

EDER LUIZ PELLIZZER

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGAS UTILIZANDO AQUECIMENTO E  
AGITAÇÃO COM AUTOMAÇÃO DE BIODIGESTORES

CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
MARÇO – 2017

EDER LUIZ PELLIZZER

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGAS UTILIZANDO  
AQUECIMENTO E AGITAÇÃO COM AUTOMAÇÃO DE  
BIODIGESTORES**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação de Engenharia em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

**Orientador:** Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino

**Co-orientador:** Prof. Dr. Armin Feiden

CASCADEL  
PARANÁ - BRASIL  
MARÇO – 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Ficha catalográfica elaborada por Rosângela A. A. Silva – CRB 9ª/1810

P446d Pellizzer, Eder Luiz  
Otimização da produção de biogás utilizando aquecimento e agitação com automação de biodigestores. / Eder Luiz Pellizzer. — Cascavel – PR: UNIOESTE, 2017. — 56f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino  
Co-orientador: Prof. Dr. Armin Feiden.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017  
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.  
Bibliografia.

1. Resíduos como energia. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Recursos energéticos. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 20.ed. 621.47

## EDER LUIZ PELLIZZER

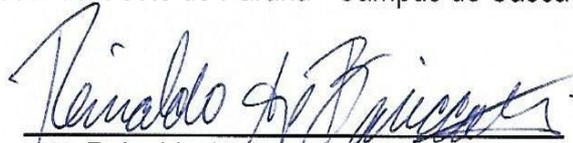
Otimização da produção de biogás utilizando aquecimento e agitação com automação de biodigestores

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



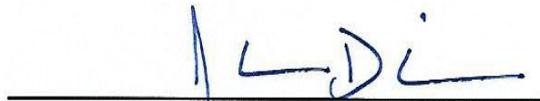
Orientador(a) - Cleber Antonio Lindino

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Reinaldo Aparecido Bariccatti

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jonathan Dieter

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)

Cascavel, 8 de março de 2017

*“Dedico este trabalho a minha esposa e filho”.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me conduzir todos os dias para vencer as adversidades encontradas e realizar este trabalho;

Ao orientador Prof. Dr. Cleber Antônio Lindino, **Co-orientador:** Prof. Dr. Armin Feiden, pelo conhecimento, orientação e contribuição ao decorrer de nosso trabalho;

À Coordenação, professores e equipe do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura – PPGEA da Universidade do Oeste do Paraná, pela oportunidade, pelo convívio e pelos ensinamentos.

Aos meus familiares, que estiveram sempre dando apoio e força para nunca desistir das batalhas encontradas;

Aos colegas, por estarem sempre por perto ajudando a esclarecer as dúvidas; em especial, minha esposa Flavia Rossatto Pellizzer e meu filho André Luiz Rossatto Pellizzer pela compreensão nas horas de ausência.

Agradeço aos meus pais Loreno Pellizzer e Odila Brandeleiro Pellizzer por acompanharem toda esta jornada, estando sempre ao lado dando muito apoio em todos os momentos;

As pessoas que amamos, por todo carinho, dedicação, amor e paciência que tiveram, sempre motivando para que continuasse lutando e seguindo esta caminhada.

*O que prevemos raramente ocorre;  
o que menos esperamos geralmente  
acontece.*

*(Bertrand Russell)*

*A matemática, vista corretamente  
possui não apenas verdade mas beleza  
suprema.*

*(Benjamin Disraeli)*

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Modelo de Mistura completa

Al – alcalinidade

B – Modelo Canadense com Agitação

B10 - Modelo de Biodigestor com capacidade de armazenar 10 m<sup>3</sup> de dejetos.

B20 - Modelo de Biodigestor com capacidade de armazenar 20 m<sup>3</sup> de dejetos.

B40 - Modelo de Biodigestor com capacidade de armazenar 40 m<sup>3</sup> de dejetos.

B5 - Modelo de Biodigestor com capacidade de armazenar 5 m<sup>3</sup> de dejetos.

B50 - Modelo de Biodigestor com capacidade de armazenar 50 m<sup>3</sup> de dejetos.

C – Modelo Canadense sem Agitação

CH<sub>4</sub> – metano

CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono

CV – Coeficiente de variação

DQO – Demanda Química de Oxigênio

H<sub>2</sub>O -Água

H<sub>2</sub>S – sulfeto de hidrogênio

L – Litro

m<sup>3</sup> – metro cúbico

mg – miligrama

N – nitrogênio

N<sub>2</sub> – nitrogênio molecular

NH<sub>3</sub> – gás amônia

°C – Grau Celsius

P - Probabilidade

PEAD- Polietileno de alta densidade

pH – potencial hidrogeniônico

ppm – parte por milhão

PVC – Policloreto de vinila

SF – sólidos fixos

ST – sólidos totais

SV – sólidos voláteis

TRH – tempo de retenção hidráulica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Biodigestor Modelo Indiano .....	7
Figura 2: Biodigestor Modelo Chinês.....	8
Figura 3: Modelo Marinha do Brasil. ....	8
Figura 4: Biodigestor modelo Biokohler. ....	10
Figura 5: Etapas do processo de digestão anaeróbia:.....	15
Figura 6: Bacia da Sanga Ajuricaba. ....	17
Figura 7: Arranjos típicos de registros para controle da agitação. ....	17
Figura 8: Painel de controle instalado na casa de maquinas do biodigestor B. .....	18
Figura 9: Esquema da agitação em biodigestores retangular.....	18
Figura 10: Foto aérea do biodigestor mistura completa.....	20
Figura 11: Foto do agitador do biodigestor de mistura completa. ....	20
Figura 12: Foto de bombas de recirculação.....	20
Figura 13: Foto do painel de controle e compressor para injeção de ar. ....	21
Figura 14: Drager, modelo: X-am7000.....	21
Figura 15: Entrada e Saída do biodigestor modelo A. ....	23
Figura 16: Entrada e saída do biodigestor modelo B.....	23
Figura 17: Entrada e saída do biodigestor modelo C.....	24
Figura 18: Foto das amostras coletadas no dia 08/12/2015. ....	24
Figura 19: Media do pH dos biodigestores, sendo A, B e C os modelos de biodigestores e desvio padrão para cada modelo. ....	26
Figura 20: Media de DQO em $g/L^{-1}$ para os três modelos de biodigestores na entrada e saída.....	27
Figura 21: Media dos valores de redução obtidos para Sólidos Fixos e Voláteis para os biodigestores comparando-se a entrada e a saída.....	28
Figura 22: Media referentes a relação de acidez volátil / alcalinidade total em $mg/L^{-1}$ . ....	30
Figura 23: Media de produção de $CH_4$ e redução media de sólidos voláteis. .	32

## LISTA DE TABELA

Tabela 1: Composição Média do biogás.....	3
Tabela 2: Produção média diária de esterco (kg), esterco + urina (kg) e dejetos líquidos (L) por animal por Fase. ....	5
Tabela 3: Redução dos parâmetros estudados para as amostras dos biodigestores.....	25
Tabela 4: Teste de Tukey para pH. ....	266
Tabela 5: Composição Média do biogás em cada biodigestor.....	30
Tabela 6: Média de produção de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> para os três modelos de biodigestores.....	32
Tabela 7: Custo médio de implantação dos biodigestores estudados .....	35

## RESUMO

PELLIZZER, Eder Luiz. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2017. **Otimização da produção de biogás utilizando aquecimento e agitação com automação de biodigestores.** Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino, Prof. Dr. Armin Feiden.

O crescente desenvolvimento do país tem levado à busca por novas alternativas de fontes de energia, sendo importante o uso consciente das fontes energéticas já existentes. Aprimorar estudos e projetos já existentes na área energética pode contribuir significativamente para o crescimento da produção de energia, sendo que o biogás é um produto com grande potencial de expansão podendo ser utilizado para gerar energia. Por meio da avaliação de três modelos de biodigestores buscou-se qualificar o melhor modelo para futuras instalações. Os biodigestores estudados foram o modelo circular de mistura completa com agitação, injeção de ar, aquecimento dos dejetos com temperatura constante; o modelo canadense retangular com agitação dos dejetos por bomba de recirculação e o modelo canadense retangular sem aquecimento e agitação. Os parâmetros avaliados foram a taxa de produção de biogás, o pH, a DQO, Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, Acidez e Alcalinidade. Os resultados encontrados mostram que a produção média de biogás foi de 40 a 75 % de metano ( $\text{CH}_4$ ), 25 a 50 % de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), entres outros componentes. Sua composição varia de acordo com o tipo de resíduo utilizado para alimentação dos biodigestores e seu funcionamento. Os valores encontrados neste trabalho indicam que é possível melhorar a forma construtiva e operacional dos biodigestores para obter um biogás com melhor qualidade, por meio da padronização dos resíduos na entrada dos biodigestores, observando a relação entre o material sólido e líquido, pH, e o dimensionamento do biodigestor para atender as necessidades de cada propriedade, sendo o biodigestor de mistura completa que proporciona melhores resultados.

