

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PEDRO PESCADOR DE MELLO**

**BIOGÁS NA SUINOCULTURA: COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE  
GERAÇÃO DE GÁS EM TRÊS DIFERENTES PAÍSES**

**ARARANGUÁ**

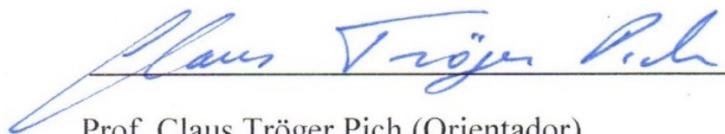
**2017**

**PÉDRO PESCADOR DE MELLO**

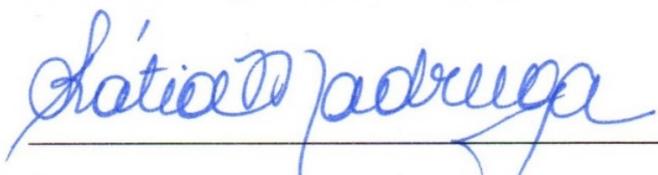
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

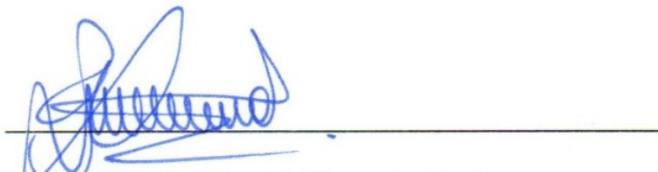
Aprovado em: 07/07/2017



Prof. Claus Tröger Pich (Orientador)



Prof. Kátia Cilene Rodrigues Madruga (Examinador)



Prof. Elaine Virmond (Examinador)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Curso de Engenharia de Energia pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Claus Tröger Pich, pelo apoio e disponibilidade na orientação ao longo deste trabalho.

À Professora Dra. Katia Madruga, pela intermediação de importantes contatos que resultaram em informações contidas neste trabalho.

Ao Mestre Lutz Michaelis, por ter aberto as portas da instituição *Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg*, permitindo o acesso a doutores da área, além do acesso à biblioteca dessa instituição.

À empresa Bosch Sistemas Térmicos alemã, em especial ao engenheiro Jan Klosok, pela a oportunidade da realização do estágio na Alemanha, fornecendo condições para que a viagem até lá pudesse se realizar.

À empresa Elite Energia, em especial aos engenheiros Ângelo Nunes e Kabian Sadi, por todo apoio necessário enquanto as informações para este trabalho estavam sendo obtidas na Alemanha.

A empresa *ECO Erneuerbare Energien GmbH*, em especial ao Engenheiro Vitor Grigull, o qual forneceu importantes informações para que este trabalho pudesse ser realizado.

Ao Professor Dr. Luciano Lopes Pfitscher, que sempre esteve a disposição para ajudar.

Ao CNPq, que através do programa Ciências sem Fronteiras, forneceu condições para que o contato com a Alemanha fosse iniciado em 2014.

À minha família, que sem o seu apoio incondicional, nenhuma das etapas que resultaram este trabalho teria sido possível.

Aos meus amigos, pelo suporte sempre disponível.

“A vida nunca é uma linha reta, sempre tem altos e baixos. O importante é sempre aprender com as dificuldades e sempre ver nas dificuldades uma oportunidade”. (Jorge Paulo Lemann)

## RESUMO

A produção de suínos é uma importante atividade econômica no Brasil, sendo este o quarto maior mercado de carne suína no mundo. Em função da grande quantidade de dejetos produzidos por esses animais, vários problemas ambientais podem ser causados quando não tratados corretamente, dentre eles a emissão de gases do efeito estufa, a contaminação da água e do solo. A utilização de biodigestores para o tratamento desses dejetos aparece como uma solução para parte desses problemas. Este trabalho teve como objetivo coletar informações sobre o tema biogás, o gás produzido pelos biodigestores, mais especificamente sobre modelos de biodigestores utilizados, utilização do gás, técnicas de purificação e geração de gás em diferentes formas de criação de suínos, utilizando fontes no Brasil, na Alemanha e nos Estados Unidos e realizar análise comparativa dessas tecnologias. Com o interesse de ampliar a utilização do biogás na linha produtiva, diversas técnicas de purificação de gás são utilizadas, permitindo que o mesmo seja utilizado como fonte de calor através da queima direta, geração de energia através de motores a combustão e utilização do biogás com as mesmas aplicações do gás natural, necessitando de uma purificação mais avançada para este último caso. Além disso, é fundamental conhecer os valores de produção de biogás através dos dejetos utilizados, sendo esse representado neste trabalho pelos dejetos da suinocultura. A média teórica de geração diária de biogás por suíno calculada foi de  $0,176 \text{ m}^3$ , enquanto os valores práticos médios obtidos nas propriedades brasileiras e americanas foram de  $0,183 \text{ m}^3$  e  $0,163 \text{ m}^3$  respectivamente. No caso da Alemanha, a análise foi baseada no valor fornecido pela empresa *ECO Erneuerbare Energien GmbH*, de  $0,2 \text{ m}^3$ , uma vez que não foram encontrados estudos sobre geração de biogás utilizando somente dejetos suínos. Os valores das médias obtidas demonstram que, apesar de as produções de gás brasileiras serem superiores às americanas, ainda são 8% menores que as alemãs, o que indica possibilidade de otimização equipamentos e processos. Conclui-se também que a maioria das médias obtidas na literatura brasileira foram medidas sem considerar períodos críticos, como no inverno, podendo, assim, haver erro associado, aumentando ainda mais a diferença de produção comparativamente às propriedades alemãs.

Palavras-chave: biogás, biodigestores, técnicas de purificação do biogás, tecnologia de biodigestão, suinocultura

## ABSTRACT

The swine production is an important economical activity in Brazil, it represents the fourth biggest production in the world. In function of the amount of manure of this animal, different environmental issues can be caused, including the emissions of greenhouse gas and contamination of the water and soil. The application of biodigester to the treatment of this effluent is one of the solutions, since this technology can reduce the organic load. The main goal for this paper was to collect information about the biogas, more specific about the biodigester models, the application of the gas, upgrade techniques and the amount of gas production of different systems of rearing pigs, comparing the average production from Brazil, Germany and United States. With the interest of expanding the use of biogas in the production line, several gas purification techniques are used, allowing it to be used as a source of heat through direct combustion, power generation through combustion engines and use of biogas with the same applications of natural gas, requiring a more advanced purification for the last case. In addition, it is essential to know the biogas production values through the different wastes used, which is represented in this work by swine manure. The theoretical average daily biogas production per pig obtained from the literature was 0,176 m<sup>3</sup>, while the measured values from Brazilian and American farms were 0,183m<sup>3</sup> and 0,163m<sup>3</sup> respectively. In the case of Germany, the value of 0,2m<sup>3</sup>, was obtained from the ECO *Erneuerbare Energien GmbH* company, since it was not possible to identify properties, which use only swine manure for the biogas digestion. The average value obtained, demonstrate that, despite the Brazilian gas production being superior to the American ones, it is still 8% lower than the German ones, showing that is still possible to improve this technology. It was also concluded that most of the averages obtained in the Brazilian literature did not perform measurements in critical periods, such as in winter, and could thus have an associated error, increasing the production gap with German properties even further.

Keywords: biogas, biodigester, biogas upgrade, biodigestion technology, swine farming

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de produção do biogás. ....	20
Figura 2 - Alternativas do uso de biogás. ....	22
Figura 3 - J620 Jenbacher motor a biogás da GE Distributed Power. ....	23
Figura 4 - Biodigestor modelo chinês. ....	25
Figura 5 - Biodigestor modelo chinês com descrição ....	25
Figura 6 - Biodigestor de fluxo tubular.....	26
Figura 7 - Vista tridimensional do modelo Indiano.....	27
Figura 8 - Biodigestor indiano com indicações ....	28
Figura 9 - Biodigestor modelo filipino ....	29
Figura 10 - Biodigestor modelo de batelada.....	29
Figura 11 - Reator UASB.....	31
Figura 12 - Reator de mistura completa.....	32
Figura 13 - Grupo gerador a biogás CAT G3406.....	36
Figura 14 - Controle de gás para injeção de ar no gasômetro do biodigestor .....	39
Figura 15 - Coluna de biodessulfurização externa, à direita ao lado de um gasômetro .....	40
Figura 16 - Produção diária de biogás por animal nas propriedades nacionais.....	50
Figura 17 - Produção de biogás diário nas propriedades americanas .....	52
Figura 18 - Comparação de produção de biogás entre literatura prática e teórica....	54
Figura 19 - Comparação de produção pelo sistema de criação.....	55
Figura 20 - Comparação de diferentes tecnologias de biodigestor .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção média de dejetos por animal .....	17
Tabela 2 - Porcentagem de massa seca em dejetos de suínos .....	18
Tabela 3 - Composição média do biogás .....	19
Tabela 4 - Condições mínima de qualidade de gás para motor Caterpila .....	37
Tabela 5 - Condições mínimas para utilização de biometano no Brasil .....	37
Tabela 6 - Processos de dessulfurização .....	38
Tabela 7 - Características dos sistemas de purificação .....	45
Tabela 8 - Comparação dos valores de investimento e operação dos sistemas de purificação .....	46
Tabela 9 - Geração de biogás por kg de massa seca .....	47
Tabela 10 - Geração de biogás .....	47
Tabela 11 - Propriedades nacionais estudadas .....	48
Tabela 12 - Geração de gás nas propriedades nacionais .....	49
Tabela 13 - Propriedades americanas estudadas .....	51
Tabela 14 - Geração de gás nas propriedades americanas .....	52
Tabela 15 - Produção de biogás em propriedades alemãs .....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCS	Associação Brasileira dos Criadores de Suínos
Ácido acético	$\text{CH}_3\text{COOH}$
CC	Ciclo Completo de criação de suínos
$\text{CH}_4$	Gás Metano
CHP	Ciclos combinados de geração de energia e calor
CO	Monóxido de carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
DEA	Dietanolamina
$\text{H}_2$	Hidrogênio
$\text{H}_2\text{O}$	Água
$\text{H}_2\text{S}$	Gás sulfídrico
kg	Quilogramas
l	Litros
MDEA	Metildietilamina
MEA	Monoetanolamina
$\text{N}_2$	Nitrogênio
$\text{NH}_3$	Amônia
$\text{O}_2$	Oxigênio
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celsius Tempo
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
TEA	Trietanolamina
UASB	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo
UCT	Unidade de Crescimento e Terminação de suínos
UPL	Unidade de Produção de Leitões

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Suinocultura.....</b>	<b>16</b>
3.1.1	Situação no Brasil.....	16
3.1.2	Tipos de criação .....	16
<b>3.2</b>	<b>Potencial de geração de biogás a partir de dejetos suínos.....</b>	<b>17</b>
3.2.1	Dejetos por animal.....	17
3.2.2	Porcentagem de massa seca.....	17
<b>3.3</b>	<b>O biogás.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Formação do gás.....</b>	<b>19</b>
<b>3.5</b>	<b>Uso do biogás .....</b>	<b>21</b>
3.5.1	Geração de energia térmica.....	22
3.5.2	Geração de energia elétrica .....	22
<b>3.6</b>	<b>Biodigestores.....</b>	<b>23</b>
3.6.1	Biodigestor modelo chinês .....	24
3.6.2	Biodigestor de fluxo tubular (Canadense).....	26
3.6.3	Biodigestor modelo indiano .....	27
3.6.4	Biodigestor modelo paquistanês .....	28
3.6.5	Biodigestor modelo tailandês .....	28
3.6.6	Biodigestor modelo filipino .....	28
3.6.7	Biodigestor descontínuo (batelada) .....	29
3.6.8	Reator UASB .....	30
3.6.9	Reator de mistura completa (Complete mix) (Stirred Tank Reactors - STR)....	31

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
4.1	Revisão bibliográfica sobre purificação de biogás .....	33
4.2	Obtenção de dados referentes à geração de biogás por quilograma de dejetos.....	33
4.3	Levantamento bibliográfico de propriedades de suinocultura que utilizam biodigestores para produção de biogás.....	34
4.4	Comparação dos dados de produção teóricos e práticos obtidos na literatura.....	34
<b>5</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
5.1	Técnicas de purificação do biogás .....	36
5.1.1	Dessulfurização .....	38
5.1.2	Remoção da umidade .....	41
5.1.3	Remoção do dióxido de carbono .....	42
5.1.4	Separação do oxigênio.....	46
5.2	Estimativa teórica de geração de biogás .....	46
5.3	Análise de casos reais nacionais.....	47
5.3.1	Propriedades e tecnologias utilizadas .....	47
5.3.2	Geração de biogás nas propriedades nacionais .....	49
5.4	Análise de casos internacionais.....	50
5.4.1	Propriedades e tecnologias utilizadas .....	50
5.4.2	Geração de gás nas propriedades.....	52
5.4.3	Dados de produção na Alemanha.....	53
5.5	Comparação de dados das propriedades e da literatura .....	53
5.5.1	Comparação da geração de biogás entre os três países estudados.....	53
5.5.2	Comparação de geração de biogás pelo sistema de criação .....	54
5.5.3	Comparação da capacidade de geração de biogás pela tecnologia do biodigestor .....	55
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo energético dos últimos anos, o interesse de países importadores em reduzir a dependência do petróleo e a necessidade de amenizar os impactos ambientais têm direcionado esforços de governos, empresas e universidades em prol de soluções sustentáveis (KONRAD *et al.*, 2016)

A atividade pecuária tem grande participação nas emissões de metano (CH<sub>4</sub>), sendo esse um dos principais gases causadores do efeito estufa. Dentre as criações envolvidas, uma se destaca devido à elevada taxa de geração de dejetos, a suinocultura. Os dejetos da suinocultura causam grande impacto negativo quando lançados sem tratamento adequado no meio ambiente, contaminando água, solo e ar. No caso das águas, ocorre a poluição orgânica, a proliferação de microrganismos entéricos e o aumento das concentrações de nitrato e de cobre. Já no caso dos solos o impacto é causado quando os dejetos são utilizados como fertilizantes, os quais possuem excesso de fósforo. A contaminação do ar tem como efeitos o aumento da população de insetos, a exalação de maus odores e a emissão de gases causadores do efeito estufa (GUSMÃO, 2008).

