo 1499,40 mL correspondentes ao metano. A porcentagem de CH<sub>4</sub> apresentou um aumento gradativo, atingindo a faixa de 65% a 77% a partir do 33º dia. A maior porcentagem foi de 76,55%, no 52º dia.

### 5.3.3 Amostra 3

A amostra com inóculo, dejetos suínos e tripa celulósica apresentou uma produção de biogás de 599,68 mL, onde o período de maior produção foi do 29º ao 39º dia de experimento e o volume de metano foi de 295,78. Pode-se perceber que não houve produção de biogás nos dias anteriores e posteriores.

A porcentagem de metano presente iniciou muito baixa, e apresentou um aumento crescente nos dias seguintes, chegando ao valor máximo de 73,17%.

### 5.3.4 Comparação das amostras

No fim do processo anaeróbico foi realizada uma comparação entre a amostra controle e as duas amostras, sendo que foi possível perceber no inóculo uma menor produção de biogás e conseqüentemente de metano, sendo que tal situação já era esperada. A amostra com tripa celulósica apresentou uma produção menor de biogás e metano, se comparado com a amostra 1, como pode ser observado na figura 13.

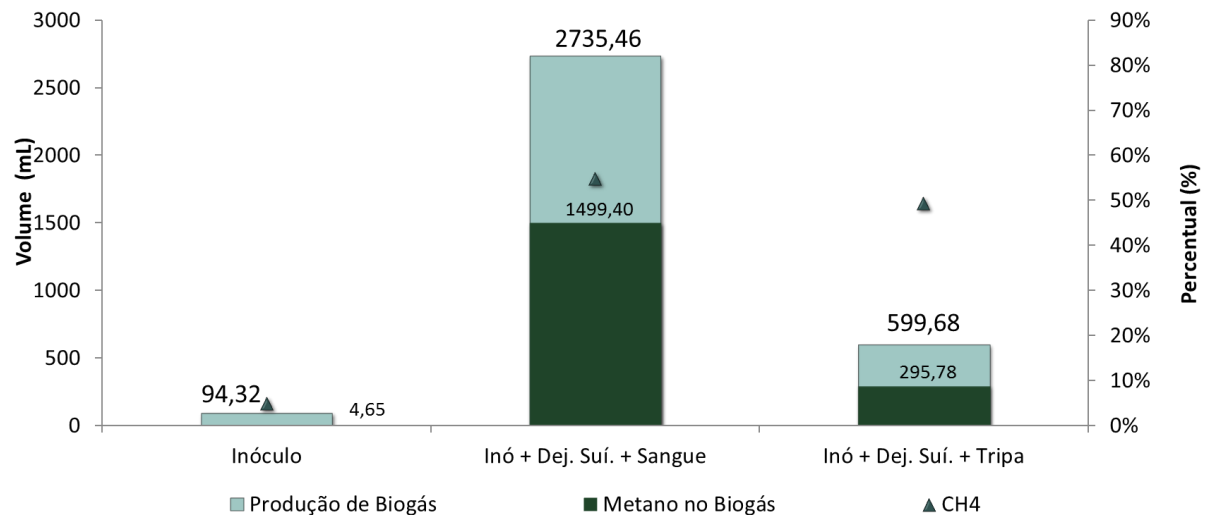


Figura 13 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 2.

Na amostra 2 houve uma produção maior de biogás e metano, muito em função da mistura conter sangue, o que acarretou em um aumento da carga orgânica do substrato e conseqüentemente maior quantidade de alimento para as bactérias. Com um maior tempo de permanência do substrato no reator, possivelmente também houve uma melhor aclimação do substrato para com o processo anaeróbio.

A adição de tripa celulósica, em substituição ao sangue, resultou em uma porcentagem grande de metano presente no biogás, porém a quantidade produzida foi baixa, provavelmente em função da dificuldade de degradação da tripa celulósica. O fato acima ocorreu, pois o material possuía um residual de matéria orgânica, no entanto sua degradação é mais lenta, o que resultou na geração de pouco biogás.

### 5.3.5 Análises de sólidos

A amostra 1 apresentou a maior geração de biogás e metano em relação a amostra com tripa celulósica. As análises de Sólidos Totais (ST), Voláteis (SV) e Fixos (SF) referentes ao Experimento II estão apresentadas na tabela 9.



Tabela 9 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento

	Sólidos Início do Experimento			Sólidos Final do Experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Dejeto	3,11	51,71	25,95	-	-	-
Sangue	7,84	89,89	10,11	-	-	-
Inóculo	2,92	10,86	89,14	-	-	-
Inó.+ Deje.+ Sangue	4,75	71,19	28,81	3,83	61,97	38,03
Inó. + Deje. + Tripa	4,73	66,95	33,05	3,08	60,81	39,19

Com o resultado das análises de ST, realizou-se uma comparação entre as amostras do início e fim do experimento e verificou-se uma redução do parâmetro, comprovando a ocorrência de degradação da matéria orgânica.