**Palavras Chave:** Projetos, eficiência, energia renovável.

## ABSTRACT

PELLIZZER, Eder Luiz. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, February 2017. **Optimization of biogas production using heating and agitation with automation of biodigesters.** Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino, Prof. Dr. Armin Feiden.

The growing development of the country has led to the search for new alternatives of energy sources, being important the conscious use of the existing energy sources. Improving existing studies and projects in the energy area can contribute significantly to the growth of energy production, and biogas is a product with great potential for expansion and can be used to generate energy. By means of the evaluation of three models of biodigesters, we tried to qualify the best model for future installations. The biodigesters studied were the circular model of complete mixing with agitation, air injection, heating of the waste and kept at constant temperature; the rectangular Canadian model with stirring of the waste by recirculation pump and the rectangular Canadian model without heating and stirring. The parameters evaluated were the biogas production rate, pH, COD, Total Solids, Fixed Solids, Volatile Solids, Acidity and Alkalinity. The results show that the average biogas production was 40-75% methane (CH<sub>4</sub>), 25-50% carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), among other components. Its composition varies according to the type of waste used to feed the biodigesters and their operation. The values found in this work indicate that it is possible to improve the constructive and operational way of the biodigesters to obtain a better biogas, by means of the standardization of the residues at the entrance of the biodigesters, observing the relation between the solid and liquid material, pH, and The sizing of the biodigester to meet the needs of each property, and the complete mixing biodigester provides better results.

**Keywords:** Projects, efficiency, renewable energy.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELA.....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1 BIOGÁS NO BRASIL.....	2
2.2: ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE DEJETOS E BIOGÁS GERADO.....	3
2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	5
2.5 BIODIGESTORES .....	6
2.6 MODELO INDIANO .....	6
2.7 MODELO CHINES.....	7
2.8 MODELO MARINHA DO BRASIL.....	8
2.9 MODELO CANADENSE .....	9
2.10 MODELO BOKHOHLER .....	9
2.11 MODELO DE MISTURA COMPLETA.....	10
2.12 AGITAÇÃO E MISTURA.....	11
2.13 MISTURADORES.....	11
2.14 MODELOS DE BOMBAS .....	11
2.15 AQUECIMENTO .....	12
2.16 FATORES QUE INTERFEREM NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	12
2.17 DIGESTÃO ANAERÓBICA .....	13
2.18 FASES DA DIGESTÃO.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	22

4.1. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).....	25
4.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO).....	27
4.3. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS.....	28
4.4. DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE E ACIDEZ .....	29
4.5. COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS .....	30
A Tabela 5 apresenta a concentração do biogás obtido em cada biodigestor estudado, comparando-se os dados com os obtidos por Groth (2012).....	30
4.6: ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE BIOGÁS GERADO.....	34
4.7: CUSTO MÉDIO DE IMPLANTAÇÃO DOS BIODIGESTORES ESTUDADOS. ...	34
5. CONCLUSÃO.....	35
6. REFERENCIAS .....	36

## 1. INTRODUÇÃO

O processo biológico de obtenção do biogás necessita de condições adequadas para manter uma produção contínua e eficiente e este processo pode ser alterado por vários fatores como o pH, a temperatura, os nutrientes, o inoculo, o tipo de substrato e a interação dos microrganismos envolvidos (ORRICO Junior, 2007).

Alguns destes parâmetros são inibitórios, provocando mudanças na população microbiana, retardando o seu crescimento, sendo notado pela baixa produção de biogás e aumento dos ácidos orgânicos (CHEN et al., 2008).

Biogás é o natural resultado de uma fermentação anaeróbica (na ausência de ar, ou oxigênio) de resíduos orgânicos e dejetos de animais. Sua concentração varia de acordo com a composição dos resíduos e dejetos e das condições de operação dos biodigestores.

Nos modelos de biodigestores utilizados atualmente no Brasil, o abastecimento normalmente é realizado por meio de bombas com acionamento manual ou por calha de desnível e não possuem agitação automática da biomassa, ocasionando uma variação significativa na temperatura interna. Esta variação de temperatura prejudica a biodigestão, devido aos microorganismos serem sensíveis às variações acima de 2 °C num período de um dia, paralisando a produção do biogás (MIRANDA, 2006).

A ausência de agitação forma sobrenadantes sólidos que dificultam a passagem do biogás. Comumente nestes biodigestores se observa uma divisão na qual a massa das bactérias encontra-se no fundo, e o substrato em decomposição parado na parte superior, tornando menor o espaço para atuação das bactérias (GÜLZOW 2013).

Devido a estas variáveis, torna-se importante analisar o desempenho de diferentes biodigestores quanto ao controle destas, para apresentar a melhor opção de eficiência na geração de biogás e tratamento dos dejetos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

A produção de energia por meio da queima do biogás gerado a partir de dejetos de animais ou outros resíduos orgânicos é pouco difundida no Brasil. No entanto, o cenário atual aponta para um aumento no uso deste tipo de energia.

Novas fontes energéticas tem na produção de biogás, uma abordagem favorável para sustentabilidade e melhor desempenho dos sistemas agrícolas.

Na produção de energia por meio do biogás utiliza-se um conjunto de equipamentos, para produção e conversão em energia, mediante a queima em turbinas, micro turbinas ou em motores diesel e ciclo Otto (CALZA, 2015).

### 2.1 BIOGAS NO BRASIL

O Brasil possui potencial para se destacar na produção do biogás, pois produz resíduos agrícolas variados como o bagaço-de-cana, bagaço e caroço de frutas, resíduos urbanos, esgoto e dejetos de animais (BIOENERGIA, 2016). A destinação correta destes resíduos contribuiria para um aumento na produção de biogás e diminuiria a poluição e contaminação do lençol freático tornando-se fonte renovável de energia.

O biogás é o resultado de processo biológico, referente à decomposição de matéria orgânica em meio anaeróbio e ocorre naturalmente em lagos, pântanos e esterqueiras mediante a ação de microorganismos.

O biogás foi descoberto em 1667, mas apenas um século depois reconheceu-se a existência de metano na composição do gás presente nos pântanos, e estudos realizados na época indicaram que gases de fermentação de resíduos orgânicos poderiam constituir fontes de aquecimento e iluminação (NOGUEIRA, 1986 *apud* PRATI, 2014).

Segundo estudos de GLEIS e GROTH (2012), o biogás apresenta composição de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição do biogás

<b>Composto</b>	<b>%</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	40-75
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	25-55
Sulfeto de hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	0-3
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0-1
Água (H <sub>2</sub> O)	0-10
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0-5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0-2
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0-1

Fonte: GLEIS e GROTH (2012).

A energia proveniente de processos envolvendo biodigestores e biogás pode contribuir para o avanço da geração distribuída no Brasil.

## **2.2: ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE DEJETOS E BIOGÁS GERADO.**

Para o cálculo da quantidade de dejetos produzidos por dia utilizou-se a quantidade de animais e a quantidade de dejetos produzidos por animal (Equação 1). De acordo com Oliveira et al.(1993) para uma unidade de crescimento e terminação (UCT) cada suíno gera 7,0 litros de dejetos por dia.

$$\mathbf{Dpd = Dda * Na} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual:

**Dpd:** Dejetos produzidos por dia (m<sup>3</sup>)

**Na:** Quantidade de animais

**Dda:** Dejetos produzidos por dia por animal (m<sup>3</sup>)

Para a estimativa teórica foi utilizado o método descrito por Farret (2010 apud JOHANN, 2012), o qual afirma que cada suíno produz em média 0,1400 m<sup>3</sup> de metano por dia. Sendo assim a capacidade total de produção de biogás é calcula de acordo com a Equação 2:

$$\mathbf{Cpb = Na * x.} \qquad \text{Equação (2)}$$

Na qual:

**Cpb:** Capacidade de produção de biogás (m<sup>3</sup>/dia)

**Na:** Número de animais

**x:** produção de biogás por animal (m<sup>3</sup>)

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DOS DEJETOS DE SUÍNOS

A criação de suínos no Brasil é realizada em sistema de confinamento, produzindo elevadas quantidades de dejetos líquidos e semissólidos. Sistemas de manejo e tratamentos adequados de dejetos podem evitar graves problemas de poluição, pois quando não são tratados adequadamente os dejetos causam sérios problemas em cursos d'água, possuem altas concentrações de matéria orgânica, metais pesados, nutrientes e patógenos (OLIVEIRA et al., 1993). Segundo BIPERS (2002), águas residuais da suinocultura são compostas de urina, fezes, restos de alimentos, água de bebedouros e de lavagem.