Em função dos potenciais problemas gerados pelos dejetos animais, soluções devem ser encontradas e executadas para que o impacto seja neutralizado, ou ao menos amenizado. Dentre as soluções, a produção e a utilização de biogás se destaca, uma vez que apresenta oportunidade para geração de energia tanto térmica quanto elétrica a partir do tratamento de dejetos animais (GUSMÃO, 2008).

A produção de biogás é realizada por meio da biodigestão anaeróbia, sendo esse um processo de degradação da matéria orgânica que ocorre na ausência de oxigênio, comumente utilizado no tratamento biológico. Além dos dejetos de suínos, diversos outros passivos ambientais podem ser utilizados como fonte de matéria orgânica para produção de biogás, como é o caso de resíduos domésticos, resíduos de atividades agrícolas e pecuária, e lodo de esgoto (GUSMÃO, 2008).

Além de a biodigestão anaeróbia tratar um passivo ambiental, o biogás gerado por esse processo consiste em um biocombustível gasoso que pode ter diversas aplicações. Esse pode ser queimado para produção de calor residencial ou industrial, além disso, existe a possibilidade de ser queimado em um motor para gerar energia

mecânica que pode ser utilizada em processos industriais, ou o motor pode ser ligado a um gerador elétrico para a produção de energia elétrica. No caso do biogás purificado, existem outras aplicações, uma vez que esse poderá ser concentrado em metano e ser usado na maioria das aplicações que hoje são atendidas pelo gás natural. Além disso, o  $\text{CH}_4$  isolado do biogás pode ser usado como fonte alternativa de hidrogênio, que atualmente tem como principal fonte o gás natural, fonte fóssil (não renovável). Dentre as diversas aplicações, o  $\text{H}_2$  pode ser utilizado em células de combustível para geração de energia.

Em função das diversas possibilidades existentes para o biogás, este trabalho foi desenvolvido para que se pudesse conhecer o tema com maior profundidade. O mesmo tem como um dos seus objetivos a elaboração de um referencial teórico explanando informações sobre a formação do biogás e aplicações, tecnologias de biodigestores, técnicas de purificação e análise dos custos para purificação.

Além disso, em um segundo momento foi comparada a geração de biogás por animal em diferentes condições foi comparada, realizando esta análise com informações obtidas nas bibliografias brasileira, americana e alemã, esse o objetivo foi verificar a existência de discrepâncias na geração de gás dentre as tecnologias, consideradas a fim de encontrar oportunidades de melhorias para o sistema utilizado no Brasil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Coletar e analisar informações sobre o tema biogás, mais especificamente sobre modelos de biodigestores utilizados, utilização do gás, técnicas de purificação e geração de gás em diferentes formas de criação de suínos no Brasil, na Alemanha e nos Estados Unidos e realizar análise comparativa de tecnologia desses países.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre as técnicas e custos dos sistemas de purificação de biogás.
- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre a geração de biogás obtido nos diferentes tipos de criação de suínos nos três países: Brasil, Alemanha e Estados Unidos.
- Comparar os dados de geração de biogás teóricos e obtidos em propriedades brasileiras, alemãs e norte americanas.
- Analisar possíveis locais onde a geração diária de biogás ( $m^3/dia$ ) seja superior à encontrada atualmente no Brasil.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Suinocultura**

##### **3.1.1 Situação no Brasil**

Segundo a Associação Brasileira dos Criadores de Suínos (ABCS), o Brasil é o quarto maior país produtor de suínos do mundo possuindo, aproximadamente, um plantel produtivo de 1.720.255 matrizes, as quais foram responsáveis por gerar mais de 39.263.964 suínos em 2015 para o abate. Em 2015, esse mercado foi responsável pela movimentação direta e indireta de R\$ 149,867 bilhões, com grande representatividade no PIB nacional.

##### **3.1.2 Tipos de criação**

Abaixo serão apresentados os diferentes tipos de criação de suínos utilizados no Brasil.

###### **3.1.2.1 Unidade de Produção de Leitões (UPL)**

As Unidades de Produção de Leitões (UPL) são constituídas por matrizes e reprodutores, e nelas ocorre o nascimento dos leitões (maternidade). Além disso, normalmente as UPL possuem o sistema de criação de creche em conjunto (GUSMÃO, 2008).

###### **3.1.2.2 Creche**

Segundo Gusmão (2008), o sistema de creche é caracterizado por ser o local onde ocorre o crescimento inicial do leitão, recebendo o animal com 6 kg e o alimentando até que ele atinja 25 kg, momento no qual ele já terá massa suficiente para ser enviado para a unidade de crescimento e terminação.

###### **3.1.2.3 Unidade de Crescimento e Terminação (UCT)**

Este tipo de unidade é caracterizado por receber o leitão após o período de amamentação, os quais tem, aproximadamente, 25 kg e criarem o mesmo até o momento do abate, quando o animalatinge em torno de 100 kg (GUSMÃO, 2008).

### 3.1.2.4 Ciclo Completo (CC)

As granjas que trabalham com Ciclo Completo (CC) caracterizam-se por cuidar de todas etapas da criação dos leitões, desde seu nascimento, até o abate (GUSMÃO, 2008).

## 3.2 Potencial de geração de biogás a partir de dejetos suínos

O potencial de geração de biogás é um dado de extrema importância para estimativas de projetos na área, porém não é uma informação que pode ser diretamente calculada uma vez que a quantidade de biogás produzido está diretamente relacionada com a quantidade de dejetos gerados, os quais dependem de vários fatores. Para que possa ser possível estimar a produção de biogás, a unidade “Geração de biogás por quilograma de dejetos seco” ( $m^3/kg_{MS}$ ) é utilizada (SGANZERLA, 1983).

### 3.2.1 Dejetos por animal

Segundo Oliveria (1993) as quantidades de dejetos gerados dependem de alguns fatores, sendo eles, o tipo de criação do animal, idade, peso e alimentação do animal. Em função disso a Tabela 1 apresenta as produções médias de dejetos nas principais etapas da vida de um suíno.

Tabela 1 - Produção média de dejetos por animal

<b>Categoria de Suínos</b>	<b>Esterco [kg]</b>	<b>Esterco + urina [kg]</b>	<b>Dejetos líquidos [l]</b>
(25-100) kg	2,3	4,9	7
Fêmeas em Gestação	3,6	11	16
FÊmeas em Lactação	6,4	18	27
Machos	3	6	9
Leitão desmamado	0,35	0,95	1,4

Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 1993

### 3.2.2 Porcentagem de massa seca

Como apresentado na seção 3.2, a unidade utilizada para estimativa de biogás é ( $m^3/kg_{MS}$ ), em função disso, é de extrema importância determinar a porcentagem de massa seca proveniente dos dejetos de suínos. Como é apresentado na Tabela 2 o valor difere entre autores, uma vez que o valor varia conforme os animais são criados.

Tabela 2 - Porcentagem de massa seca em dejetos de suínos

<b>Porcentagem de massa seca [%]</b>	<b>Fonte</b>
4,51	FNR, 2013
4,2	BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU), 2007
6,11	EDER; KRIEG; SCHULZ, 2006

### 3.3 O biogás

Apesar de o biogás ainda ser visto como algo do futuro, o mesmo já é conhecido há muito tempo. Alessandro Volta, no século XVIII, foi o responsável pela sua descoberta e séculos depois esse gás já era utilizado amplamente na China e na Índia com a intenção de atender às necessidades energéticas na zona rural (OLIVEIRA, 2009).

O biocombustível em questão é consistem em uma mistura gasosa produzida a partir da digestão anaeróbia de matéria orgânica, ou seja, por meio da biodegradação da matéria orgânica pela ação de bactérias que atuam na ausência de oxigênio e em condições específicas.

O potencial energético do biogás depende da concentração de metano na mistura, ou seja, quanto maior a concentração desse composto, maior é o poder calorífico do mesmo. Além desse, outros elementos constituintes do biogás, que possuem concentrações variáveis, dependentes do tipo de biodigestor, substrato a digerir, entre outros. As concentrações médias das substâncias presentes no biogás produzido a partir e dejetos de suíno são apresentadas na Tabela 3. (GUSMÃO, 2008)

Tabela 3 - Composição média do biogás

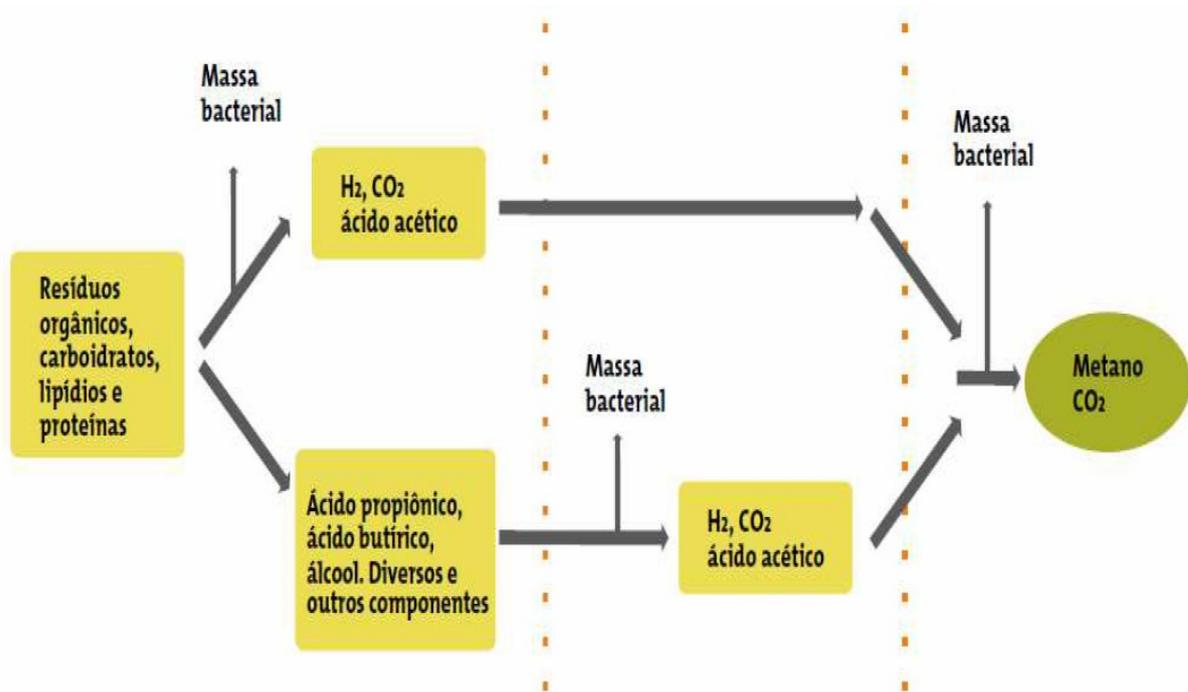
<b>Componente</b>	<b>Teor em volume %</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 75
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 40
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1 a 3
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0,5 a 2,5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1 a 1
Gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 a 1
Amônio (NH <sub>3</sub> )	0,1 a 0,5
Monóxido de carbono (CO)	0 a 0,1
Água (H <sub>2</sub> O)	Variável

Fonte: (GUSMÃO, 2008).

### 3.4 Formação do gás

A formação do biogás passa por diferentes etapas, as quais estão representadas na Figura 1 e serão abordadas em mais detalhes a seguir.

Figura 1 - Fases de produção do biogás (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

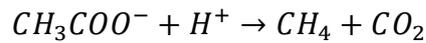


Na primeira etapa, as bactérias hidrolíticas e fermentativas convertem a matéria orgânica em moléculas menores. As primeiras, hidrolíticas, transformam proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos, gorduras em ácidos graxos, pela ação de enzimas extracelulares, como a protease, a amilase e a lipase. Já as bactérias fermentativas são responsáveis por transformar esses produtos em ácidos solúveis (ácido propiônico e butírico), álcoois e outros compostos (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

Na segunda fase, as bactérias acetogênicas são responsáveis pelas reações. Essas irão transformar os produtos obtidos na primeira etapa em ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), hidrogênio e dióxido de carbono. Um diferencial dessas bactérias é que elas são facultativas, ou seja, elas podem atuar tanto em meio aeróbio como anaeróbio (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

A terceira e última etapa é a responsável pela formação do produto desejado, o metano, como é observado na Equação 1. Nessa fase as bactérias metanogênicas, que formam o metano, reagem com o ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), hidrogênio e dióxido de carbono, obtendo como produto metano e dióxido de carbono. As bactérias atuantes nesse processo são mesofílicas e vivem entre 35 e 45 °C. Além disso, são

extremamente sensíveis a mudanças no meio, especialmente de temperatura e de pH (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).