### 5.3.6 Avaliação do pH

A análise de pH foi realizada no início e fim do experimento a fim de avaliar o comportamento da amostra, indicando se a mesma ficou ácida, neutra ou básica. Os dados obtidos estão descritos na tabela 10:

Tabela 10 – Análise de pH no início e fim do experimento

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Dejeto	7,91	-
Inóculo	7,3	-
Inó.+ Deje.+ Sangue	7,85	7,99
Inó. + Deje. + Tripa	7,77	7,76

Com o pH acima do neutro, as duas amostras estavam com condições ideais para o processo de biodigestão, porém a justificativa para a diferença na produção de metano e biogás se encaixa com o tempo de degradação de cada um dos materiais nos reatores.

## **5.4 Experimento 3**

### **5.4.1 Amostra 1**

A amostra 1 foi mantida durante 35 dias na incubadora, durante este período não apresentou geração de biogás suficiente que fosse registrada pelo sistema de medição do laboratório, certamente em função de conter somente o inóculo no reator. As medidas do metano indicaram que a porcentagem de CH<sub>4</sub> variou de 1% a 8% durante os vinte primeiros dias, zerando a partir de então.

### **5.4.2 Amostra 2**

A amostra com inóculo e MIX foi mantida durante 35 dias, apresentando uma maior geração de biogás nos primeiros dias, seguido de uma queda e posteriormente aumento. A geração total de volume de biogás foi de 7.183,12 mL, sendo que 4.855,70 mL foram metano, a produção de CH<sub>4</sub> variou de 50 a 85%.

### **5.4.3 Amostra 3**

A amostra 3, com inóculo, MIX e tripa celulósica foi mantida durante 35 dias, apresentando uma geração de biogás de 8.030 mL e um volume de 5.195,05 mL. A porcentagem de CH<sub>4</sub> presente variou de 50% a 79,6%.

#### 5.4.4 Comparação das amostras

No fim do experimento realizou-se uma comparação entre as amostras 1, 2 e 3 e pode-se perceber que o inóculo não apresentou geração de biogás significativa. As amostras 2 e 3 apresentaram geração de biogás com metano, porém, a que recebeu a adição de tripa celulósica (amostra 3) obteve um maior incremento. A porcentagem de metano produzido pelas amostras variou entre 60% e 70% sobre o volume total de biogás gerado, como pode ser observado na figura 14.

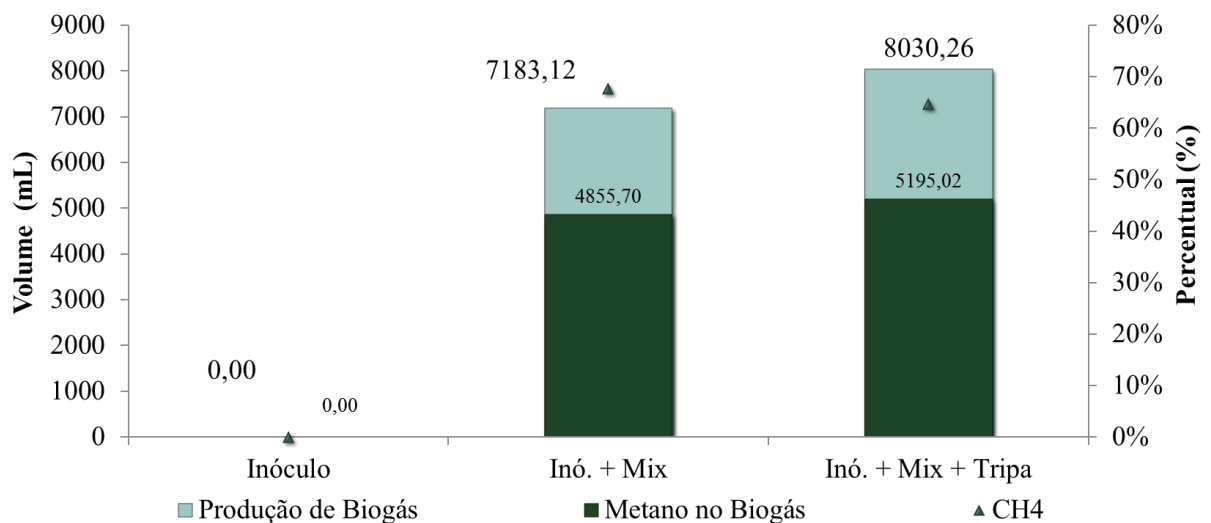


Figura 14 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 3.

Houve um incremento na produção de biogás, com uma boa porcentagem de metano nas amostras 2 e 3, com isso pode-se observar que não seria necessária a utilização de dejetos para produção do biogás, sendo que o “Mix” utilizado pode até apresentar melhores resultados se comparado com os outros experimentos anteriores.

#### 5.4.5 Análises de sólidos

As análises de Sólidos Totais (ST), Voláteis (SV) e Fixos (SF) referentes ao Experimento III estão apresentadas na tabela 11.