O volume total depende do manejo dos animais e volume de água utilizado na limpeza das baias. Henn (2005) caracteriza os dejetos de suínos como um resíduo escuro, de consistência pastosa, características físico-químicas e biológicas variáveis, com alta concentração de matéria orgânica. O total de dejetos suínos corresponde entre 4,9 a 8,5% do peso vivo/dia conforme Tabela 2. O volume total de dejetos sofre influência de todos os fatores acima citados, e também é proporcional ao peso vivo do animal (OLIVEIRA et al., 1993).

**Tabela 1:** Produção média diária de esterco, esterco + urina e dejetos líquidos por animal por categoria.

<b>Categoria de Suínos</b>	<b>Esterco (kg)</b>	<b>Esterco+ urina (kg)</b>	<b>Dejetos líquidos (L)</b>
<b>25–100 kg</b>	2,30	4,90	7,00
<b>Porcas em Gestação</b>	3,60	11,00	16,00
<b>Porcas em Lactação</b>	6,40	18,00	27,00
<b>Machos</b>	3,00	6,00	9,00
<b>Leitão desmamado</b>	0,35	0,95	1,40
<b>Média</b>	2,35	5,80	8,60

Fonte: Oliveira (1993).

As águas superficiais são normalmente afetadas pela matéria orgânica, bactérias fecais e sedimentos. Águas subterrâneas são afetadas por bactérias presentes nos dejetos e nitritos. Outros problemas ambientais estão relacionados ao odor desagradável dos dejetos e compostos voláteis que prejudicam o bem estar humano e animal. Os contaminantes mais encontrados são: metano, amônia, ácidos voláteis e ácidos graxos (BIPERS, 2002).

## 2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração distribuída é uma modalidade que permite a produção de energia elétrica em pequenos geradores para ser consumida nas propriedades e o excedente pode ser injetado na rede de distribuição elétrica e que no Brasil é regulamentada pelo decreto 5.163 de 2004 da ANEEL (ANEEL, 2007). Só em 2012 foram aprovadas as regras de instalação e geração distribuída que inclui micro e mini geração (100 kW a 1MW) no modelo de compensação (ANEEL, 2016).

A geração distribuída é vantajosa em propriedades rurais e agroindústrias, pois ambas ficam livres de quedas de energia causadas por diversos problemas climáticos ou falhas de distribuição.

## **2.5 BIODIGESTORES**

Os biodigestores são câmaras fechadas nas quais se realiza a fermentação anaeróbia da matéria orgânica principalmente dejetos suínos e bovinos, produzindo como resultado o biogás que é conduzido até balões de armazenamento (CARVALHO 2003).

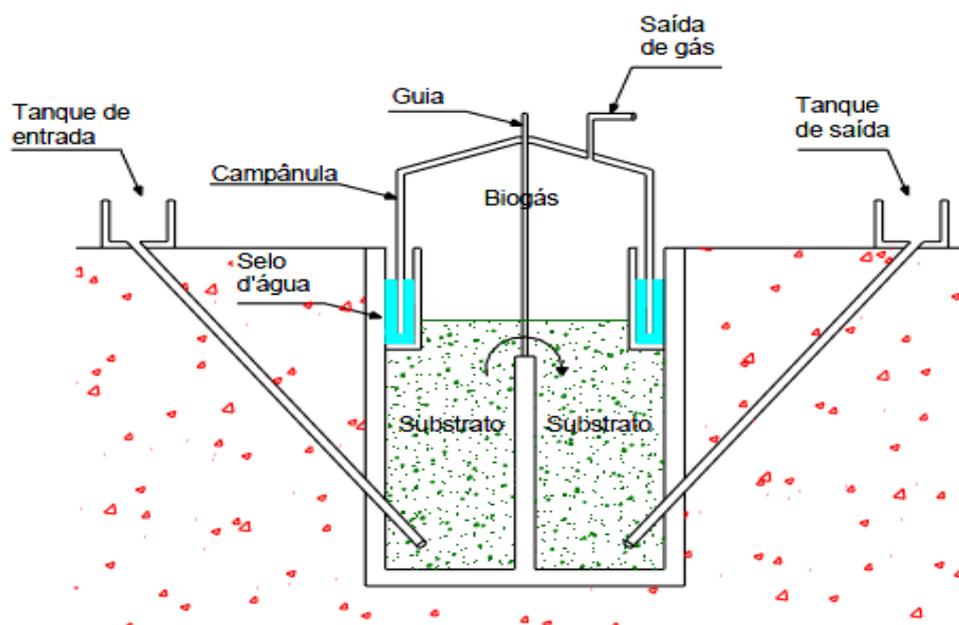
O biofertilizante, outro produto da biodigestão, após ser destinado a lagoas pode ser utilizado em plantações, desde que dentro das recomendações agronômicas.

Existem dois tipos principais de biodigestores, o de batelada e o contínuo e como exemplos de biodigestores com carga de abastecimento contínua, os modelos Chinês e Indiano são bastante difundidos pela sua simplicidade e funcionalidade.

## **2.6 MODELO INDIANO**

O modelo indiano se destaca por ter uma cúpula móvel de armazenamento do biogás gerado, no qual utiliza um selo de água ou a própria biomassa da fermentação como vedação e, como esta cúpula é móvel, mantém uma pressão de fornecimento do biogás constante. Pode ser construído de alvenaria, concreto e aço, na altura do solo ou parcialmente, podendo sofrer com interferências de temperatura como mostra a Figura 1 (OLIVEIRA, 2009).

Segundo Oliveira (2009), a alimentação do biodigestor indiano deve ser diária com a mesma quantidade de matéria orgânica. Este modelo é formado por duas câmaras que facilitam a circulação da matéria orgânica em fermentação. É alimentado na parte inferior, mas como a decomposição vai evoluindo a matéria menos densa é transportada para outra parte da câmara de digestão (NISHIMURA, 2009)



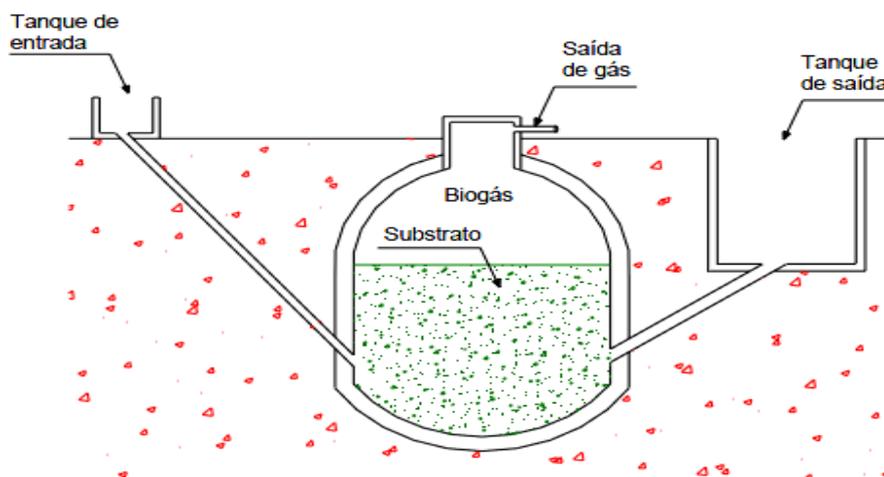
**Figura 1:** Biodigestor Modelo Indiano

**Fonte:** NISHIMURA (2009).

## 2.7 MODELO CHINES

O modelo chinês difere do indiano por não necessitar de gasômetro e o biogás é produzido a pressão variável sendo armazenado no próprio biodigestor. Sua construção é de alvenaria e totalmente enterrado, com teto com forma de abóboda, como mostra a Figura 2 (NISHIMURA, 2009).

Este biodigestor requer maior cuidado na fase de construção evitando futuros vazamentos de biogás e biomassa e, como não necessita de gasômetro, tem custo mais baixo que o indiano; porém necessita de maior pressão para deslocar os dejetos para saída (NISHIMURA, 2009).