Equação 1 - Reação da terceira fase

Salienta-se a importância da acidez do processo, uma vez que as bactérias produtoras do metano sobrevivem numa faixa de pH entre 6,5 e 8,0. Nas etapas 1 e 2 há a formação de ácidos a partir da digestão anaeróbia, e esses ácidos são consumido pelas bactérias metanogênicas, mantendo o meio neutro. (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

Outro ponto de extrema importância é que os critérios essenciais de sustentação de vida dos microrganismos anaeróbios sejam atendidos, sendo entre eles a necessidade da impermeabilidade do meio metanogênico ao contato com o ar atmosférico, quantidade suficiente de nutrientes orgânicos, ausência de substâncias tóxicas aos organismos anaeróbicos e teor de água adequado (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

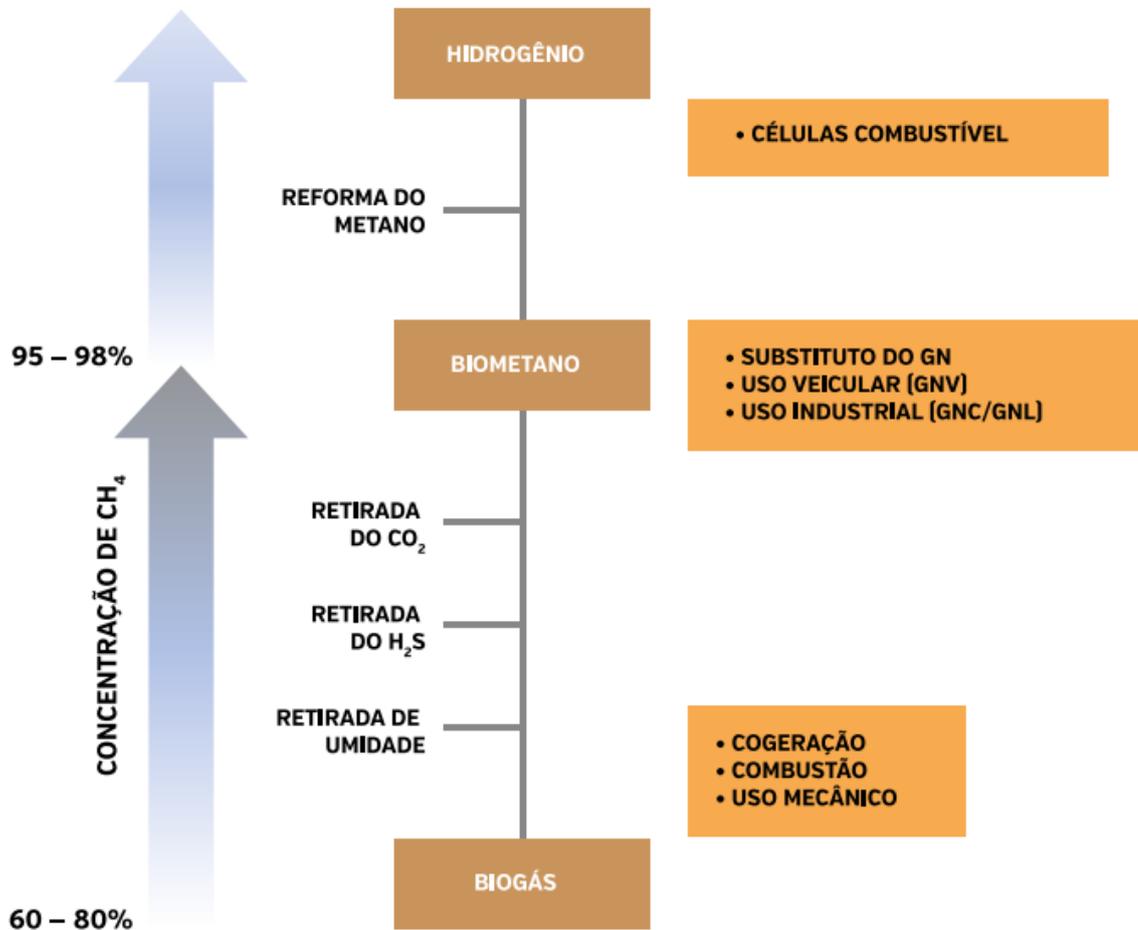
Por outro lado, temos as necessidades dos microrganismos anaeróbicos. Cesar (2016) aborda esse ponto:

As atividades biológicas dos microrganismos anaeróbicos, em desenvolvimento, reprodução e metabolismo, prescindem da presença de oxigênio, o qual, dependendo do tempo de exposição dos microrganismos lhes é fatal. Sabe-se que a decomposição de biomassa em contato com o oxigênio produz dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), enquanto que, na ausência de ar (e, portanto, oxigênio) é produzido o gás metano. Qualquer falha na vedação do biodigestor inibe, quando não inviabiliza, a produção de biogás. (CESAR, 2016).

### 3.5 Uso do biogás

As aplicações do biogás são inúmeras, porém a Figura 2 mostra uma breve introdução ao tema, demonstrando o resumo das possibilidades de utilização desse gás e a qualidade de gás requerida para cada um dos processos descritos.

Figura 2 - Alternativas do uso de biogás (THIEME *et al.*, 2015).



### 3.5.1 Geração de energia térmica

O biogás pode ser empregado na produção direta de calor, sendo realizado por meio da sua queima direta. Esse processo pode ser utilizado em diferentes escalas de produção de gás, com sistemas de combustão adequados a esse combustível. Em casos mais específicos, como em algumas indústrias, o biogás pode ser utilizado como substituto do gás natural, porém é importante ressaltar que são necessários estudos para que essa substituição ocorra, uma vez que a composição dos gases é diferente. (THIEME *et al.*, 2015). Adicionalmente, a qualidade do biogás deverá ser avaliada a fim de verificar a compatibilidade com o sistema de conversão a ser utilizado.

### 3.5.2 Geração de energia elétrica

Um dos usos mais comuns do biogás é para geração de energia elétrica. Na Alemanha o principal uso desse gás se destina à geração distribuída de energia em

ciclos combinados de geração de energia e calor (*Combined Heat and Power - CHP*). Esses equipamentos consistem, basicamente, de um motor de combustão e um gerador acionado pelo mesmo (Figura 3), resultando em energia elétrica. O gerador também pode ser acionado por outros tipos de motores ou turbina a gás (THIEME *et al.*, 2015).

Figura 3 - J620 Jenbacher motor a biogás da GE Distributed Power. (THIEME *et al.*, 2015)



Além das opções mais difundidas de geração de energia, existe uma outra possibilidade que tem ganhado destaque em função da sua alta eficiência, a utilização do biogás em células de combustível. Nesse caso, o biogás deve ser purificado, uma vez que os contaminantes catalíticos devem ser removidos. Além disso, o metano deve ser transformado em hidrogênio, algo que ainda inviabiliza o uso dessa tecnologia em escala em função do custo envolvido (THIEME *et al.*, 2015).

### 3.6 Biodigestores

O biodigestor pode ser definido como uma câmara na qual ocorre um processo bioquímico denominada digestão anaeróbia, que tem como resultado a formação de biofertilizantes e o biogás. (MAGALHAES, 1986).

Para que o processo de digestão ocorra é necessária a existência de matéria orgânica, que neste trabalho consiste em dejetos animais, mais especificamente, dejetos de suínos. O tratamento desses dejetos pelo método em questão possui diversas vantagens, tais como: capacidade de estabilizar grandes volumes de dejetos orgânicos diluídos a um baixo custo, destruição de organismos patogênicos e

parasitas, além de geração de um biocombustível gasoso que pode ser usado como fonte de energia renovável(SÁNCHEZ *et al.*, 2005).

Os biodigestores são utilizados há anos em escala mundial, países como a Índia e a China foram os precursores desta tecnologia, construindo-os desde 1908. No Brasil os biodigestores rurais tiveram maior desenvolvimento em 1980 quando contaram com grande apoio dos Ministérios da Agricultura e de Minas e Energia. Na época cerca de 8000 unidades foram construídas (COELHO; PALETTA; FREITAS, 2000).

A difusão da tecnologia de biodigestão no Brasil enfrenta dificuldades decorrentes de: escassez de recursos financeiros, custo relativamente elevado dos biodigestores, falta de mentalidade relacionada com a importância de um programa de formação de recursos humanos para dar apoio à sua implantação, manutenção e desenvolvimento de tecnologia alternativa quanto ao projeto e materiais de construção a serem utilizados. Além disso, há pouca credibilidade quanto à tecnologia devido ao descrédito decorrente de erros de projeto, execução, operação ou manutenção. (ANDRADE *et al.*, 2002).

Apesar de ser conhecido somente por biodigestor, existem diversas variações e modelos do mesmo. Segundo Nogueira (1986), não existe um tipo de biodigestor anaeróbico para cada situação. Sempre devem ser levados em conta os aspectos operacionais da aplicação específica, fazendo com que o sistema atenda ao conjunto de condições e necessidades.

Os modelos de biodigestores podem ser separados em dois grandes grupos, os descontínuos e os contínuos. Os que operam em regime descontínuo são de fermentação em batelada, batelada alimentada e semi-contínua, sendo esses caracterizados por terem um tempo fixo de retenção, e serem esvaziados completamente após esse período (SASSE, 1988). Já as plantas de operação contínua são abastecidas e desabastecidas com o uso da gravidade sem necessidade de bombeamento. O termo 'contínua' não impõe uma alimentação constante, mas em intervalos regulares de tempo. (NOGUEIRA, L. A. H., 1986).

### 3.6.1 Biodigestor modelo chinês

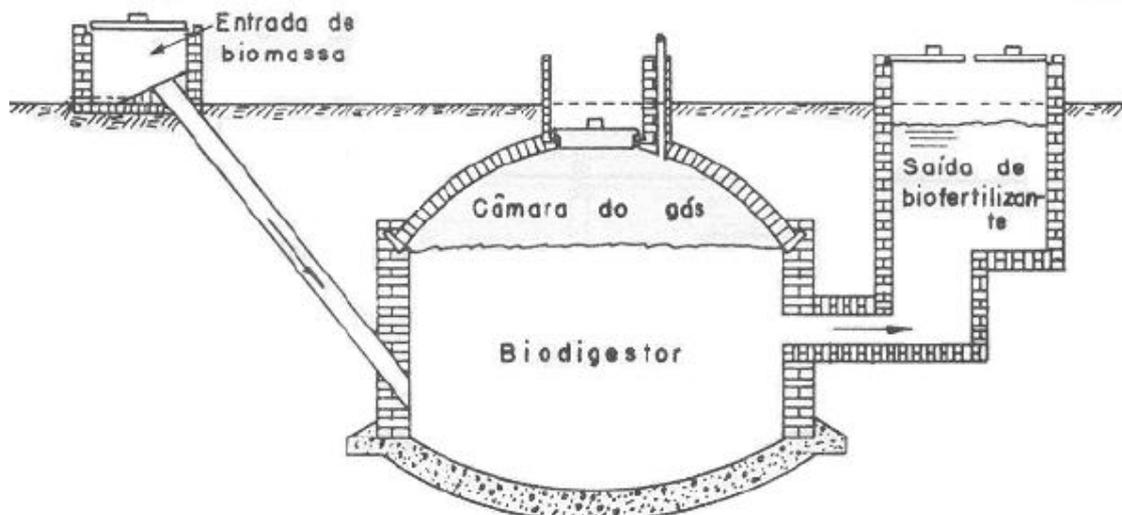
O biodigestor de modelo chinês foi desenvolvido para pequenas propriedades rurais. É um modelo de peça única, imóvel, de alvenaria e enterrado no solo, visando

ocupar o menor espaço possível. Basicamente, é composto por um local de entrada, onde será colocado o material a ser digerido; a câmara principal, na qual ocorre a digestão; e a parte de saída dos dejetos pós digestão (biofertilizante). Em função de a sua cúpula ser fixa e de alvenaria, isso torna essa arquitetura a mais barata para a pequena escala. O funcionamento do mesmo ocorre, normalmente, em alta pressão, a qual varia em função da produção e do consumo de biogás. O modelo pode ser observado na Figura 4 e na Figura 5. (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

Figura 4 - Biodigestor modelo chinês (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).



Figura 5 - Biodigestor modelo chinês com descrição (HENN, 2005)

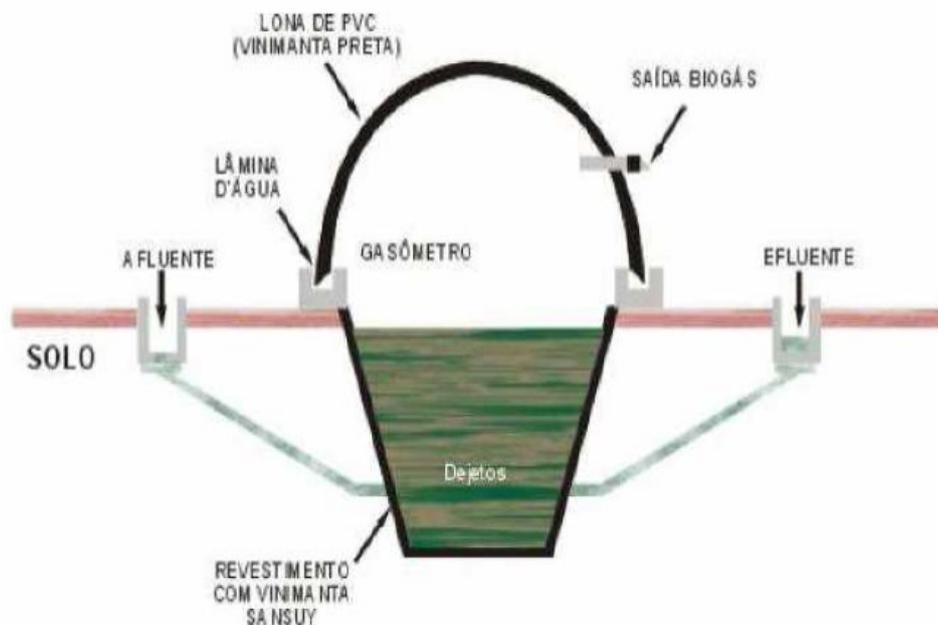


Em função do sistema ser enterrado, ele não é recomendado para solos superficiais. Além disso segundo Cesar (2016) uma das grandes desvantagens do mesmo é em relação à área de reserva de biogás, uma vez que nesse biodigestor ela é menor devido à sua cúpula ser fixa, fazendo com que ele não seja próprio para acúmulo de gás, logo é mais indicado para a produção de biofertilizante.