Tabela 11 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento

	Sólidos Início do Experimento			Sólidos Final do Experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Inóculo	2,86	64,34	35,66	2,31	55,99	44,01
Mix	3,80	90,39	9,61	-	-	-
Inóculo + Mix	3,03	82,23	17,77	1,93	70,65	29,35
Inóculo + Mix + Tripa	3,03	82,23	17,77	1,61	64,64	35,36

Verifica-se a redução nos valores de sólidos totais ao final do experimento, comprovando a ocorrência da degradação de parcela da matéria orgânica presente no substrato.

#### 5.4.6 Avaliação do pH

A análise de pH foi realizada no início e fim do experimento. Os dados obtidos estão descritos na tabela 12:

Tabela 12 – Análise de pH no início e fim do experimento

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Inóculo	8,26	7,67
Mix	7,13	-
Inóculo + Mix	8,82	8,09
Inóculo + Mix + Tripa	8,82	8,28
Dejetos	7,79	-

Com o pH alcalino dos materiais , o processo de biodigestão ocorreu de forma satisfatória, sendo que até a tripa celulósica acabou sendo degradada.

Ao final do processo, o pH teve um leve decréscimo, diferente do que destaca Kunz (2014), porém, tal situação não influenciou de forma significativa no processo de biodigestão e na geração do biogás e metano, visto que se manteve sempre acima do neutro.

## 5.5 Experimento 4

### 5.5.1 Amostra 1

A amostra 1 foi incubada durante 33 dias, apresentando geração de biogás até o 15º dia correspondente 734,25 mL, sendo 147,25 mL o volume de metano presente no biogás. A produção apresentada nessa amostra ocorreu em função de algum residual de carga orgânica presente no inóculo, já que a mesma não teve adição de outro substrato. A porcentagem de CH<sub>4</sub> apresentou acréscimo até o 15º dia, após variou de 40 a 20%.

### 5.5.2 Amostra 2

Na amostra 2 com inóculo B e o Mix, observou-se uma geração de biogás acumulada de 1.389,46 mL e o volume de metano presente no biogás correspondeu a 263,06 mL. A porcentagem de CH<sub>4</sub> apresentou um acréscimo até o 10º dia e após variou de 20 a 40%.

### 5.5.3 Amostra 3

A amostra com inóculo B, Mix e tripa celulósica foi mantida durante 69 dias, tendo gerado ao total 7.704,91 mL de biogás, sendo que destes, 4.691,91 mL de metano. Do 2º ao 30º dia da experimentação a porcentagem de metano variou de 15 a 50%, sendo que até esse período a tripa celulósica encontrava-se visível (sólida) dentro do reator. Após o 31º dia notou-se que a tripa celulósica começou a se degradar e conseqüentemente a geração de biogás e metano aumentou, sendo que a porcentagem de CH<sub>4</sub> até o final do experimento variou de 60 a 70%.

### 5.5.4 Amostra 4

A amostra com inóculo L não apresentou geração de biogás significativa, sendo registrado apenas um volume de aproximadamente 40 mL no primeiro dia do experimento. O volume mensurado é muito baixo em relação as outras amostras, em função do reator estar preenchido somente com 180 mL de inóculo. A porcentagem de CH<sub>4</sub> presente no biogás variou de 0 a 3%.

### 5.5.5 Amostra 5

A amostra com Mix e inóculo L foi mantida em experimentação durante 49 dias, neste período ocorreu uma geração de biogás de 9.788,92 mL, sendo que destes, 6.154,03 mL, corresponderam a metano.

A porcentagem de metano presente no biogás foi crescente até o 18º dia, visto que após esse período variou apenas na faixa de 60 a 75%.

### 5.5.6 Comparação das amostras

Realizando uma comparação entre as amostras (figura 15), pode-se perceber que a adição de tripa celulósica gerou incremento na geração de biogás da amostra que a recebeu. Cabe ressaltar que o Mix que recebeu o inóculo L (proveniente de teste anterior da própria empresa) mostrou-se mais favorável no experimento, gerando quantidades superiores de biogás e metano em relação ao mesmo Mix que recebeu o inóculo B.