**Figura 2:** Biodigestor Modelo Chinês.

**Fonte:** NISHIMURA (2009).

## 2.8 MODELO MARINHA DO BRASIL

O modelo desenvolvido pela Marinha do Brasil é, revestido por lona impermeável, tem formato quadrangular e necessita de uma área maior, pois é mais raso e longo (Figura 3). Bastante difundido no Brasil graças ao baixo custo do material utilizado para sua fabricação, é considerado melhor que o chinês e o indiano por resistir à corrosão provocada pela água e o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) presente no biogás (PRATI, 2014)



**Figura 3:** Modelo Marinha do Brasil.

**Fonte:** BARRERA (2003 p. 23.)

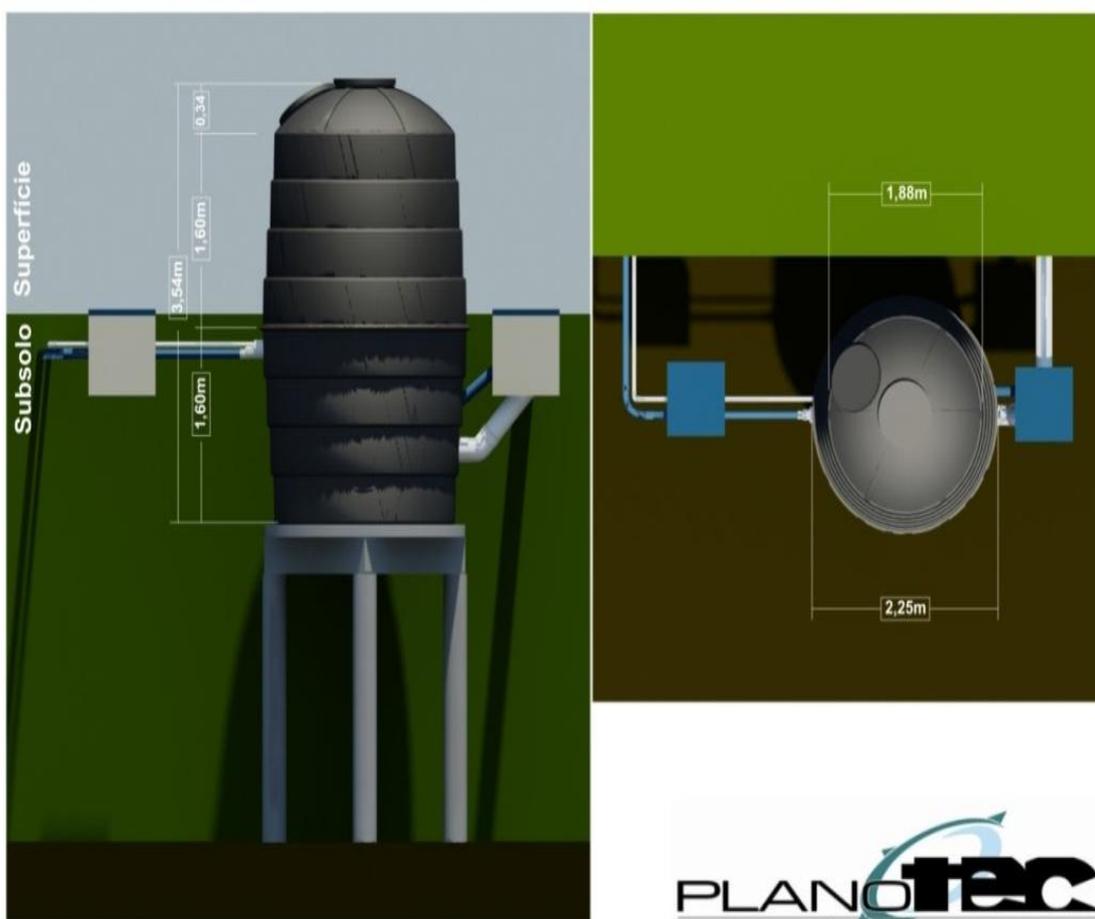
## 2.9 MODELO CANADENSE

O biodigestor Canadense é o modelo mais utilizado, por ter baixo custo e fácil implantação, utilizando fluxo contínuo sendo normalmente retangular com a largura maior que sua profundidade, e pode ser considerada como uma lagoa coberta. Pode ser construído de alvenaria e lona de PVC, sua forma retangular contribui para uma maior troca de calor com o sol aumentando a temperatura interna na biomassa que facilita a produção de biogás (CARVALHO, 2003).

Construtivamente simples, este biodigestor é constituído por uma caixa de entrada ou de homogeneização para onde são encaminhados todos os dejetos de suínos ou bovinos, uma caixa de fermentação revestida com lona ou membrana para impermeabilizar o solo, com campânula superior em lona ou membrana plástica para reter o biogás, caixa de saída do efluente ou biofertilizante que é conduzido a um depósito ou esterqueira para estabilização final (PRATI, 2014). Normalmente, os biodigestores canadenses devem ser cercados para evitar acidentes com animais.

## 2.10 MODELO BIKOHLER

O modelo Biokohler de biodigestor foi desenvolvido pela família Kohler em sua propriedade rural no município de Marechal Candido Rondon/PR, sendo fabricado com fibra de vidro nos tamanhos de B5 (5 m<sup>3</sup> de dejetos), B10 (10 m<sup>3</sup> de dejetos), B20 (20 m<sup>3</sup> de dejetos), B40 (40 m<sup>3</sup> de dejetos), B50 (50 m<sup>3</sup> de dejetos) e é indicado para baixo volume de dejetos e matéria orgânica a ser tratada e por este motivo é normalmente utilizado para bovinocultura de leite e corte, como pode ser visto na Figura 4, e é de fácil fabricação por se tratar de duas caixas d'água reforçadas e acopladas uma sobre a outra (ITAIPU, 2011).



**Figura 4:** Biodigestor modelo Biokohler.

Fonte: ITAIPU, Plataforma de Energias Renováveis – Julho 2011.

## 2.11 MODELO DE MISTURA COMPLETA

O modelo de biodigestor de mistura completa possui fluxo contínuo na entrada e saída dos dejetos. Construído de forma circular, pode ser de alvenaria ou em polietileno de alta densidade (PEAD), e a reação anaeróbia ocorre toda no interior do reservatório, sendo indicado para fermentações úmidas.

Com necessidade de agitação contínua ou intermitente, por mecanismos pneumáticos ou mecânicos, tem o objetivo promover uma mistura equilibrada nos dejetos, facilitando a reação e suas características serão determinadas pelo projeto.

## **2.12 AGITAÇÃO E MISTURA**

A produção de biogás pode ser melhorada por meio da homogeneização dos produtos internos do biodigestor antes de seu abastecimento, sendo isto possível por bombas que fazem a recirculação ou agitadores mecânicos instalados no interior dos biodigestores. Com a agitação, o contato entre as bactérias e o substrato é mantido por um período de tempo maior, eliminando a formação de crosta, facilitando a passagem do biogás através do limite superior dos dejetos (GÜLZOW 2013).

Para a agitação mecânica os substratos devem possuir uma concentração de matéria orgânica seca inferior a 10%, pois qualquer valor acima torna o processo inviável (GLEIS, 2014).

## **2.13 MISTURADORES**

Os misturadores submersíveis são comuns em biodigestores de mistura completa, e operam completamente submersos com rotação de 300 a 1500 rpm, com seu motor elétrico selado, pois é resfriado pelos meios circundantes (GLEIS, 2014).

Misturadores de eixo longo são lentos, instalados em ângulo, e o motor fica na parte externa do biodigestor e a extremidade interna do eixo é fixada no fundo, sendo que o rotor é equipado com laminais ou hélices múltiplas, com hélice de 2,40 metros e rotação de 40 rpm (GROTH, 2014).

Misturadores centrais (axiais) são lentos, tem rotação variável de 12 a 18 rpm, e, dependendo da altura do biodigestor podem ser instalados 2 misturadores rotativos no mesmo eixo, sendo um superior e um inferior, com as partes elétricas no lado de fora (PROCESS ENGINEERING, 2014).

## **2.14 MODELOS DE BOMBAS**

Em relação a bombas, as de cavidade são de deslocamento positivo são utilizadas em biodigestores de biomassa, trabalham com pressão de 3 a 5 bar,

rotação de 200 a 500 rpm e alturas de sucção de biomassa de 1 a 3 metros (NETZSCH, 2014).

Já as bombas rotativas são de deslocamento positivo, acondicionadas em uma caixa oval, pode ser com palhetas, lóbulos ou engrenagem e trabalha com pressão de 2 a 10bar e rotação de 200 rpm (VIANA, 2014).

As bombas tipo centrífuga são comuns e simples, trabalham a pressão de 2,5 bar, velocidade de rotação de 1500 a 3000 rpm, possui alta capacidade de alimentação com vazão de até  $30\text{m}^3\text{-min}^{-1}$  (GLEIS, 2014).

## **2.15 AQUECIMENTO**

Grande parte dos microrganismos metanogênicos cresce na faixa mesofílica com temperaturas que variam de 37 a 42 °C. Biodigestores operando nesta faixa possuem um rendimento relativamente elevado na produção de biogás e uma estabilidade no processo (GÜLZOW 2013).

Para manter a temperatura estável, as paredes do tanque são equipadas com serpentinas de aquecimento. As paredes e o chão do digestor também são isolados, a fim de minimizar as perdas de temperatura para o exterior (GLEIS, 2014).

Alguns fatores podem influenciar a oscilação da temperatura nos biodigestores. Defeitos em equipamentos, estações de verão e inverno com temperaturas extremas, posição dos equipamentos de agitação e aquecimento e isolamento térmico insuficiente ou mal distribuído (GÜLZOW 2013).