### 3.6.2 Biodigestor de fluxo tubular (Canadense)

Este sistema foi desenvolvido pela Marinha brasileira na década de 1970. Esse, também conhecido como lagoa anaeróbia coberta, apresenta uma base quadrangular, com paredes revestidas por lona impermeável, e uma cúpula de lona também impermeável. É um modelo mais raso e longo, o que lhe garante uma maior produtividade de gás por massa fermentada. Assim como a maioria dos outros modelos, esse é constituído de uma seção de entrada da matéria orgânica; a câmara principal, na qual ocorre a digestão; e uma seção de saída dos dejetos pós digestão (biofertilizante), como pode ser observado na Figura 6 (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

Figura 6 - Biodigestor de fluxo tubular (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016)



César (2016) ressalta em sua monografia as vantagens e desvantagens desse sistema.

A utilização deste modelo é mais indicada para projetos industriais e agroindustriais por ser versátil ao uso de diferentes resíduos orgânicos e ser capaz de armazenar grande quantidade de resíduos passíveis à fermentação

anaeróbica, produzindo assim uma grande quantidade de biogás e estabilizando os dejetos que podem ser utilizados como biofertilizante. Porém, uma limitação em sua utilização seria em relação ao espaço físico para sua instalação, por apresentar uma menor profundidade, há necessidade de uma extensa área superficial para armazenar uma notável quantidade de resíduos (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016).

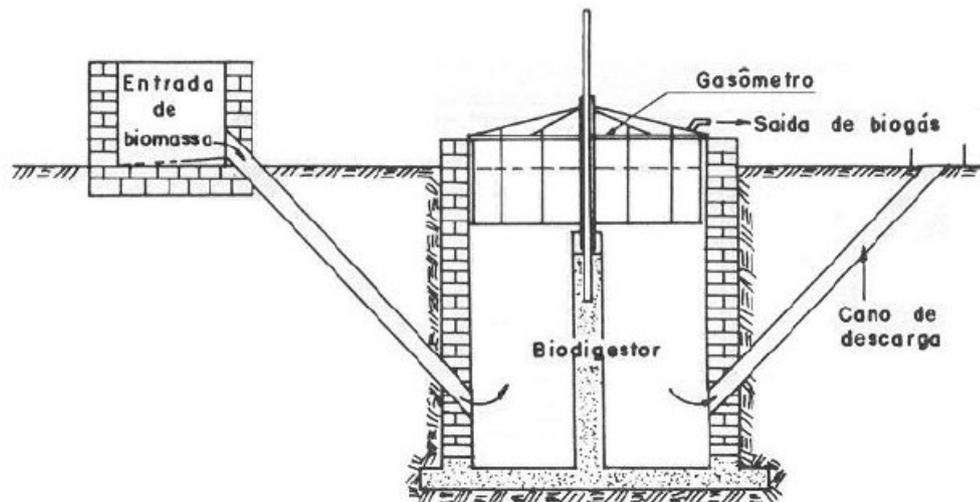
### 3.6.3 Biodigestor modelo indiano

O modelo indiano de biodigestor é constituído por um setor de entrada, onde será colocado o material a ser digerido; a câmara principal, na qual ocorre a digestão, sendo essa coberta por um gasômetro móvel bidirecional, que se move dependendo da quantidade de gás gerado, mantendo a pressão constante; e a parte da saída dos dejetos pós digestão (biofertilizante). Esse modelo pode ser observado na Figura 7 e na Figura 8 (SASSE, 1988).

Figura 7 - Vista tridimensional do modelo Indiano (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016)



Figura 8 - Biodigestor indiano com indicações (HENN, 2005)



Segundo Henn (2005) uma das grandes vantagens desse modelo é em relação à sua campânula flutuante, a qual permite manter a pressão de escape de biogás estável. Porém, uma desvantagem razoavelmente significativa é em relação ao alto custo do mesmo, uma vez que essa parte é confeccionada em ferro.

#### 3.6.4 Biodigestor modelo paquistanês

Este modelo é uma adaptação do modelo indiano, sendo a única alteração a ausência de um tubo de saída para o biofertilizante, o qual sai por um ladrão na borda superior do biodigestor (HENN, 2005).

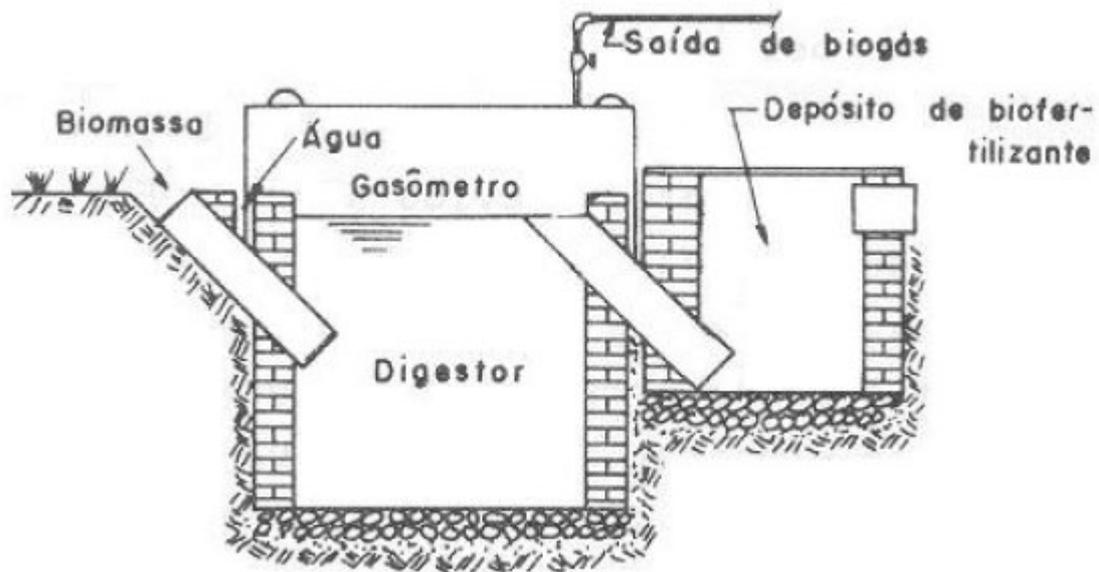
#### 3.6.5 Biodigestor modelo tailandês

O modelo tailandês é uma variação do modelo paquistanês, nesse caso o gasômetro não fica completamente livre, possuindo níveis máximos e mínimos (HENN, 2005).

#### 3.6.6 Biodigestor modelo filipino

Este modelo também é uma variação do modelo indiano, foi desenvolvido para simplificar ainda mais o processo de construção, porém, contendo as mesmas partes que o original. As modificações podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9 - Biodigestor modelo filipino (HENN, 2005)



### 3.6.7 Biodigestor descontínuo (batelada)

Segundo Cesar (2016) o biodigestor descontínuo é relativamente simples e possui uma operação fácil. Basicamente, o sistema tem que ser alimentado com toda a carga orgânica de uma só vez, mantendo-se em fermentação por um período conveniente, sendo o material descarregado após o término do período efetivo de produção do biogás. O sistema pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Biodigestor modelo de batelada (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016)

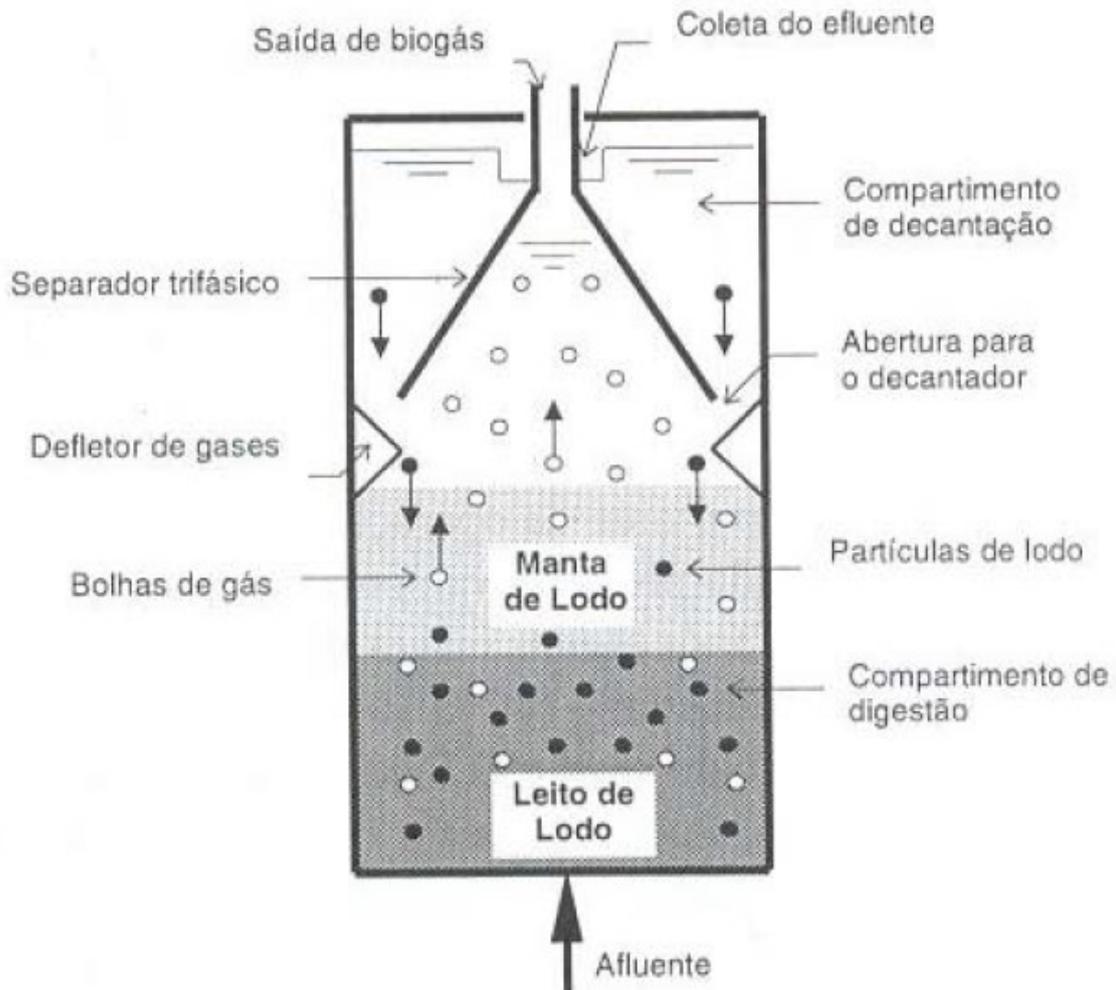


Uma vez que esse modelo não opera com carga contínua, ele se adapta melhor em locais onde a geração de matéria orgânica é periódica, como é o caso de granjas avícolas de corte, cuja biomassa fica à disposição após a venda dos animais e a limpeza do galpão (CÉSAR; SANTOS; CARVALHO, 2016) .

#### 3.6.8 Reator UASB

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) que em tradução direta significa “Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo”, é um sistema muito utilizado para tratamento de anaeróbio de efluentes líquidos, uma vez que apresenta maior eficiência quando comparado com outros sistemas de tratamento. (HENN, 2005).

Segundo Aisse (2000), o reator UASB (Figura 11) consiste basicamente de um tanque Imhoff de fluxo vertical, apresentando câmaras de sedimentação e digestão anaeróbia sobrepostas. Souza (1986) cita que o esgoto a ser tratado é distribuído uniformemente no fundo do reator e passa através de uma camada de lodo biológico, no qual ocorrerá o processo de formação do biogás. Para evitar a entrada do gás produzido no sedimentador, são utilizados defletores. A porção de lodo que atinge o sedimentador é separada (fisicamente) e retorna ao fundo do reator. O efluente é retirado uniformemente da superfície do sedimentador.