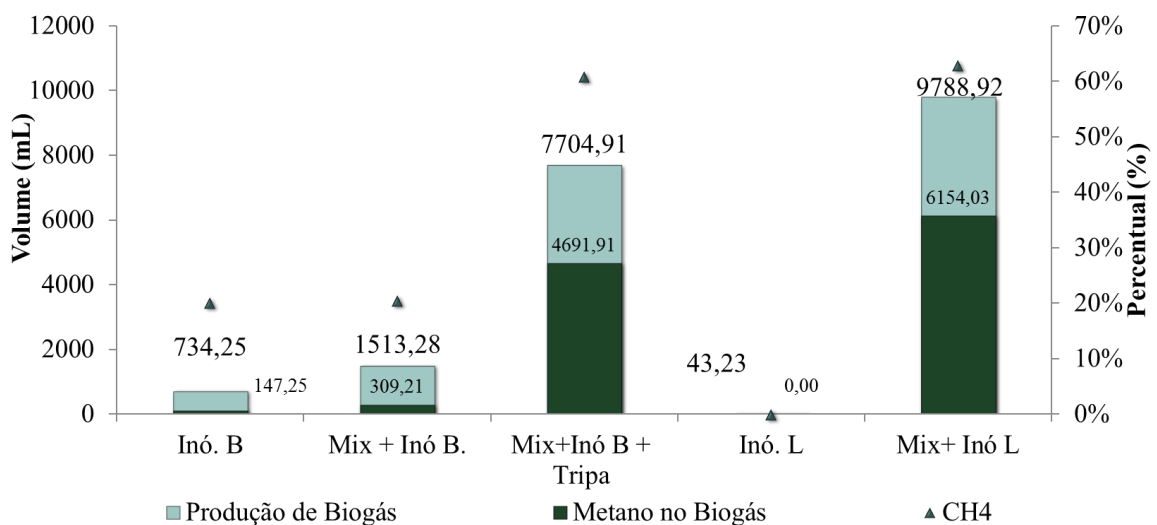


Figura 15 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 4.

Pode-se confirmar que a adição de tripa celulósica é boa como incremento para o processo de biodigestão, porém isso só foi possível após a fase de hidrólise, que levou alguns dias, em função da composição da tripa e da necessidade da quebra da celulose.

Assim como Kunz (2014) menciona, é possível verificar na amostra 5 que, utilizando inóculo formado por materiais semelhantes ao que serão incorporados posteriormente no biodigestor, a geração de biogás e metano ocorre de forma mais rápida.

### 5.5.7 Análises de sólidos

As análises de Sólidos Totais (ST), Voláteis (SV) e Fixos (SF) referentes ao Experimento IV estão apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento

	Sólidos Início do Experimento			Sólidos Final do Experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Inóculo B	4,72	71,03	28,97	3,06	60,85	39,15
Mix + Inóc. B	3,73	82,10	17,90	2,36	72,67	27,33
Mix + Inóc. B + 10% tripa	4,16	81,93	18,07	2,68	75,19	24,80
Inóculo L	1,72	66,50	33,50	1,41	61,41	38,59
Mix + Inóc. L	2,41	82,06	17,93	1,08	75,08	24,91
Lodo flotado suínos	5,61	86,43	13,57	-	-	-
Sangue suínos	18,06	95,21	4,79	-	-	-
Dejetos suínos	0,63	55,84	44,16	-	-	-
Lodo ativado laticínios	0,54	62,98	37,02	-	-	-
Lodo flotado laticínios	3,34	85,38	14,61	-	-	-
Sangue aves	13,20	93,74	6,26	-	-	-
Lodo flotado + ativado aves	4,29	96,03	3,97	-	-	-



A partir das análises realizadas percebeu-se que os ST no início e fim do experimento apresentaram redução. O Inóculo L apresentou a menor redução (17,85%) e o Mix + Inóculo L apresentou a maior redução (55,13%). Os outros substratos variaram de 35 a 36% de redução. Analisou-se a concentração de ST de cada substrato em nível de conhecimento, e percebeu-se que os sangues são os que possuem maior porcentagem e por isso acabam gerando um resultado rápido no processo de biodigestão.

#### 5.5.8 Avaliação do pH

A análise de pH foi realizada no início e no fim do experimento. O pH de todas as amostras apresentou um aumento, porém mantendo-se dentro da faixa de pH ótimo para os microrganismos de interesse. Os dados obtidos estão apresentados na tabela 14:

Tabela 14 – Análise de pH no início e fim do experimento

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Inóculo L	8,06	
Mix (50% dejetos) + Inóculo L	7,34	7,76
Mix (50% dejetos) + Inóculo L + 10% tripa	7,49	7,67
Mix (75% dejetos) + Inóculo L	7,65	7,80

## 5.6 Experimento 5

### 5.6.1 Amostra 1

A amostra 1 ficou incubada durante 40 dias, a geração de biogás ocorreu até o 33º dia, com um valor acumulado de 5176,14 mL de biogás e 3094,33 mL de metano. O percentual de CH<sub>4</sub> presente no biogás foi aumentando gradativamente até o 15º dia, este se manteve de 60% a 70% até o 31º dia, reduzindo constantemente até o fim da incubação.

### 5.6.2 Amostra 2

Percebe-se que a amostra 2 apresentou maior geração de biogás, o volume acumulado foi de 8324,36 mL de biogás e 4939,36 mL de CH<sub>4</sub>. O percentual de CH<sub>4</sub> variou de 50% a 75% do 9º ao 57º dia. A mesma ficou incubada 63 dias até mostrar sinais de que estava cessando a geração de biogás, 23 dias a mais que a amostra 1. Este aumento no tempo de geração de biogás pode ter ocorrido devido à presença de tripa celulósica, que foi sendo degradada aos poucos e incrementando a geração de biogás.

### 5.6.3 Amostra 3

A amostra com 75% de dejetos suíno foi mantida na incubação por 34 dias, a geração de biogás acumulada foi de 2869,99 mL e 1748,30 mL de CH<sub>4</sub>, sendo que a maior geração ocorreu até o 17º dia. O percentual de metano variou de 50 a 75% a partir do 6º dia.