## **2.16 FATORES QUE INTERFEREM NA DIGESTÃO ANAERÓBIA**

A decomposição anaeróbia dos compostos orgânicos sofre alterações que estão relacionadas com as condições de operação do sistema de tratamento e com mudanças ambientais, que variam conforme temperatura, pH, nutriente e elementos potencialmente tóxicos.

A temperatura é o fator físico mais importante na digestão, pois está diretamente ligada ao crescimento dos microorganismos biológicos, pois estes

não possuem mecanismos de controle de temperatura interna ficando assim sobre influência de controles externos (CHIRNECHARO, 1997).

A mudança de temperatura proporciona desequilíbrio nos microorganismos que atuam na transformação do metano. A faixa de temperatura ideal para melhor produção de biogás varia de 30 a 35 °C, pois nesta se desenvolvem as bactérias mesófilas (NOGUEIRA 1992).

O pH deve ser mantido relativamente constante no reator, pois a alta taxa de metanogênese necessita de uma faixa estreita de pH podendo-se produzir biogás com faixa de pH de 6,0 a 8,0, e valores inferiores ou superiores de pH podem paralisar por completo a produção de metano (CHERNICARO, 1997).

Um pH entre ácido e neutro (pH 5-7) promove a produção de ácido butílico e em condições básicas (pH 8) permite a produção de ácido acético e ácido propionico (HORIUCHI et al., 2002).

Os nutrientes essenciais das bactérias metanogênicas são o fósforo (P) e o nitrogênio (N) e, por este motivo, os substratos devem conter a concentração suficiente para alimentar as bactérias envolvidas na digestão anaeróbia (SOUZA, 1984).

Elementos tóxicos na digestão anaeróbia causam reações diferentes no complexo microbiano, como inibir os microorganismos aciogênicos (SPEECE, 1996).

A toxicidade depende do teor em que se encontra uma determinada substância, por exemplo, o cianeto é tóxico à digestão anaeróbia, mas as bactérias podem se adaptar a ele se as concentrações forem baixas entre de 20 a 40 mg L<sup>-1</sup>(SOUZA, 1984).

## **2.17 DIGESTÃO ANAERÓBICA**

A digestão anaeróbia é a transformação dos dejetos orgânicos, por processo microbiano sem oxigênio molecular, em compostos mais simples, a exemplo do metano e dióxido de carbono. Normalmente, a digestão anaeróbia acontece em dois estágios: no primeiro atuam bactérias facultativas e anaeróbias, formadoras de ácidos e compostos como carboidratos, proteínas e lipídios que são transformados principalmente em ácidos voláteis mais simples; no segundo

estágio atuam as bactérias especialmente anaeróbias convertendo os ácidos orgânicos em metano e gás carbônico (SOUZA, 1984).

A digestão anaeróbia divide-se em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

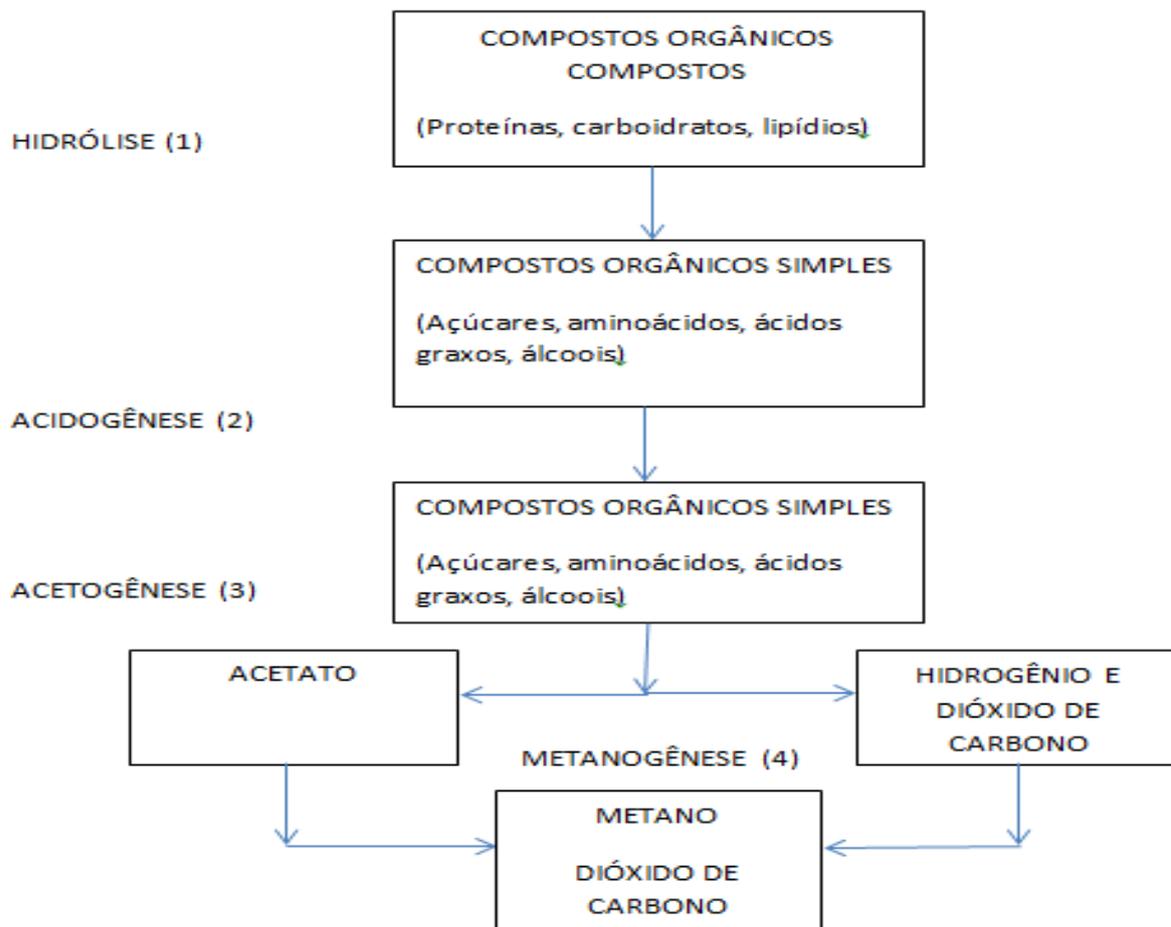
## **2.18 FASES DA DIGESTÃO**

A hidrólise é uma reação química na qual as moléculas são quebradas, e transformadas em substâncias menos complexas. Neste processo as bactérias fermentativas hidrolíticas liberam exoenzimas.

Acidogênese: compostos formados na hidrólise são convertidos em ácidos lácticos, hidrogênio, gás carbônico, gás sulfídrico e amônia, com ação das bactérias fermentativas acidogênicas que dependem das concentrações de hidrogênio intermediário.

Acetogênese: Bactérias acetogênicas promovem a oxidação dos produtos gerados na acidogênese convertendo-os em substrato apropriado para bactérias metanogênicas; o ácido acético, o dióxido de carbono e o hidrogênio são considerados os precursores do biogás.

Metanogênese: Fase final de degradação da matéria orgânica, bactérias anaeróbicas (metanogênicas) convertem o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono em metano. Todas as fases estão demonstradas na Figura 5.



**Figura 5:** Etapas do processo de digestão anaeróbia:

Fonte: MOURA, 2011 adaptado por RODRIGUES, 2012.

Com base nestas considerações, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a interferência da agitação e aquecimento na produção de biogás e na qualidade do biofertilizante em três modelos de biodigestores alimentados com dejetos suínos em uso nas propriedades rurais acima citadas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