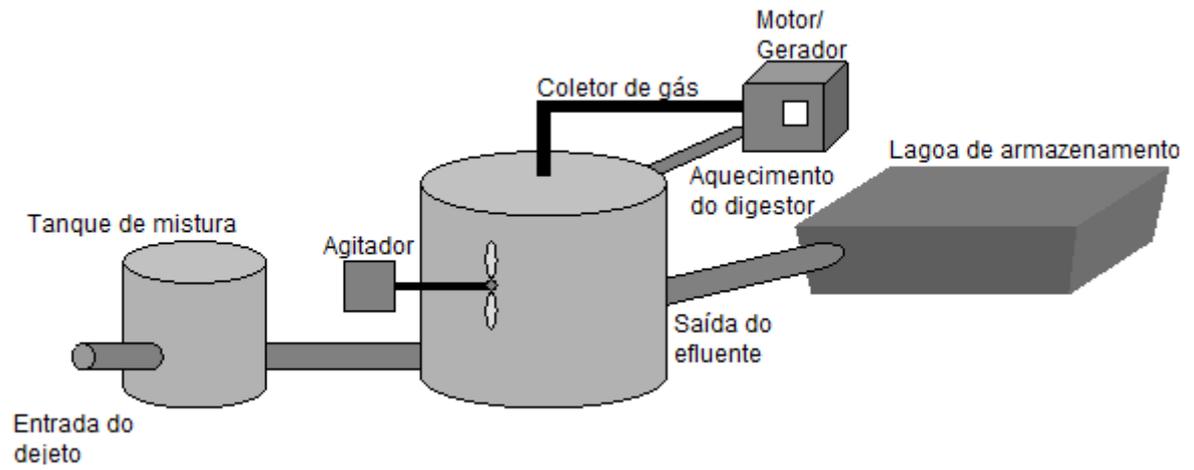
Figura 11 - Reator UASB (AISSE *et al.*, 2000)

### 3.6.9 Reator de mistura completa (*Complete mix*) (*Stirred Tank Reactors - STR*)

Um reator de mistura completa (Figura 12) consiste em uma grande estrutura de concreto ou metal, enterrada ou sobre o solo. Nesse biodigestor os dejetos são misturados mecanicamente, aumentando assim o contato do substrato com as bactérias, ou seja, uma maior homogeneidade do meio reacional, resultando em melhores condições para as reações que geraram o biogás, (MORIARTY, 2013)

Por conter um sistema de agitação, esse biodigestor é mais indicado para substratos mais secos, no caso de dejetos animais é recomendado que o teor de massa seca do efluente seja de (3-10%). Além disso, por conter mais tecnologia embarcada, o tempo de retenção hidráulica para dejetos animais é em torno de (20-25) dias (WILKIE, 2005).

Figura 12 - Reator de mistura completa (MORIARTY, 2013)



## **4 METODOLOGIA**

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho estão descritos nas seções que se seguem.

### **4.1 Revisão bibliográfica sobre purificação de biogás**

Para que o objetivo de fazer um referencial bibliográfico sobre a purificação do biogás com informações presentes na literatura internacional pudesse ser atendido foram realizadas visitas e consultas em diversos locais.

A biblioteca da *Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg* em Rottenburg (Neckar) na Alemanha foi fundamental para consulta, uma vez que a entidade abriga o curso de Energias Renováveis. No local foi possível obter relatórios técnicos e livros com informações completas das tecnologias envolvidos na purificação de biogás. Além disso foi possível observar demonstrações, explicações e informações sobre o tema, sendo esses realizados por meio dos alunos e professores da instituição.

Outro local fundamental para obtenção das informações foi a empresa *ECO Erneubare Energie GmbH* sediada em Rotenburg (Wümme) também na Alemanha. Por meio dela foi possível utilizar materiais contidos na literatura alemã, além de informações com os engenheiros que lá trabalham.

Os dados utilizados sobre outros países foram obtidos por meio de consulta na internet, tendo sido utilizados artigos em alemão, inglês, português e espanhol para a consulta.

### **4.2 Obtenção de dados referentes à geração de biogás por quilograma de dejetos**

Os dados de geração de biogás utilizados pela maioria dos autores se refere à produção de biogás por matéria seca, dado o qual é dependente de cada produtor rural. Porém, como o intuito é encontrar uma expectativa de geração, foram feitas algumas considerações para que o valor de geração de biogás por animal pudesse ser obtido.

A geração diária de dejetos por animal (Tabela 1, Seção 3.2.1), foi estimada para cada uma das 3 principais fases da vida dos suínos.

Para que os cálculos de estimativas de biogás fossem realizados, se optou por utilizar o valor de porcentagem de matéria seca (Tabela 2, Seção 3.2.2) de 4,51%, referente ao *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe* (2013), por ser a biografia mais atual disponível.

### **4.3 Levantamento bibliográfico de propriedades de suinocultura que utilizam biodigestores para produção de biogás**

Depois de ter obtido os dados de geração teórica de biogás, buscou-se validar esses dados comparando-os com os dados reais, obtidos por outros autores que realizaram as medições in loco. Para isso foram levantadas 14 propriedades de criação de suínos no Brasil, as quais já produzem biogás. Além disso, levou-se em conta a necessidade de buscar propriedades com sistemas de criação diferentes e que possuíam suínos em diferentes etapas de vida.

Além das propriedades brasileiras, levantou-se 11 propriedades americanas de criação de suínos, para que fosse possível comparar a produção de biogás com tecnologia e locais distintos.

Tanto para as propriedades nacionais quanto para as internacionais, foram levantados os seguintes dados:

- Número de animais;
- Tipo de biodigestor;
- Geração diária de gás;
- Localização.

### **4.4 Comparação dos dados de produção teóricos e práticos obtidos na literatura**

Para verificar a efetividade dos dados teóricos levantados, foi realizada uma comparação entre a produção de biogás teórica, a obtida nas propriedades brasileiras e nas propriedades estrangeiras.

Em função da falta de informações detalhadas das propriedades levantadas, tornou-se inviável a comparação dos dados levando em consideração o tipo de criação de cada uma delas. Por isso, decidiu-se utilizar as médias de produção em cada um dos casos.

Para cada autor pesquisado estabeleceu-se uma média aritmética (Equação 2) de produção diária de biogás por cabeça de animal, considerando então a produção diária de biogás das 3 principais etapas de vida de um suíno, a fase inicial (filhote), fase de engorda e a fase de lactação.

Equação 2 - Média aritmética da produção de biogás de suínos

$$\frac{m_{biogás}^3}{dia * animal} = \frac{\left( \frac{m_{biogás\ filhote}^3}{dia * animal} + \frac{m_{biogás\ engorda}^3}{dia * animal} + \frac{m_{biogás\ lactação}^3}{dia * animal} \right)}{3}$$

Da mesma maneira que foi feito com os dados teóricos, utilizou-se os dados obtidos nas propriedades para que se pudesse obter o valor médio de produção diária de biogás por cabeça de animal. Nessa situação foram calculadas duas médias, uma para as propriedades nacionais e outra para as internacionais.

Além da comparação direta da produção de biogás, também foram segmentadas as propriedades de outras duas formas: tipo de criação dos animais e pelo tipo de tecnologia utilizada no local.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Técnicas de purificação do biogás

Em sua forma bruta, o biogás é completamente saturado de vapor de água, metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além disso, contém sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que tem grande potencial corrosivo. (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010)

Geralmente não é possível aproveitar diretamente o biogás bruto, por este motivo, é necessário que o gás seja submetido a vários estágios de purificação, os quais vão depender da aplicação final do gás. (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

Na aplicação para geração de energia elétrica é necessário que o biogás utilizado siga as condições exigidas pelo fabricante do equipamento. No caso dos motores Caterpila (Figura 13), desenvolvidos para biogás, as condições de operação são apresentadas na além de comparar os valores com um motor normal, que não é específico para biogás (CATERPILA, 2017).



Figura 13 - Grupo gerador a biogás CAT G3406 (CATERPILA, 2017)

Tabela 4 - Condições mínima de qualidade de gás para motor Caterpila

<b>Elementos</b>	<b>Motor normal</b>	<b>Motor a biogás Caterpila</b>
Compostos de enxofre [mg H <sub>2</sub> S/MJ]	0,43	57
Compostos de Haleto [mg Ci/MJ]	0	19
Amonia [mg NH <sub>3</sub> /MJ]	0	2,81
Teor de óleo [mg/MJ]	1,19	1,19
Partículas no combustível [mg/MJ]	0,8	0,8
Tamanho de partículas no combustível [micrómetro]	1	1
Temperatura máxima [°C]	60	60
Temperatura mínima [°C]	-10	-10
Quantidade de água	Combustível ou ar saturados são aceitos. Condensação de água nas linhas de combustível ou no motor, não são aceitáveis. O limite recomendado de umidade relativa é de 80% na menor temperatura de operação do combustível.	

Fonte: (CATERPILA, 2017)

A aplicação do gás como biometano, metano obtido a partir do biogás, necessita de uma rigorosa purificação, uma vez que existem inúmeras possibilidades de utilização para o mesmo. As condições exigidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2015) são apresentadas na Tabela 5

Tabela 5 - Condições mínimas para utilização de biometano no Brasil

<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite</b>	
		<b>Região Norte - Urucu</b>	<b>Demais Regiões</b>
Metano	% mol.	90,0 a 94,0	96,5 mín.
Oxigênio, máx.	% mol.	0,8	0,5
CO <sub>2</sub> , máx.	% mol.	3,0	3,0
CO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , máx.	% mol.	10,0	3,5
Enxofre Total, máx.	mg/m <sub>3</sub>	70	70
Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S), máx.	mg/m <sub>3</sub>	10	10
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	°C	-45	-45

Fonte: (ANP, 2015)

### 5.1.1 Dessulfurização

Existem diversos processos para realizar a remoção de H<sub>2</sub>S do biogás. Esse são classificados em biológicos, químicos e físicos, podendo ainda ser dividido em dessulfurização fina ou grossa (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

Na Tabela 6 é possível observar um resumo das tecnologias disponíveis para dessulfurização do gás. Para a correta interpretação da tabela, a seguinte legenda deve ser utilizada, ++ muito vantajoso, + vantajoso, o neutro, - desvantajoso e -- muito desvantajoso.

Tabela 6 - Processos de dessulfurização

Processo	Consumo energético		Insumos indiretos		Injeção de ar	Pureza em ppmv
	Elétrico	Térmico	Consumo	Eliminação		
Biodessulfurização no digestor	++	o	++	++	Sim	50-2000
Biodessulfurização em biodigestores externos	-	o	+	+	Sim	50-100
Lavador biológico de gás	-	o	-	+	Não	50-100
Precipitação de sulfeto	o	o	--	o	Não	50-500
Dessulfurização química interna	o	o	--	--	Sim	1-100
Carvão ativado	o	o	--	-	Sim	<5

Fonte: ROHSTOFFE; PATERSON; KUHN, 2010

#### 5.1.1.1 Biodessulfurização no digestor

Na presença de oxigênio, a bactéria *Sulfobacter oxydans* converte o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar, que em seguida é descarregado do reator como o biofertilizante. Como essa bactéria é onipresentes, não há necessidade de ser adicionada ao processo (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

Para que a injeção controlada de oxigênio seja feita no biodigestor, são utilizados sopradores de ar (Figura 14), podendo-se utilizar uma bomba de aquário ou um minicompressor. Para locais onde este gás será utilizado para geração de energia via combustão, não há problema, porém, esse processo não é recomendado para

obtenção de biometano, uma vez que as altas concentrações de nitrogênio e oxigênio dificilmente podem ser eliminadas, o que piora as propriedades de combustão do gás (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

Figura 14 - Controle de gás para injeção de ar no gasômetro do biodigestor (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010)



#### 5.1.1.2 Biodessulfurização no digestor (Técnica dos filtros percolados)

Para evitar as desvantagens citadas na biodessulfurização no digestor, existe a possibilidade de conduzir esse processo externamente. Para isso, existem colunas de biodessulfurização (Figura 15) dispostas em reservatório separados. Dessa maneira o processo de injeção de ar pode ser melhor controlado. Porém, mesmo com um melhor controle, esse processo continua não sendo recomendado para propriedades que desejam injetar o biogás em redes de gás natural, uma vez que também utiliza ar (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

Figura 15 - Coluna de biodessulfurização externa, à direita ao lado de um gasômetro (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010)



#### 5.1.1.3 Lavador biológico de gás

Ao contrário dos dois primeiros sistemas apresentados, o lavador biológico de gás é constituído por apenas um processo biológico. O instituto *Fachagentur Nachwascsende Rohstoffe* (2010) cita em sua publicação a seguinte definição para o processo:

“O lavador biológico de gás constitui um único processo biológico para o tratamento visando a qualidade de gás natural. O sistema de dois estágios é composto de uma coluna de lavagem recheada (absorção do  $H_2S$  por meio de solução de soda cáustica diluída), um biodigestor (regeneração da solução de lavagem com oxigênio do ar) e um separador de enxofre (remoção do enxofre elementar). Por meio da regeneração separada, evita-se a injeção de ar no biogás. Embora essa tecnologia permita a eliminação de grandes cargas de enxofre (até  $30.000\text{ mg/m}^3$ ), com resultados semelhantes aos do filtro percolador, ela só é indicada para usinas com grandes vazões de gás ou elevadas cargas de  $H_2S$  em função da alta complexidade do equipamento exigido.”