#### 5.6.4 Comparação das amostras

Na figura 16 é possível perceber claramente que a amostra com 50% de dejetos suíno e tripa celulósica gerou maior volume de biogás em relação a amostra 1 (sem percentual de tripa celulósica). Observa-se que a tripa celulósica apresentou um incremento de 60,82% em relação a amostra 1, a amostra 3 apresentou a menor geração de biogás em relação as amostras 1 e 2. O percentual médio de CH<sub>4</sub> produzido, em cada amostra, se manteve entre 55% e 65%, o que pode ser considerado um valor um pouco abaixo do normal.

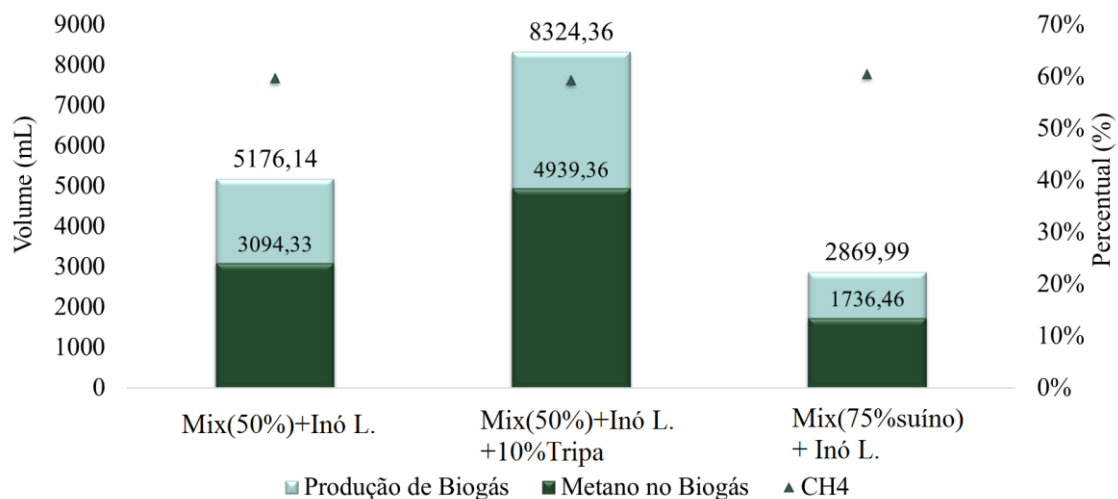


Figura 16 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 5.

Nesse experimento é possível verificar que todas as amostras produziram uma grande quantidade de biogás e metano, se comparado com os outros experimentos, muito disso se deve ao inóculo utilizado nas amostras. Como já mencionado, o substrato adaptado com os materiais que recebeu, acelera o processo e acaba gerando biogás por um período maior de tempo.

### 5.6.5 Análises de sólidos

As análises de Sólidos Totais (ST), Voláteis (SV) e Fixos (SF) referentes ao Experimento V estão apresentadas na tabela 15.

Tabela 15 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento

	Sólidos Início do Experimento			Sólidos Final do Experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Inóculo L	1,26	64,54	35,46	-	-	-
Mix (50% dejetos) + Inóculo L	1,78	89,63	10,37	0,74	66,59	33,41
Mix (50% dejetos) + Inóculo L + 10% tripa	1,68	83,09	16,91	0,87	65,75	34,25
Mix (75% dejetos) + Inóculo L	1,28	81,99	18,01	0,60	61,22	38,78

Observa-se que os sólidos totais da amostra 1 apresentaram redução de 58,56%, a amostra 2 reduziu 47,95% e a amostra 3 apresentou uma redução de 53,50% em relação ao início e fim do experimento, isso indica que houve degradação de matéria orgânica.

### 5.6.6 Avaliação do pH

Os valores de pH referentes ao início e fim do experimento estão apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Análise de pH no início e fim do experimento

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Inóculo L	8,06	
Mix (50% dejetto) + Inóculo L	7,34	7,76
Mix (50% dejetto) + Inóculo L + 10% tripa	7,49	7,67
Mix (75% dejetto) + Inóculo L	7,65	7,80

O pH do experimento 5 foi adequado no início do experimento e teve somente um acréscimo após a conclusão das amostras, o que demonstra que o processo ocorreu de forma adequada e esse também é um dos motivos para a grande geração de biogás e metano nessa etapa do estudo.

## 5.7 Experimento 6

### 5.7.1 Amostra 1

A amostra 1 ficou incubada durante 55 dias, durante esse período a geração de biogás acumulada foi de 13282,72 mL e de CH<sub>4</sub> foi de 8897,72 mL. O percentual de CH<sub>4</sub> variou de 60% a 70% até o 31º dia, reduzindo constantemente até o fim do experimento.

### 5.7.2 Amostra 2

A amostra 2 teve um menor período de incubação (37 dias), apresentando geração de biogás de 7846,29 mL, sendo 5292,08 mL correspondentes a metano. O percentual de CH<sub>4</sub> durante o maior período variou de 60% a 70%, apresentando uma pequena redução a partir do 31º dia.