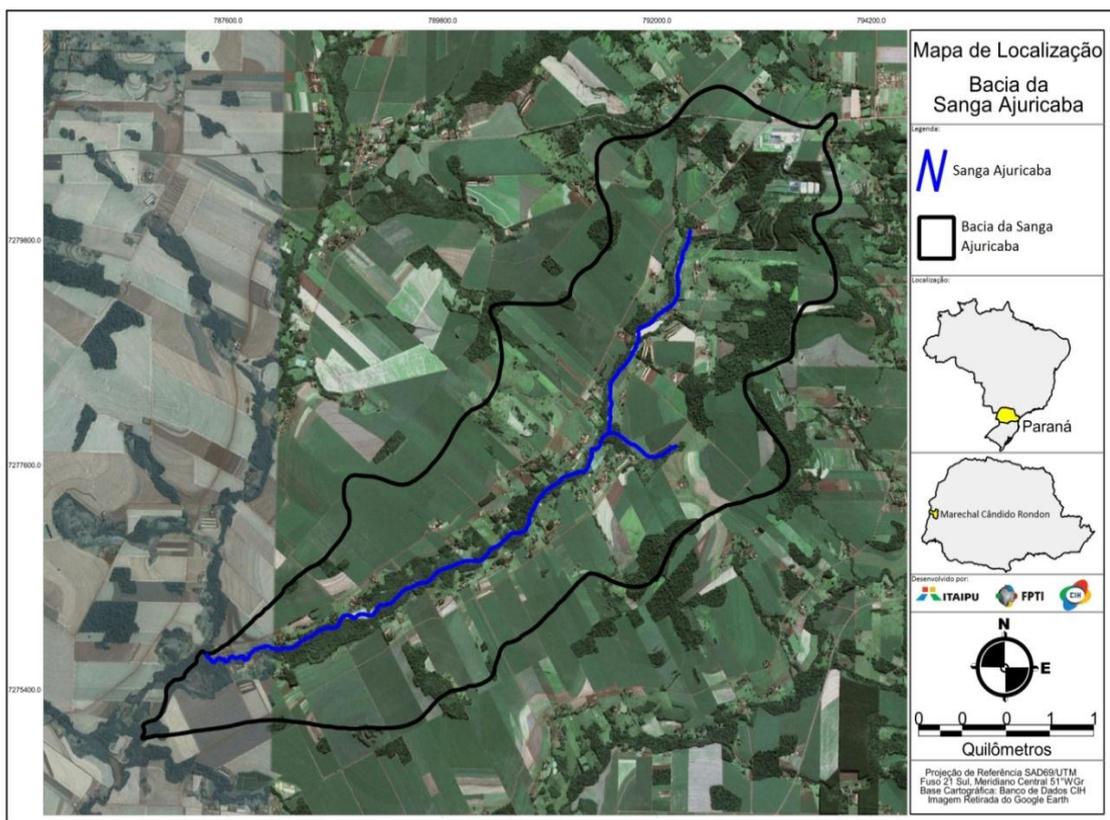
A pesquisa foi realizada por meio da avaliação de parâmetros e comparação do desempenho entre três biodigestores em operação sendo dois modelos canadenses de forma retangular, um tipo convencional e outro com agitação que entraram em funcionamento em julho de 2011 e um modelo de mistura completa (agitado e aquecido), que entrou em funcionamento em novembro de 2013, todos alimentados com dejetos suínos.

Cada biodigestor é representado por uma letra, sendo:

- (A) Biodigestor de mistura completa com capacidade de 1700 m<sup>3</sup> de dejetos, possui alimentação diária sistemas de agitação mecânica e bombeamento dos dejetos, aquecimento mediante trocador de calor, e injeção de ar através de compressor, com temperatura interna mantida em 30 °C.
- (B) Biodigestor canadense retangular com capacidade de 360 m<sup>3</sup> com alimentação diária e agitação dos dejetos mediante bombeamento, que retira o dejetos num determinado ponto e retorna em outro ponto, com agitação de 15 minutos e intervalo de 30 minutos.
- (C) Biodigestor canadense retangular com capacidade de 270 m<sup>3</sup> com alimentação diária sem agitação e sem aquecimento.

Os biodigestores de modelo canadense estão instalados no Condomínio de Agroenergia para Agricultura Familiar da Micro-bacia da Linha Ajuricaba, projeto da Itaipu Binacional, em Marechal Cândido Rondon - PR, Latitude 24°34'50.05"S e Longitude 54°6'52.66"O.

Na Figura 6 apresenta-se o mapa da bacia da Sanga Ajuricaba onde estão instalados 33 biodigestores incluindo os do estudo atual. A Figura 7 apresenta a fotografia da bomba e parte da tubulação utilizada para fazer a agitação no biodigestor e a Figura 8 mostra o painel no qual está instalado um controlador que aciona a bomba e faz a agitação do dejetos. No caso desta pesquisa, nos biodigestores retangulares um deles tem o sistema de agitação e outro não possui este sistema. A Figura 9 apresenta o esquema da agitação em biodigestores retangular.



**Figura 6:** Bacia da Sanga Ajuricaba.

Fonte: ITAIPU, Plataforma de Energias Renováveis – Julho 2011.

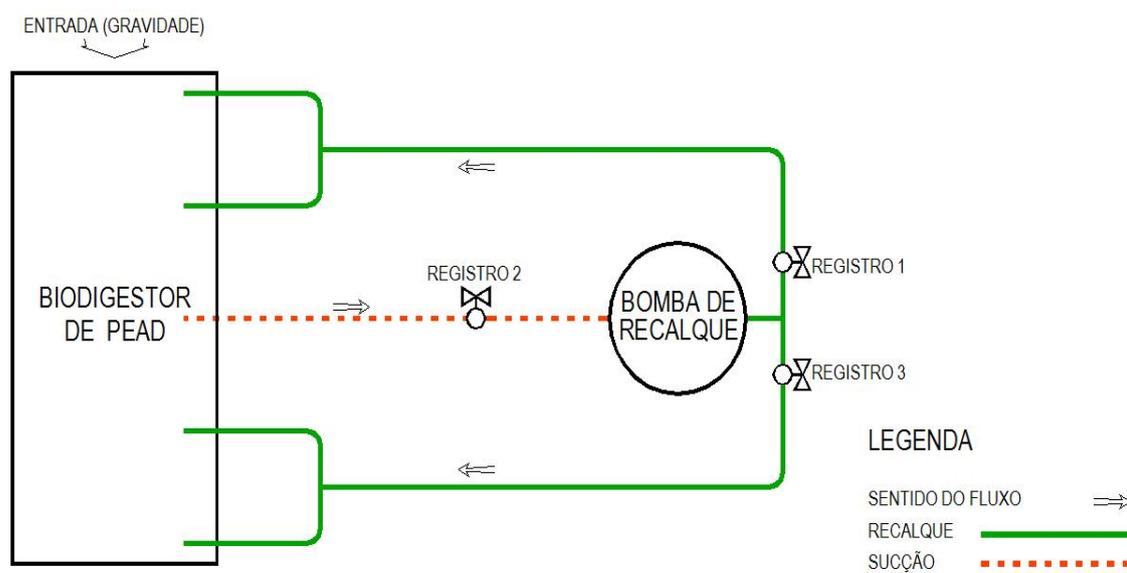


**Figura 7:** Arranjos típicos de registros para controle da agitação.



**Figura 8:** Painel de controle instalado na casa de maquinas do biodigestor

B.



**Figura 9:** Esquema da agitação em biodigestores retangular.

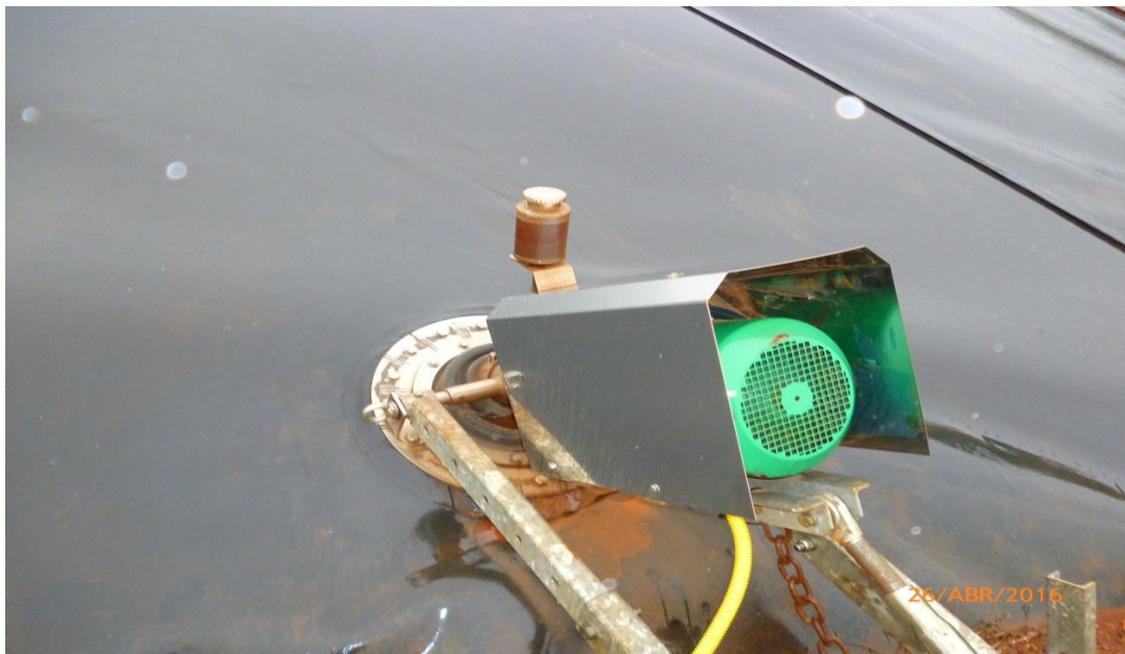
Fonte: ITAIPU, Plataforma de Energias Renováveis – Julho 2011.