#### 5.1.1.4 Precipitação de sulfeto

Este tipo de dessulfurização consiste em um processo químico associado ao biodigestor. Pela adição de compostos de ferro no biodigestor, o enxofre é ligado quimicamente ao substrato de fermentação, o que permite suprir a liberação de sulfeto de hidrogênio. Esse método é recomendado para usinas de pequeno porte ou usinas com baixa carga de  $H_2S$  ( $< 500$  ppm) (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.1.5 Carvão ativado

A adsorção em carvão ativado se baseia na oxidação catalítica do sulfeto de hidrogênio na superfície do carvão ativado. Para otimização do processo é possível dopar o carvão para aumentar a velocidade da reação e melhorar a capacidade de carga. A dessulfurização adequada exige a presença de vapor e oxigênio, fazendo com que o processo não seja recomendado para gases isentos de ar ou  $O_2$ . Porém, em 2010 foi lançado o carvão ativado dopado com permanganato de potássio, o que permite realizar a reação sem a necessidade de ar ou  $O_2$  (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

### 5.1.2 Remoção da umidade

Para evitar que componentes envolvidos na geração e processamento do biogás sejam danificados, o vapor de água contido no gás deve ser removido. No biodigestor a umidade relativa do biogás se encontra em 100%, ou seja, completamente saturado. Para que essa umidade possa ser retirada, pode-se utilizar a secagem por condensação, secagem por adsorção (sílica gel ou carvão ativado) ou a secagem por absorção (desidratação por glicol) (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.2.1 Secagem por condensação

Este processo baseia-se no princípio da separação do condensado pelo resfriamento do biogás abaixo do ponto de orvalho. Para esse resfriamento, frequentemente, é utilizada a própria tubulação de gás, o condensado é recolhido por um purgador no ponto mais baixo da tubulação. Um ponto a ser considerado é que a tubulação deve ser dimensionada de maneira longa, para que haja tempo suficiente para o gás resfriar. Uma outra opção é a utilização de água fria para uma refrigeração

externa do tubo, fazendo com que a temperatura interna diminua mais rapidamente (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.2.2 Secagem por adsorção

Este tipo de processo utiliza zeólitos, sílica gel ou óxido de alumínio, resultando em um nível de umidade muito menores do que o obtido pela secagem por condensação. Instalados em um leito fixo, os adsorventes são operados alternadamente a uma pressão de (6-10) bar e se destinam a fluxos volumétricos de gás pequenos a médios. Os materiais adsorventes podem ser regenerados a quente ou a frio. Em função dos resultados obtidos, esse processo é recomendado para qualquer aplicação do biogás (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.2.3 Secagem por absorção

A desidratação por glicol é um processo físico de absorção em que o gás flui em uma torre absorvedora em contra-corrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol. Dessa maneira, existe uma remoção tanto do vapor quanto dos hidrocarbonetos superiores contidos no biogás. Nesse processo, a regeneração do material se dá pelo aquecimento da solução até a temperatura de 200 °C. Em termos econômicos, essa técnica é indicada para vazões volumétricas maiores (500m<sup>3</sup>/h) e também garante o teor de umidade do biogás para qualquer aplicação (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3 Remoção do dióxido de carbono

Dentre as aplicações do biogás, uma delas é a injeção na rede de gás natural. Para isso, é necessário que vários requisitos sejam atendidos, dentre eles a ausência de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no gás. Os processos mais difundidos na Europa para esta etapa da purificação são os seguintes, adsorção com modulação de pressão, lavagem com água sob pressão e lavagem química.

##### 5.1.3.1 Adsorção com modulação de pressão (PSA)

O uso de carvão ativado, peneiras moleculares (zeólitos) e peneiras moleculares de carbono para separação física de gás constituem a técnica de adsorção com modulação de pressão (PSA: *Pressure Swing Adsorption*). Com essa tecnologia é possível obter metano com 97% de pureza, podendo-se ter esse valor aumentado

com a inclusão de mais filtros no processo. Esta tecnologia possui a seguinte vantagem: se operada corretamente, os intervalos de manutenção dos adsorventes são praticamente infinitos desde que o gás bruto não contenha enxofre nem vapor de água. Um outro ponto a ser ressaltado dessa tecnologia é que as perdas de metano do processo são relativamente altas, sendo de aproximadamente (1-5%) (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3.2 Lavagem com água sob pressão

O processo de lavagem de gás com água sob pressão é o sistema mais difundido na Europa, estando presente em praticamente metade dos sistemas que possuem purificação. Esse processo funciona basicamente utilizando a diferença de solubilidade da água em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Este tratamento tem início com a compressão do biogás, o qual é primeiramente comprimido até 3 bar e logo em seguida comprimido até 9 bar, antes de passar em contra-corrente pela torre absorvedora carregada com  $\text{H}_2\text{O}$ . Na torre, o sulfeto de hidrogênio, o dióxido de carbono e a amônia se dissolvem na água, bem como as partículas e os microrganismos eventualmente presentes no gás. Após a redução de pressão da água, essas substâncias são removidas do sistema. As vantagens deste sistema são que a pressão pode ser regulada, permitindo que gases com diferentes quantidades de  $\text{CO}_2$  possam ser tratados, além de possuir uma operação automática e de fácil manutenção. A desvantagem desse processo seria o alto consumo energético e as grandes perdas de metano ao longo do sistema (próximas de 1%) (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3.3 Lavagem química

O processo de lavagem química é uma técnica de absorção em que o biogás não precisa ser pressurizado. Nesse sistema o gás é colocado em contato com uma solução de lavagem que irá absorver o dióxido de carbono. Os meios de lavagem normalmente utilizados são a monoetanolamina (MEA). Existe também a opção de o processo ser feito a alta pressão e utilizar uma outra solução, a dietanolamina (DEA). Para processos em que se deseja absorver não só o  $\text{CO}_2$ , mas o  $\text{H}_2\text{S}$  também, são utilizadas metildietilamina (MDEA) ou trietanolamina (TEA). Para recuperar o agente de lavagem, são instaladas fases de dessorção e regeneração à jusante da fase de absorção. Para que esse processo ocorra, é necessária uma grande quantidade de energia, o que se torna uma das principais desvantagens do mesmo. Por outro lado, o gás obtido com esse sistema resulta em metano com pureza superior a 99%, com

perda de metano inferior a 0,1%, sendo esses números excelentes quando comparados com perdas das outras tecnologias. (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3.4 Lavagem física (Selexol, Genosorb)

Este tipo de lavagem é uma evolução da lavagem sob pressão com água, o processo é muito semelhante, só que no lugar de água é utilizada uma solução de lavagem (Genosorb) a 7 bar, que em contato com o biogás remove o dióxido de carbono, o sulfeto de hidrogênio e também a água, sendo o único processo capaz de remover esses três componentes em um só passo. A solução de lavagem é regenerada por depressurização gradual a temperatura constante, seguida do jateamento com ar ambiente. As perdas de metano desse sistema ficam em (1–2%). Do ponto de vista energético, esse processo tem um consumo ligeiramente superior à lavagem com água sob pressão e o de adsorção com modulação de pressão (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3.5 Processo com membranas

O processo com membranas ainda encontra-se em desenvolvimento, porém algumas usinas já o utilizam. O processo é realizado pela separação do metano e demais componentes do gás com base nas diferentes velocidades de difusão que as diferentes moléculas do gás apresentam (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3.6 Separação criogênica

Este tratamento realiza a separação do CH<sub>4</sub> e do CO<sub>2</sub> por meio da retificação (liquefação de gases), que origina CO<sub>2</sub> líquido, ou pela separação a baixas temperaturas, que ocasiona o congelamento desse gás. Essa tecnologia consegue fornecer um gás com a concentração de metano superior a 99% tendo perda inferior a 0,1%, porém, possui um alto consumo energético para possibilitar as temperaturas de operação (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

#### 5.1.3.7 Custos das tecnologias de separação de CO<sub>2</sub>

É extremamente complexa a comparação direta entre as diferentes tecnologias disponíveis, uma vez que os parâmetros de cada tratamento variam conforme as circunstâncias do local de instalação. A Tabela 7 resume quais seriam as melhores

aplicações de cada um dos sistemas de purificação do biogás (TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, 2012).

Tabela 7 - Características dos sistemas de purificação

Tecnologia	Lavagem com água sob pressão	Lavagem física	Lavagem química	Adsorção com modulação de pressão (PSA)	Processo com membranas
Comum em planta de porte [m <sup>3</sup> /h biometano]	200-1200	300-1500	400-2000	300-800	50-500
Quantidade de metano no biogás [%]	95,0-99,0	95,0-99,0	>99,0	95,0-99,0	95,0-99,0
Recuperação de metano [%]	98	96	99,96	98	80-99,5
Perda de metano [%]	2,00	4,00	0,04	2,00	20-0,5
Pressão típica na saída do processo [bar(g)]	4-8	4-8	0	4-7	4-7
Demanda energética [kWh <sub>el</sub> /m <sup>3</sup> de biometano]	0,46	0,49-0,67	0,27	0,46	0,25-0,43
Aquecimento requerido		Mé di o	Alto		
Temperatura requerida		70-80°C	120-160°C		
Desulfurização requerida	Processo dependente	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: (TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, 2012)

Com as informações das aplicações de cada uma das tecnologias de purificação, a Tabela 8 apresenta os custos médios de investimento e de operação para os diferentes sistemas, sendo os valores referentes aos de mercado em 2012. Salienta-se que apesar das vazões de análise (100, 250 e 500 m<sup>3</sup>/h) serem relativamente pequenas para esse tipo de purificação, são quantidades muito grandes para propriedades brasileiras de suinocultura, sendo de certa forma, escassas as propriedades que teriam condições de chegar nesses valores (TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, 2012).

Tabela 8 - Comparação dos valores de investimento e operação dos sistemas de purificação

<b>Tecnologia</b>	<b>Lavagem com água sob pressão</b>	<b>Lavagem em física</b>	<b>Lavagem química</b>	<b>Adsorção com modulação de pressão (PSA)</b>	<b>Processo com membranas</b>
<b>Preço de investimento €/(m<sup>3</sup>/h) de biometano</b>					
para 100 m <sup>3</sup> /h de biometano	10100	9500	9500	10400	7300-7600
para 250 m <sup>3</sup> /h de biometano	5500	5000	5000	5400	4700-4900
para 500 m <sup>3</sup> /h de biometano	3500	3500	3500	3700	3500-3700
<b>Custos de operação centavo_€ /m<sup>3</sup> de biometano</b>					
para 100 m <sup>3</sup> /h de biometano	14	13,8	14,4	12,8	10,8-15,8
para 250 m <sup>3</sup> /h de biometano	10,3	10,2	12	10,1	7,7-11,6
para 500 m <sup>3</sup> /h de biometano	9,1	9	11,2	9,2	6,5-10,1

Fonte: (TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, 2012)

#### 5.1.4 Separação do oxigênio

A separação do oxigênio do biogás é de suma importância para injeção do gás na rede de gás natural. Os processos de tratamento que melhor se estabeleceram foram a separação por catalisadores de platina e paládio e a sorção química em contatos de cobre (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, 2010).

## 5.2 Estimativa teórica de geração de biogás

Com o objetivo de verificar a produção teórica de biogás por quilograma de matéria seca e a geração de biogás por quilograma de dejetos como um todo, a Tabela 9 apresenta esses dados, os quais foram obtidos em quatro literaturas distintas.

Tabela 9 - Geração de biogás por kg de massa seca

<b>Geração de biogás por kg de massa seca [m<sup>3</sup>/kg_Ms]</b>	<b>Geração de biogás por kg de dejetos [m<sup>3</sup>/kg de dejetos]</b>	<b>Referência</b>
0,59	0,027	BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU), 2007
0,4	0,018	FNR, 2013
0,42	0,019	EDER; KRIEG; SCHULZ, 2006
0,56	0,025	SGANZERLA, 1983

Com os dados obtidos na Seção 3.2, Tabela 1 e Tabela 9 dessa mesma seção, foi calculada a produção de biogás em cada uma das fases de vida dos suínos, os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Geração de biogás

<b>Geração de biogás [m<sup>3</sup>/animal.dia]</b>			<b>Referência</b>
<b>Filhote</b>	<b>Fase de engorda</b>	<b>Em Lactação</b>	
0,025	0,130	0,479	BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU), 2007
0,017	0,088	0,325	FNR, 2013
0,018	0,093	0,341	EDER; KRIEG; SCHULZ, 2006
0,024	0,124	0,455	SGANZERLA, 1983

### 5.3 Análise de casos reais nacionais

Nas seções seguintes serão apresentados os resultados obtidos nas propriedades brasileiras de suinocultura consideradas.

#### 5.3.1 Propriedades e tecnologias utilizadas

Por meio de uma pesquisa realizada na bibliografia nacional, foram obtidos diversos dados sobre propriedades geradoras de biogás. A pesquisa contemplou as seguintes informações sobre as localidades: o número de animais, a tecnologia do

biodigestor utilizado, o tipo de criação, a localização da propriedade e a referência de onde as informações foram retiradas. Para uma melhor observação, os dados foram agrupados na Tabela 11, ressalta-se que as informações que não foram obtidas, são representadas pelo símbolo “-”.