### 5.7.3 Comparação das amostras

A figura 17 ilustra o comparativo entre a geração de biogás e metano pelas amostras. Pode-se perceber que a amostra com 50% de dejetos suínos (amostra 1) apresentou maior produção de biogás, gerando 5.436,43 mL a mais que a amostra 2.

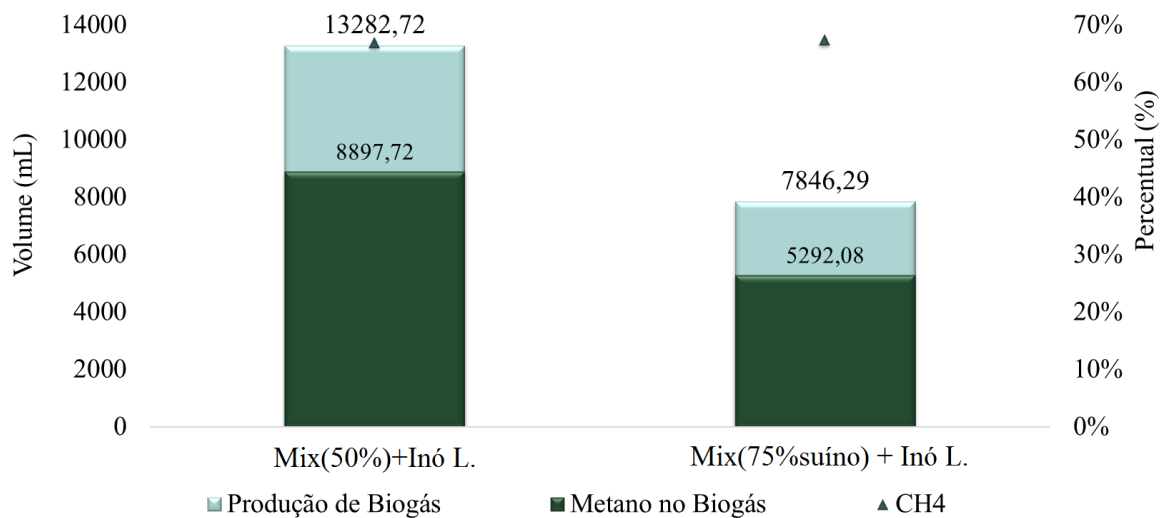


Figura 17 – Comparativo da geração de metano e biogás no experimento 6.

A diferença entre os volumes de biogás gerados nas amostras, pode ser atribuída ao fato de que a amostra 2 recebeu maior quantidade de dejetos suínos em relação à amostra 1, dessa forma causando um “estresse” no sistema, possivelmente em função da diferença muito grande na relação C/N, já que segundo Szymanski (2008) e Comastri Filho (1981), essa relação é um dos fatores primordiais para o bom andamento do processo anaeróbico.

### 5.7.4 Análises de sólidos

As análises de Sólidos Totais (ST), Voláteis (SV) e Fixos (SF) referentes ao Experimento 6 estão apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 – Sólidos totais, voláteis e fixos no início e final do experimento

	Sólidos Início do Experimento			Sólidos Final do Experimento		
	ST%	SV%	SF%	ST%	SV%	SF%
Inóculo L	1,50	60,19	39,81	-	-	-
Mix (50% dejetto) + Inóculo	8,93	68,44	31,56	2,80	68,28	31,71
Mix (75% dejetto) + Inóculo	12,53	57,02	42,98	2,74	63,95	36,05

Observa-se que na análise de sólidos totais da amostra 1 houve redução de 68,62% e a amostra 2 apresentou redução de 78,14% em relação ao início e fim do experimento, isso indica que houve degradação da matéria orgânica.

#### 5.7.5 Avaliação do pH

Com os resultados obtidos pela análise de pH, percebeu-se que o pH da amostra 1 aumentou, e o da amostra 2 reduziu, mas as variações não foram elevadas, assim não interferindo no substrato. Os dados obtidos estão descritos na tabela 18.

Tabela 18 – Análise de pH no início e fim do experimento

	pH Início do Experimento	pH Fim do Experimento
Inóculo L	8,25	
Mix (50% dejetto) + Inóculo	7,55	7,78
Mix (75% dejetto) + Inóculo	7,76	7,71

## 5.8 Comparação das amostras dos experimentos

Na figura 18, pode-se observar que individualmente no experimento I, a produção de biogás e metano é baixa, se comparado com as misturas dos substratos a partir do segundo experimento.