O local de agitação pode ser mudado com o fechamento e abertura de registros já instalados no biodigestor e, para isso, seria necessário mão de obra de um funcionário da granja, mas no caso em estudo todos os registros ficam abertos.

O biodigestor de mistura completa e circular possui um agitador mecânico e um trocador de calor para garantir que a temperatura permaneça em 30 °C, e está localizado na Cerâmica Stein em Entre Rios do Oeste – PR, Latitude 24°43'9.39"S e Longitude 54°13'33.80"O (Figura 10). A Figura 11 mostra o agitador mecânico instalado no biodigestor e a Figura 12 apresenta as duas bombas necessárias, uma para recirculação do dejetos entre o trocador de calor e o biodigestor, e a outra para levar a água quente do trocador de calor instalado no escapamento do motor até o trocador instalado no interior do biodigestor. A Figura 13 mostra o compressor utilizado para injeção de ar e o quadro de comando, com um visor onde podemos observar a temperatura de 30,8 °C no interior do biodigestor.



**Figura 10:** Foto aérea do biodigestor mistura completa.



**Figura 11:** Foto do agitador do biodigestor de mistura completa.



**Figura 12:** Foto de bombas de recirculação.



**Figura 13:** Foto do painel de controle e compressor para injeção de ar.

Para comparação do desempenho dos biodigestores foram determinados os parâmetros de acidez ( $\text{mg-L}^{-1}$ ), alcalinidade total ( $\text{mg-L}^{-1}$ ), DQO ( $\text{mg-L}^{-1}$ ), pH, Sólidos (Totais, Fixo e Voláteis ( $\text{mg-L}^{-1}$ )), por meio dos métodos APHA(2005).

A qualidade do biogás foi avaliada por meio das medidas de teores de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  coletados com equipamento de detecção de gases, marca Dräger, modelo: X-am7000, com faixas de atuação,  $\text{CO}_2$  - 0 a 100%,  $\text{CH}_4$  - 0 a 100%,  $\text{H}_2$  - 0 a 2000ppm,  $\text{O}_2$  - 0 a 25%, e  $\text{H}_2\text{S}$  - 0 a 1000ppm (Figura 14).



**Figura 14:** Dräger, modelo: X-am7000

O período de coleta de dados foi de 245 dias com intervalos de 35 dias referentes ao tempo de retenção hidráulica dos biodigestores totalizando sete coletas após a qualificação foram solicitadas três novas coletas totalizando as 10 coletas realizadas no experimento.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostragem foi realizada em duas etapas sendo a primeira com sete (7) coletas, de 29/09/15 a 26/04/16 com intervalos de 35 dias entre uma coleta e outra, e a segunda com três (3) coletas, no período de 15/08/16 a 24/10/16 totalizando 10 coletas em três modelos de biodigestores. Para realizar as coletas das amostras dos dejetos na entrada e na saída de cada biodigestor aguardou-se um tempo de 15 minutos após o início da alimentação dos mesmos.

A metodologia utilizada nas análises seguiu os padrões internacionais, segundo o Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater, publicado pela American Public Health Association (APHA, 2005) e foram realizadas no Laboratório de Limnologia Aplicada/Gerpel/Fundação Universitária/Campus de Toledo.

A Figura 15 mostra os pontos de coleta na entrada e saída de cada biodigestor respectivamente.



**Figura 15:** Entrada e Saída do biodigestor modelo A.

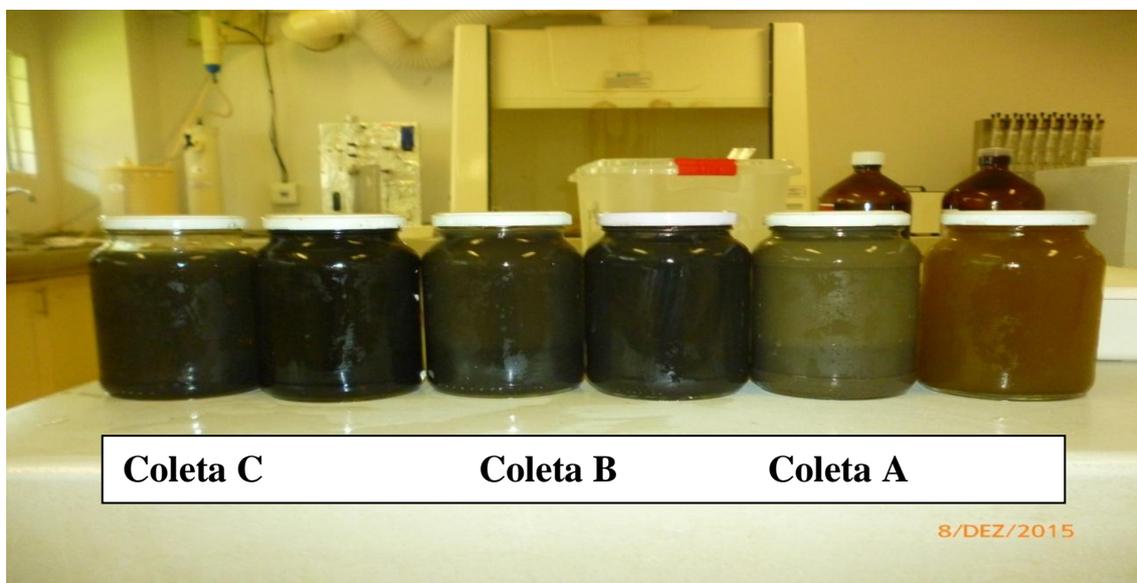


**Figura 16:** Entrada e saída do biodigestor modelo B.



**Figura 17:** Entrada e saída do biodigestor modelo C.

A Figura 18 apresenta a diferença de coloração para cada coleta, sendo possível observar a decantação da parte orgânica em algumas amostras.



**Figura 18:** Foto das amostras coletadas no dia 08/12/2015.

Na Tabela 3 encontram-se os valores da % de redução e o aumento do afluente para cada modelo de biodigestor nos seguintes parâmetros: Acidez, Alcalinidade Total, DQO, Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis e pH.

Observou-se o aumento no efluente em relação ao afluente das amostras do modelo C, e pode ter ocorrido devido à falta de agitação, manutenção e limpeza, ocasionando caminhos preferenciais dos dejetos no interior do biodigestor.

**Tabela 2:** Redução dos parâmetros estudados para as 10 amostras dos biodigestores e desvio padrão (DP).

Parâmetros	REDUÇÃO A	REDUÇÃO B	REDUÇÃO C	DP (%)
<b>Sólidos totais</b>	-69,86%	-13,16%	+107,20%	0,66
<b>Sólidos fixos</b>	-71,23%	-13,13%	+107,15%	0,66
<b>Sólidos voláteis</b>	-82,00%	-51,44%	+192,72%	1,15
<b>Acidez</b>	-52,32%	-44,81%	-22,57%	0,12
<b>Alcalinidade total</b>	-29,04%	-19,55%	-13,65%	0,06
<b>pH</b>	+5,35%	+2,64%	+1,06%	0,02
<b>DQO</b>	-37,20%	+5,03%	+291,96%	1,37

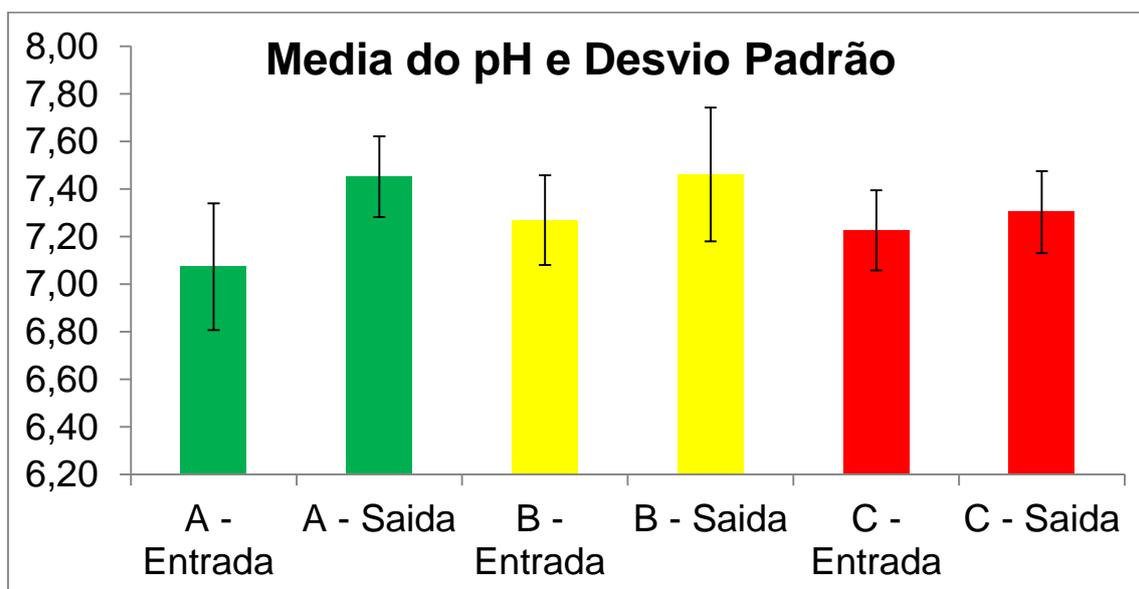
Valores negativos (–) indicam redução na saída dos biodigestores e valores positivos (+) indicam acréscimo na saída.