Tabela 11 - Propriedades nacionais estudadas

<b>Propriedade</b>	<b>Número de animais</b>	<b>Tipo de biodigestor</b>	<b>Tipo de criação</b>	<b>Localidade</b>	<b>Referência</b>
1	220	Fluxo tubular	-	Orleans (SC)	MONTEIRO, 2005
2	1100	Fluxo tubular	-	Seará (SC)	MONTEIRO, 2005
3	4800	Fluxo tubular	CC	Braço do Norte (SC)	GUSMÃO, 2008
4	720	Fluxo tubular	UPL	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
5	780	Fluxo tubular	UPL	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
6	587	Fluxo tubular	UPL	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
7	760	Fluxo tubular	UPL	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
8	640	Fluxo tubular	UCT	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
9	495	Fluxo tubular	UCT	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
10	598	Fluxo tubular	UCT	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
11	590	Fluxo tubular	UCT	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
12	810	Fluxo tubular	-	Concórdia (SC)	GUSMÃO, 2008
13	4673	Fluxo tubular	-	São Miguel do Iguaçu (PR)	AVACI et al., 2013
14	300	Fluxo tubular	CC	Braço do norte (SC)	GUSMÃO, 2008

### 5.3.2 Geração de biogás nas propriedades nacionais

Os dados de produção diária de biogás por animal das 14 diferentes propriedades também foram levantados, sendo esses apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Geração de gás nas propriedades nacionais

Propriedade	Produção de Biogas [m <sup>3</sup> /dia]	Produção diária de biogás por animal [m <sup>3</sup> /(dia x animal)]
1	39,16	0,178
2	150	0,136
3	108	0,026
4	60	0,083
5	146,4	0,188
6	108	0,184
7	146,4	0,193
8	182,4	0,285
9	170,4	0,344
10	168	0,280
11	148,8	0,252
12	144	0,178
13	554	0,118
14	38,4	0,128
<b>Média</b>		<b>0,183</b>

Salienta-se que esses dados incluem as três modalidades de criação apresentados anteriormente, UPL, UCT e CC, as quais apresentam qualidade e quantidade diferente de dejetos, influenciando nas médias de geração observadas (GUSMÃO, 2008).

Para uma melhor visualização dos dados apresentados na Tabela 12, as informações foram organizadas na Figura 16. Nele fica mais claro a disparidade de produção de gás em cada um dos locais. Também é apresentada a média de geração, a qual ficou em 0,183 m<sup>3</sup>/(dia.animal).

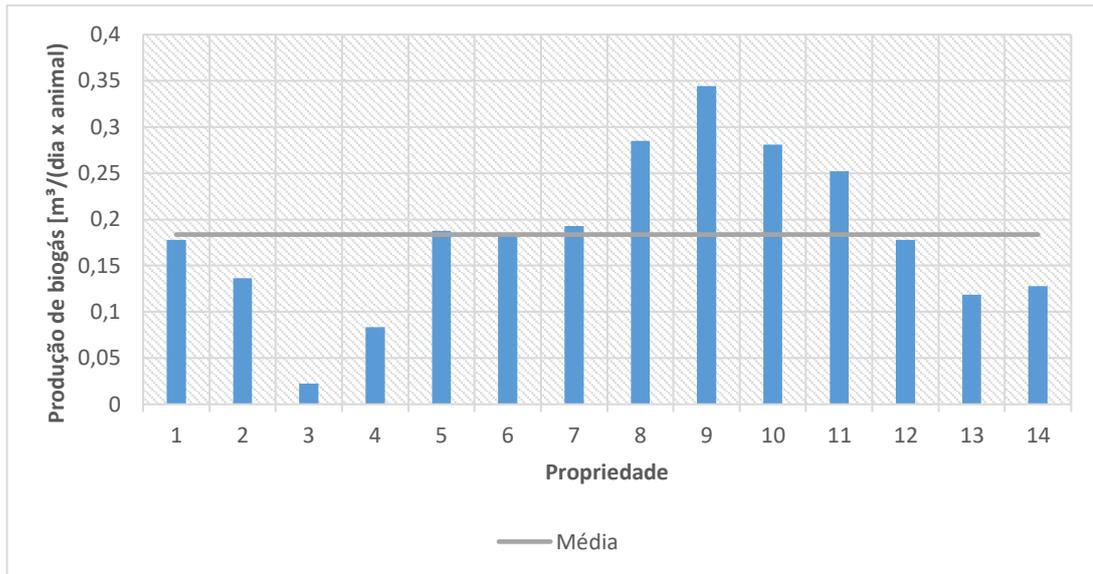


Figura 16 - Produção diária de biogás por animal nas propriedades nacionais. A diferença de produção observada está diretamente relacionada ao tipo de criação de cada local.

Apesar da maioria das propriedades apresentar um valor de produção perto da média, as propriedades 3 e 9 se destacam como os valores mínimos e máximos de geração de gás, respectivamente. Essa diferença, provavelmente, está relacionado ao tipo de criação de cada local, manejo do substrato, quantidade de água utilizado para emoção do dejetos ou até mesmo a quantidade e a frequência do uso de antibióticos nos animais, uma vez que estes interferem nas bactérias envolvidas no processo de biodegradação

#### 5.4 Análise de casos internacionais

Nas secções seguintes serão apresentados os resultados obtidos nas propriedades de suinocultura em diferentes locais do mundo.

##### 5.4.1 Propriedades e tecnologias utilizadas

Da mesma forma que foi apresentada para as propriedades brasileiras, a relação de localidades americanas de geração de biogás foi organizada na Tabela 13. Nela são mostrados o número referente a cada propriedade, a quantidade de animais na propriedade, a tecnologia do biodigestor utilizado, o tipo de criação do local, a localização da propriedade e a referência de onde as informações foram retiradas.

Tabela 13 - Propriedades americanas estudadas

<b>Propriedade</b>	<b>Número de animais</b>	<b>Tipo de biodigestor</b>	<b>Tipo de criação</b>	<b>Localidade</b>	<b>Referência</b>
15	4400	Reator de mistura completa	-	Danville, PA, EUA	AGSTAR, 2012
16	8000	Reator de mistura completa	-	Dodge, NE, EUA	AGSTAR, 2012
17	8900	Reator de mistura completa	-	RIO, IL, EUA	MOSER; MATTOCKS, 2000
18	8800	Fluxo tubular	CC	Zebulon, NC, EUA	LUSK, 1998
19	4000	Fluxo tubular	-	Zebulon, NC, EUA	MOSER, MATTOCKS, 2000
20	600	Fluxo tubular	-	South Boston, VA, EUA	MOSER; MATTOCKS, 2000
21	8640	Fluxo tubular	-	Noth Carolina, EUA	AGSTAR, 2012
22	9792	Fluxo tubular	-	Kenansville, NC, EUA	AGSTAR, 2012
23	8640	Fluxo tubular	-	Boonville, NC, EUA	AGSTAR, 2012
24	13000	Fluxo tubular com agitação	CC	Lancaster, PA, EUA	LUSK, 1998
25	3000	Fluxo tubular com aquecimento	-	South Boston, VA, EUA	LUSK, 1998

As propriedades 24 e 25 apresentam dois tipos de biodigestores modificados, os de Fluxo tubular com agitação e Fluxo tubular com aquecimento respectivamente. A diferença desses para o modelo original, é que o modelo com agitação apresenta bombas de agitação ou agitadores para recirculação do substrato, enquanto o modelo com o aquecimento apresenta aquecimento do substrato, podendo este processo ocorrer dentro do próprio biodigestor, externamente na passagem do substrato até o biodigestor ou em ambos locais.

#### 5.4.2 Geração de gás nas propriedades

A produção de biogás nas diferentes propriedades americanas é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Geração de gás nas propriedades americanas

Propriedade	Produção de biogás [m <sup>3</sup> /dia]	Produção diária de biogás por animal [m <sup>3</sup> /(dia x animal)]
15	317,148	0,072
16	991,088	0,124
17	1019,000	0,114
18	1217,000	0,138
19	793,000	0,198
20	283,500	0,472
21	1427,160	0,165
22	1183,330	0,121
23	1427,160	0,165
24	1699,008	0,131
25	285,000	0,095
<b>Média</b>		<b>0,163</b>

Para que os dados da Tabela 14 possam ser melhor analisados, as informações foram organizadas no Figura 17, que além de apresentar os dados das propriedades mostra a média de geração de biogás entre elas.

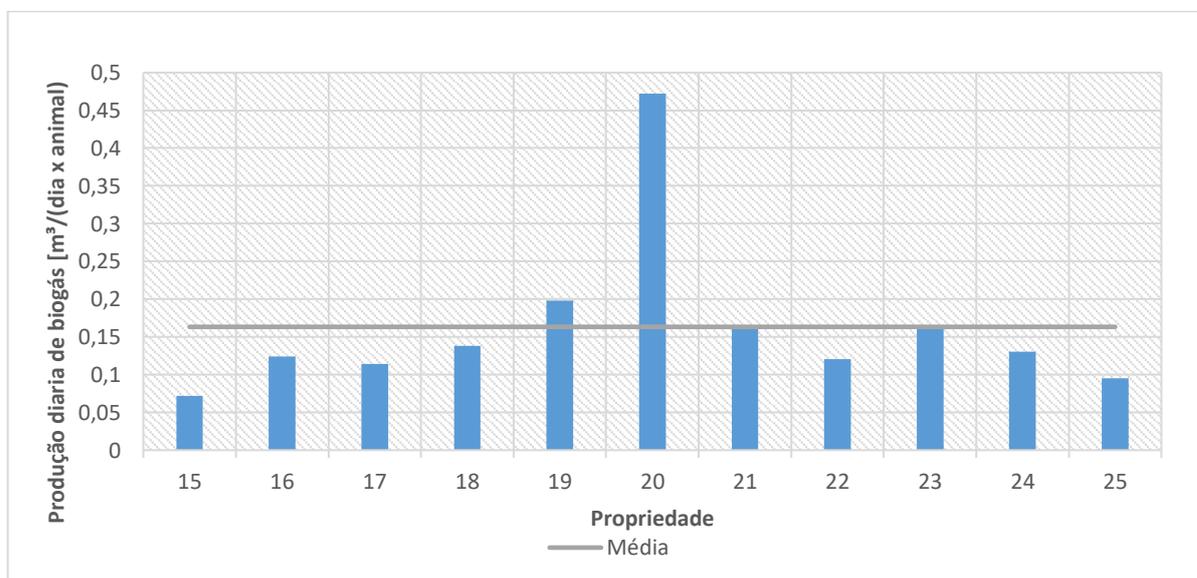


Figura 17 - Produção de biogás diário nas propriedades americanas

Da mesma forma que observado nas propriedades nacionais, a produção de biogás das propriedades americanas se mantém próxima da média, porém, a de número 20 se destaca consideravelmente. Além dos motivos já apresentados, é possível que o valor possua algum erro de medição associado, uma vez que apresenta, praticamente, o dobro do valor da média.

#### 5.4.3 Dados de produção na Alemanha

A empresa *ECO Erneuerbare Energien GmbH* da Alemanha, forneceu os potenciais de geração obtidos em suinocultura, os quais se referem aos números obtidos em campo, em projetos anteriormente realizados. Salienta-se que os biodigestores utilizados na Alemanha são do tipo reator de mistura completa. A Tabela 15 apresenta os dados informados pela empresa.

Tabela 15 - Produção de biogás em propriedades alemãs

<b>Tipo de propriedade</b>	<b>Produção diária de biogás por animal [m<sup>3</sup>/(dia.animal)]</b>
UCT	0,11
CC	0,18
UPL	0,31

Fonte: GRIGULL, 2017

Ressalta-se que as plantas de geração na Alemanha utilizam dejetos de suínos, na maioria das vezes, misturam esse substrato com outro mais seco, como milho, por exemplo. Isso se deve ao fato da porcentagem de massa seca ser muito baixa no caso dos suínos, e misturando-o com outro substrato mais seco a geração de gás por unidade de volume de efluente pode ser maior. Além disso, a utilização de milho para produção de energia elétrica foi incentivada, por vários anos, recebendo um acréscimo no valor da energia elétrica vendida (Informação verbal)<sup>1</sup>.

## 5.5 Comparação de dados das propriedades e da literatura

### 5.5.1 Comparação da geração de biogás entre os três países estudados

Com todos os dados de geração média diária de biogás por animal de cada um dos três países calculados, foi possível agrupar todos os resultados no Figura 18.

<sup>1</sup> Informações fornecidas por Vitor Grigull, representante da empresa *ECO Erneuerbare Energien GmbH*, através de reunião virtual, na Alemanha, em maio de 2017.

Salienta-se a produção média obtida pelos biodigestores alemães, sendo esse, pelo menos, 8% superior à dos outros dois países estudados. Também destaca-se que apesar das propriedades brasileiras produzirem, em média, menos gás que as alemãs, geram 12% mais biogás que as americanas.