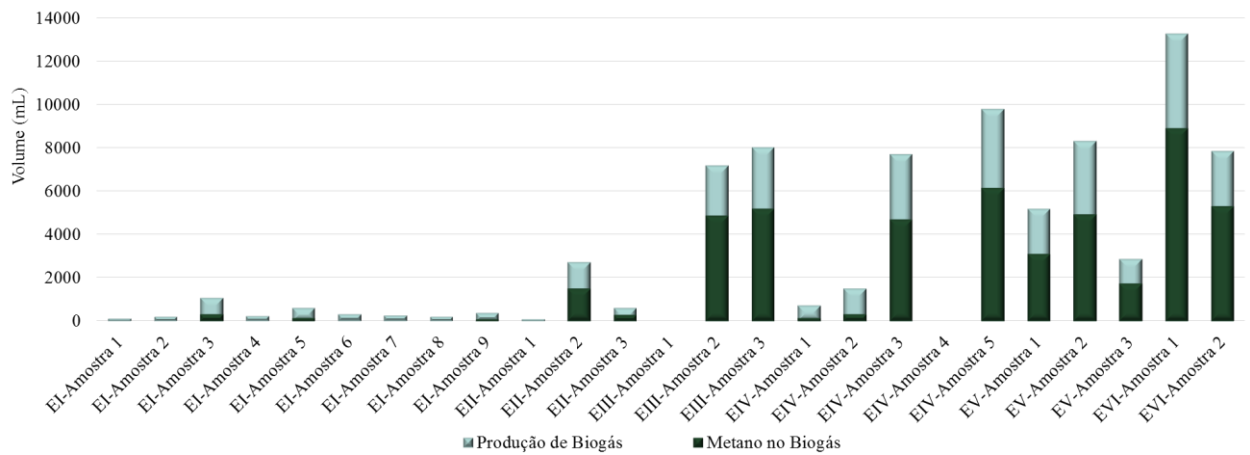


Figura 18 – Comparativo da geração de metano e biogás em todas as amostras.

A maior produção de metano e biogás se deu na amostra 1 do sexto experimento, sendo que outro experimento com uma boa produção de biogás foi a amostra 5 do experimento IV.

Nos experimentos em que houve uma adição maior de lodo flotado, composto basicamente por gordura (ácidos graxos voláteis) dos frigoríficos e laticínios das unidades industriais da empresa, foi possível verificar que a produção de biogás teve um incremento, apresentando mais uma possibilidade de destinação desse material. Possivelmente o uso do lodo flotado melhorou a relação C/N das amostras, já que o material removido dos flotaadores possui grande quantidade de nitrogênio.

A tripa celulósica, juntamente com o lodo flotado, pode ser um incremento a ser adicionado nos biodigestores para aumentar os índices de metano presentes no biogás, já que a mesma possui um residual de material orgânico proveniente do processo de cozimento e produção de embutidos. Porém para a tripa celulósica



deve-se encontrar uma maneira de acelerar o processo de degradação, talvez com a trituração do material em pequenas partes.

A partir do experimento IV foi utilizado o inóculo proveniente das sobras dos experimentos anteriores e com isso foi possível identificar que o mesmo se tornou o mais satisfatório para utilizar nos experimentos posteriores, pois apresentaram melhores resultados na geração de biogás, possivelmente em função da adaptação dos substratos introduzidos nos reatores, com o inóculo utilizado.

Os experimentos IV, V e VI apresentaram os melhores resultados do projeto, mas foi possível verificar variações na geração de metano e biogás entre esses experimentos, principalmente em função da concentração de dejetos presentes nas amostras. Amostras com maior quantidade de dejetos tinham uma relação C/N longe da ideal, o que acarretou numa produção menor de biogás.

## **6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES**

Todos os objetivos do trabalho puderam ser alcançados, de acordo com isso, foi possível identificar que os substratos gerados pelas empresas são interessantes no sentido de proporcionar a realização de diferentes misturas - capazes de gerar uma quantidade expressiva de biogás ou metano para utilizar como opção de geração de energia - em relação a quantidade de substrato que terá disponível.

Os resultados demonstraram que a quantidade de biogás gerado no processo seria viável para a manutenção de sistemas de geração de energia, somente sendo necessária a avaliação de qual a forma de energia a ser utilizada.

Pode-se verificar que a concentração de metano, fator primordial para o processo, é bastante elevada em relação ao que é apresentado em literaturas sobre o tema, especialmente nos experimentos IV e VI em que a quantidade de metano gerada foi superior a 6.000 mL no período do teste.

Em relação aos dejetos suínos, pode-se verificar que a concentração dos mesmos nos experimentos, influencia diretamente na produção de biogás e conseqüentemente metano. Dessa forma se faz necessário um controle na quantidade de dejetos utilizados nos experimentos, para que a relação C/N no substrato esteja próxima do ideal.

### **6.1 Recomendações**

Recomenda-se para próximos estudos, a avaliação do uso de dejetos suínos em menores concentrações no processo de biodigestão, a fim de buscar a relação C/N ideal para o processo.

Seria interessante realizar também, uma avaliação do destino que seria dado ao metano que poderia ser produzido pelas empresas, a fim de definir a melhor opção de energia a ser gerada (elétrica, mecânica ou térmica).

Em projetos futuros, poderia ser conveniente realizar a avaliação de alguns parâmetros importantes para validar o processo de biodigestão anaeróbia, através

de análises físico-químicas e microbiológicas, e também da atividade metanogênica específica (AME) para cada um dos substratos e também das diferentes misturas.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBERGUINI, L. B. A.; SILVA, L. C.; REZENDE, M. O. O. **Tratamento de resíduos químicos: guia prático para a solução dos resíduos químicos em instituições de ensino superior.** São Carlos: RiMa, 2005.