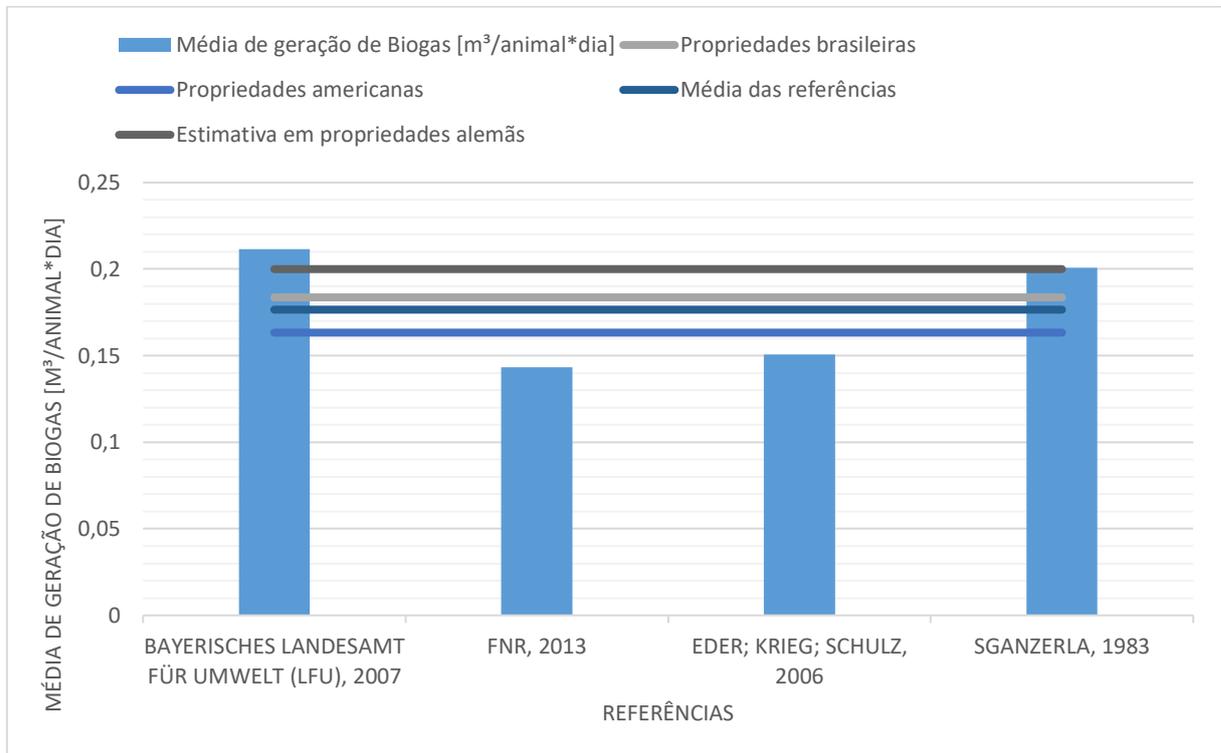


Figura 18 - Comparação de produção de biogás entre literatura prática e teórica

### 5.5.2 Comparação de geração de biogás pelo sistema de criação

Devido às diferentes formas de conduzir os processos envolvidos até a geração do biogás, torna-se complexa a comparação dos dados. Dessa forma, procurou-se utilizar sistemas semelhantes de produção para a comparação.

Essa comparação é apresentada na Figura 19, nela é possível observar que os dados não apresentam uma relação clara, apesar de terem os valores de produção próximos. Para um resultado mais claro, seria necessário um estudo específico de geração de biogás em cada um dos tipos de sistemas de criação.

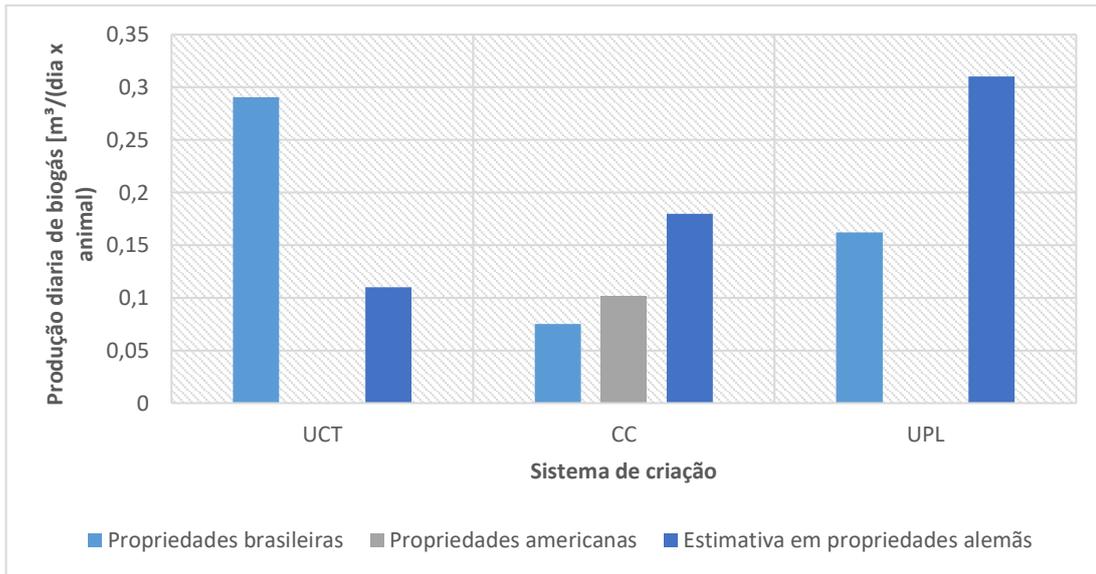


Figura 19 - Comparação de produção pelo sistema de criação

Na Figura 19 apresentada, pode-se perceber a falta de informação das propriedades americanas na comparação das UCT e UPL. Isso se deve ao fato de que a maioria das propriedades dos Estados Unidos utilizadas, não apresentam informações sobre o tipo de criação.

### 5.5.3 Comparação da capacidade de geração de biogás pela tecnologia do biodigestor

Ainda buscando uma forma de confrontar os dados de geração, realizou-se mais um cenário, no qual foi feita a comparação da produção de gás com base na tecnologia do biodigestor, sendo essa apresentada na Figura 20. Quando comparado com o **Error! Reference source not found.** é possível perceber uma relação muito mais próxima entre os valores obtidos.

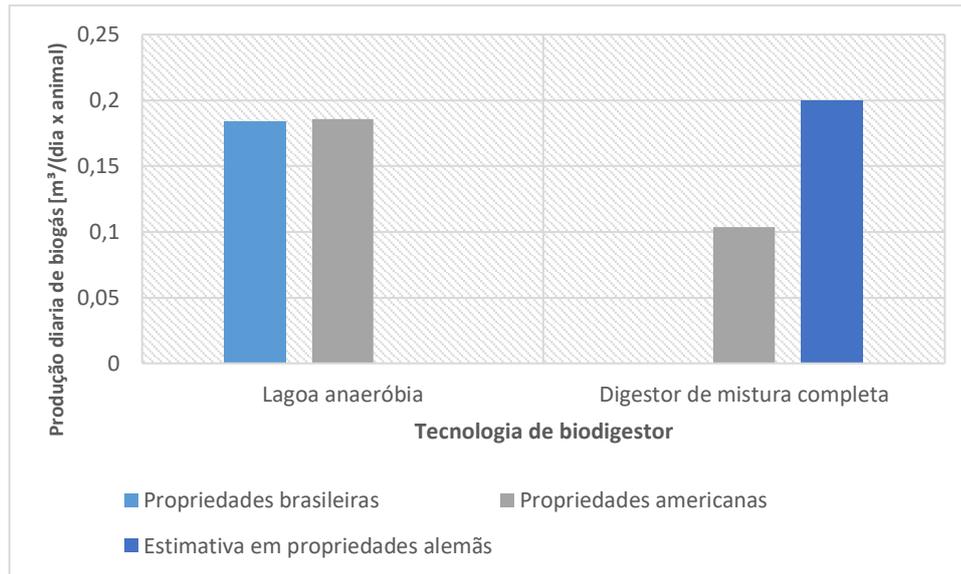


Figura 20 - Comparação de diferentes tecnologias de biodigestor

Ressalta-se a semelhança entre os resultados obtidos pelas lagoas anaeróbias brasileiras e americanas. Já no caso dos digestores de mistura completa, onde os parâmetros de operação são muito mais precisos e ajustáveis, obteve-se um resultado quase oposto, contendo tanto os dados de melhor quanto de pior produção de biogás. O resultado apresentado pelas propriedades americanas que utilizam biodigestores de mistura completa, não condizem com os valores esperados, podendo ter sido causado, em função da má operação do mesmo, ou, em função de erros nas medições de vazão de gás.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, no primeiro momento, foi a realização de uma revisão bibliográfica sobre a purificação do biogás, contendo diversos dados até então pouco presentes na literatura nacional, englobando as técnicas utilizadas e os custos de investimento e operação. Sendo esse, um assunto fundamental, quando se pretende utilizar todas as possibilidades proporcionadas pelo biogás. A utilização do biometano já mostra sinais de interesse no mercado nacional, uma vez que as regulamentações de qualidade e origem do gás já estão sendo desenvolvidas, além de editais de compra de biometano já existirem desde 2015 (SULGÁS, 2015).

Em um segundo momento realizou-se uma comparação da produção de biogás teórica e prática em biodigestores da Alemanha, do Brasil e dos Estados Unidos. Os resultados obtidos mostraram que, em média, as propriedades brasileiras geram 12% mais biogás que as americanas, porém, ainda ficando com uma defasagem de 8% quando comparadas com as produções alemãs. Dessa forma, existe um indicativo de que ainda existe espaço para o aperfeiçoamento dessa tecnologia no território nacional.

Um importante dado a ser ressaltado é que por meio de visitas a propriedades que possuem biodigestores foi observado que a maioria das que se encontram no sul do país tem a sua produção de biogás reduzida ou até mesmo interrompida no inverno em função das baixas temperaturas. Além disso, Monteiro (2005) descreveu em seu trabalho que a atividade das bactérias metanogênicas é interrompida em temperaturas inferiores a 15 °C, porém, esse dado não foi representado nas referências utilizadas para realização deste estudo.

Após análise dos dados médios de geração diária de biogás utilizados neste trabalho, comprovou-se que os mesmos não levam em conta os dados do inverno, uma vez que não tiveram suficientes amostragens nessa estação. No trabalho de Gusmão (2008) as medições foram realizadas no período entre janeiro e abril, não abrangendo o inverno brasileiro no sul do país. Já nos dados provenientes de Monteiro (2005), os dias mais frios que as medições foram realizadas, apresentaram a temperatura de 14,2 °C, também impossibilitando considerar as gerações em períodos críticos de temperatura. As demais referências utilizadas não apresentaram os períodos das amostragens.

Em função da possível interferência causada pelas variações de temperatura sugere-se para um futuro trabalho que as análises sejam feitas com dados de produção anual, excluindo assim qualquer possível sazonalidade na produção de biogás. Além de ressaltar a importância de realizar medições contínuas, sendo indicado, até mesmo, medições automatizadas da temperatura ambiente, da temperatura interna do biodigestor, da quantidade e da qualidade de biogás produzido, permitindo, assim, a obtenção de dados mais precisos para comparação e um melhor entendimento do processo de produção de biogás.

## 7 REFERÊNCIAS

AGSTAR. RIDGELINE FARM – CLYMER , NY. 2014. p. 4.

AISSE, M. M. *et al.* Estudo Comparativo Do Reator UASB e do Reator Anaeróbio Compartimentado Sequencial No Tratamento De Esgoto Sanitário. **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2000. n. 1, p. 1–9.

ANDRADE, M. A. N. *et al.* Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. **IV Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER**, 2002. p. 1–12.

ANP, Resolução Nº 8, de 30.1.2015 – DOU 2.2.2015, estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015. .30 jan. 2015

AVACI, A. B. *et al.* Avaliação econômico-financeira da microgeração de energia elétrica proveniente de biogás da suinocultura Economic evaluation of microgeneration of electricity from biogas of swine manure. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2013. n. 45, p. 456–462.

CATERPILA, Catálogo de grupo geradores a biogás CAT, 2017

CÉSAR, G. N.; SANTOS, B. De S.; CARVALHO, S. L. De. Uso de Biodigestores para Fins Energéticos em Propriedades Rurais. Fortaleza: **Revista Científica Semana Acadêmica**, 2016. p. 1–11.

COELHO, S. T.; PALETTA, C. E. M.; FREITAS, M. A. V. De. **Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica**. [S.l.]: [s.n.], 2000.

ESCOBAR, G. J.; HEIKKILÄ, M. A. Biogas production in farms through anaerobic digestion of cattle and pig manure. Case Studies and research activities in Europe. 1999. p. 1–39.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. 5ª Edição ed. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010.

GRIGULL, V. **Geração de biogás na suinocultura** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por pedromello@eliteenergia.com.br em 25 mai. 2017

GUSMÃO, M. M. F. E. C. D. C. **Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em Santa Catarina**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

HENN, A. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos: condição de partida**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

- KONRAD, O. *et al.* **Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano.** [S.l.]: [s.n.], 2016.
- LUSK, P. Methane Recovery from Animal Manures The Current Opportunities Casebook. **Midwest Research Institute for the U.S. Department of Energy**, 1998. n. September, p. 150.
- MAGALHAES, A. P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano.** [S.l.]: Nobel, 1986.
- MORIARTY, K. Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in St . Bernard , Louisiana. **National Renewable Energy Laboratory**, 2013. n. January.
- MOSER, M. A; MATTOCKS, R. P. Benefits, costs and operating experience at ten agricultural anaerobic digesters. 2000. n. June, p. 352.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética.** [S.l.]: Nobel, 1986.
- OLIVEIRA, P. A. *et al.* Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. **Embrapa-CNPSA. Documentos**, 1993.
- OLIVEIRA, R. D. E. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono.** [S.l.]: [s.n.], 2009.
- SÁNCHEZ, E. *et al.* Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. **Bioresource Technology**, 2005. v. 96, n. 3, p. 335–344.
- SASSE, L. Biogas Plants. 1988. p. 1–66.
- SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução.** [S.l.]: Agropecu{á}ria, 1983.
- SULGÁS. **Editais de chamada pública nº 01/15.**
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN. Biogas To Biomethane Technology Review. **Vienna University of Technology**, 2012. n. May, p. 1–15.
- THIEME, E. *et al.* **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás / Probiogás.** [S.l.]: [s.n.], 2015.
- WILKIE, A. C. Anaerobic Digestion of Dairy Manure : Design and Process Considerations. **Dairy manure management: Treatment, handling and community relations. (NRAES-176)**, 2005. p. 301–312.