AVACI, A. B. et al. Avaliação econômico-financeira da microgeração de energia elétrica proveniente de biogás da suinocultura. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 17, n. 4, p. 456-462. abr. 2013.

BACKES, G. M. **Avaliação do processo de digestão anaeróbia na geração de energia a partir de dejetos suínos e bovinos de leite com suplementação de glicerina residual bruta oriunda da produção de biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) Centro Universitário Univates, Lajeado-RS, 2011.

BEN - **Balanco Energético Nacional 2013:** Ano base 2012. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. EPE, 2013. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2013.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf)>. Acesso em: 22 mar. 2014.

BLEY JR., C. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais.** Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2. ed. rev., 2009.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental.** São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A.. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais.** São Paulo: CETESB, 1979.

BRAILE, Pedro M.; CAVALCANTI, J. E. W. A.. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais.** São Paulo: CETESB, 1979.

BRONDANI, J. C. **Biodigestores e biogás, balanço energético, possibilidades de utilização e mitigação do efeito estufa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro, ABES, Rima, 2003.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. São Paulo: Técnica, 2009.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica. **Eng. Agríc.**, out. 2010, v. 30, n. 5, p.831-844.

CHERNICHARO, C. A. L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Segrac, 2001.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA - UFMG, 2007.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás: independência energética do Pantanal Mato-Grossense**. Corumbá-MS: EMBRAPA, 1981.

CRESPO, P. G. **Manual de projeto de estações de tratamento de esgotos**. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

DEGANUTTI, R. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em: 22 mar. 2014.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Eng. Sanit. Ambient.**, jun. 2009, v. 14, n. 2, p. 167-172.

GALBIATTI, J. A. et al. Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, abr. 2010, v. 14, n. 4, p. 432-437.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais: um estudo de caso na região de Toledo-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2003.

GOMEZ, C. C.; GUEST, C.; SEADI, T. A. **Bioexell training manual**. Teodorita Al Seadi. Esbjerg - Dinamarca. [200-]. Disponível em: <[http://web.sdu.dk/bio/bioexell/down/bioexell\\_manual.pdf](http://web.sdu.dk/bio/bioexell/down/bioexell_manual.pdf)>. Acesso em: 22 mar. 2014.

JORGE, L. C. **Estudo de viabilidade de implantação de biodigestores anaeróbicos no município de Paty do Alferes - RJ, uma contribuição para minimizar a degradação ambiental na área rural**. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2004.

KONRAD, O. et al. A influência da codigestão de óleo vegetal residual na geração de biogás por lodo de estação de tratamento de efluentes. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. Marechal Cândido Rondon-PR. v. 2, p. 1-20, 2013.

KONRAD, O. et al. **Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual**. Revista Destaques Acadêmicos, ano 2, n. 4, CETEC/UNIVATES. 2010.

KONRAD, O. et al. **Utilização da borra de glicerina como co-substrato na geração de biogás**. Scientia Plena. São Cristóvão - SE. v. 10, n. 2, 2014.

KUNZ, A.; PAULILLO, G. **Curso de atualização em energias do biogás: Módulo II - Linhas de base para produção e conversão de energia do biogás**. Parque tecnológico Itaipu. Foz do Iguaçu. 2014. p. 1-89.

LEME, E. J. A. **Manual prático de tratamento de águas residuárias**. São Carlos, SP: EdUFSCar, 2008.

MERCADO, A. G. **Remoção de Sulfeto de Hidrogênio de biogás em instalação piloto com óxido de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2010.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

MOTA, S. **Introdução a engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. Aracaju, SE: J. Andrade, 2004.

NUVOLARI, A. et al. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo: Edgar Blucher, 2003.

ORRICO JR., M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Eng. Agríc.**, jun. 2010, v. 30, n .3, p. 546-554. ISSN 0100-6916.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2005.

RICHTER, C. A., NETTO, J. M. A.. **Tratamento de água: tecnologia atualizada** . São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

SANT'ANNA JR., G. L. **Tratamento biológico: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e purificação de biogás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real - Portugal. 2009. Disponível em: <[https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/263/1/msc\\_cabvsilva.pdf](https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/263/1/msc_cabvsilva.pdf)> Acesso em: 21 mar. 2014.

SILVA, W. T. L. et al. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Quím. Nova**, 2012, vol.35, no.1, p.35-40.

SPERLING, M. von. **Lodos ativados**. Belo Horizonte: UFMG, 2002.

SPERLING, M. von. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA - UFMG, 2001. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v. 2).

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. **Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso**. 2008 Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/7596/6685>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

TORRES, A.; PEDROSA, J. F.; MOURA, J. P. **Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais**. 2012. Disponível em: <<http://www.revistaeea.org/artigo.php?idartigo=1248&class=02>> Acesso em: 22 mar. 2014.