#### 4.1. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

O Potencial Hidrogeniônico (pH) é um fator importante no processo de biodigestão e funciona como agente regulador no interior do biodigestor inibindo ou facilitando a degradação anaeróbia.

Em relação ao pH observou-se aumento na saída dos dejetos como pode-se observar na Figura 19, porem apresenta-se na faixa ideal indicada por outros autores. Segundo Ortiz et al.(2014), na digestão anaeróbia incompleta com dejetos de suínos, o pH ácido permite o crescimento de bactérias e produção de amônia livre. Valores de pH acima de 8,5 inibem o processo e torna-se tóxico para bactérias metanogénicas (YENIGUN e DEMIREL, 2013).

Um pH entre 6,5 - 7,5 favorece as atividades metanogênicas, enquanto as bactérias acidogênicas são menos sensíveis a variações de pH (LEITÃO et al., 2006). Esta atividade é reduzida com pH mais baixos, favorecendo a produção de ácidos graxos voláteis que acidificam o meio.



**Figura 19:** Media do pH dos biodigestores, sendo A, B e C, os modelos de biodigestores e desvio padrão para cada modelo.

Na análise dos dados de pH, pode-se observar que todos os modelos de biodigestor favorecem o crescimento das bactérias metanogênicas. Verifica-se aumento no pH para todos os biodigestores, mas o biodigestor A modifica o pH da entrada para a saída de 5,4%, o biodigestor B modifica 2,6% e o biodigestor C modifica 1%.

Utilizando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade observou-se que não há diferença entre as amostras de pH como mostra a Tabela 4.

**Tabela 3:** Teste de Tukey para pH

Modelo e Local	Media	C.V.	F
A - Entrada	7,07 a	13.24	1.8615 ns
A - Saída	7,45 a		
B - Entrada	7,26 a		

B - Saída	7,46 a
C - Entrada	7,22 a
C - Saída	7,30 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, indicando que o parâmetro pH não sofre influencia entre os modelos de biodigestores estudados.

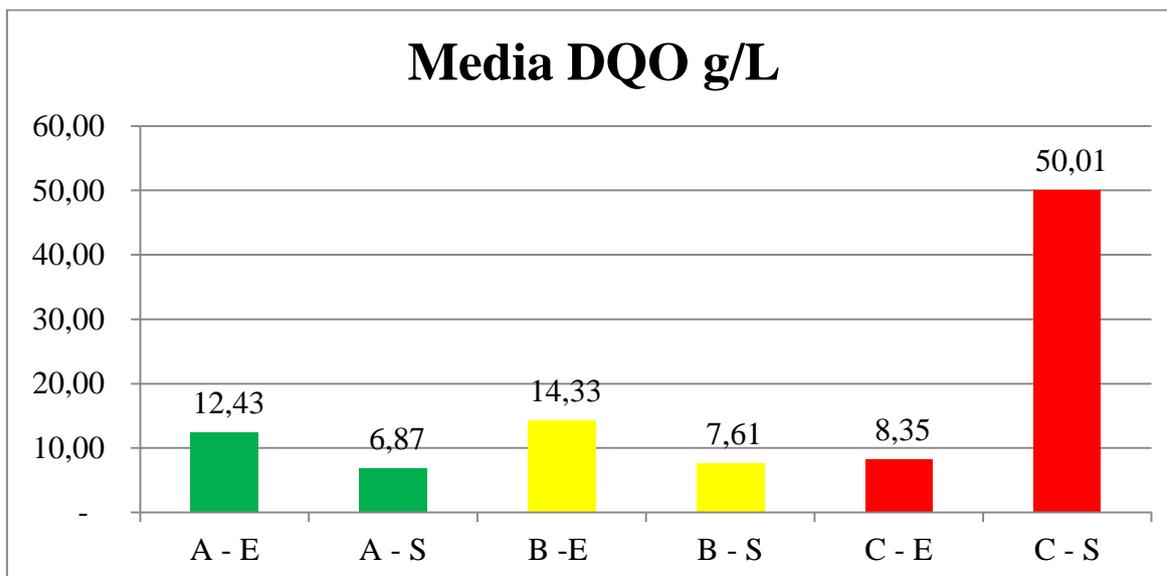
#### 4.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

A análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) é utilizada frequentemente em tratamento biológico, pode ser utilizada em outros processos.

A variação da DQO observada deve-se às características do dejetos, já que este não passou por nenhum tipo de padronização, em relação ao conteúdo de água e aos produtos de limpeza nos chiqueiros (CARMO *et al.*, 2002). Afluente sem separação da parte sólida e com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 36 dias apresentam maior redução de DQO (ORRICO Junior *et al.*, 2009).

De acordo com os dados determinados por meio do método utilizado (APHA 2005), pode-se observar uma redução da DQO média de -37,20% na saída do biodigestor modelo A; já o modelo B houve um aumento de 5,03% e C um aumento significativo na saída com 291,96%, sendo que altos valores da DQO indicam maior concentração de matéria orgânica e baixas concentrações de oxigênio.

**Figura 20:** Média de DQO em g-L<sup>-1</sup> para os três modelos de biodigestores na entrada e saída.



No caso do biodigestor modelo C o longo período sem agitação e sem limpeza favorece a decantação da matéria orgânica, aumentando significativamente os resultados da DQO na saída do biodigestor.

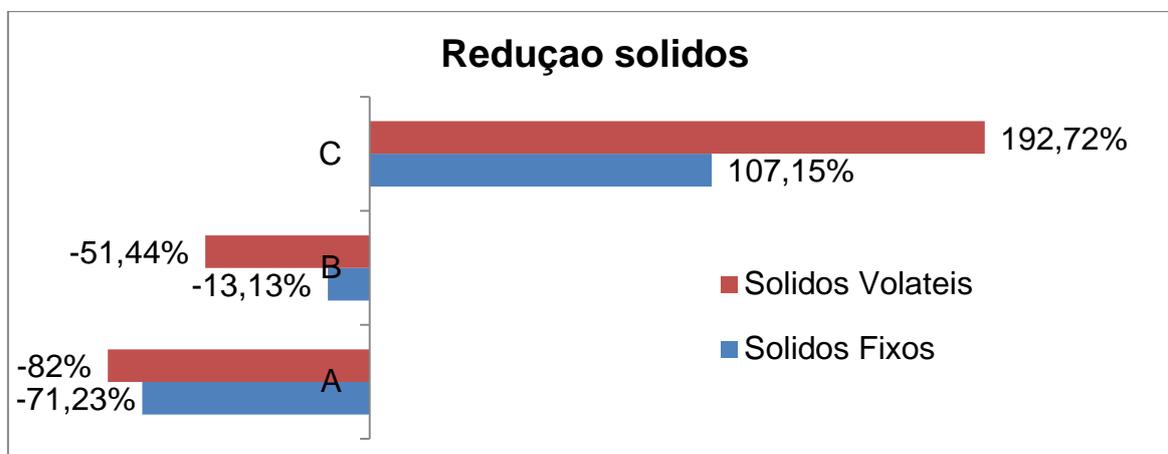
### 4.3. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

A maior remoção dos compostos orgânicos em relação a Sólidos Totais, fixos e Voláteis acontece principalmente entre o 30º e 60º dia em que o dejetos está armazenado (dos SANTOS, *et al*, 2006).

A Figura 21 mostra a % media de remoção para os três modelos de biodigestores, indicando que os modelos A e B apresentaram maior redução de sólidos, principalmente no modelo A (mistura completa).

Observa-se que cada modelo apresentou diferentes índices na redução destes parâmetros, indicando o tipo manejo de cada propriedade e a eficiência de cada biodigestor. Em dejetos com maior taxa de sólidos voláteis pode ser observado maior produção de metano já que os sólidos voláteis totais representam a matéria orgânica, e os sólidos fixos são os minerais e toda matéria inorgânica (VON SPERLING, 2005). O modelo C apresenta um aumento dos sólidos devido ao longo período sem manutenção, agitação e limpeza de fundo indicando que o mesmo possui caminhos preferencias para passagem dos

dejetos no seu interior e assim arrastando parte dos sólidos depositados no interior do biodigestor.



**Figura 21:** Média dos valores de redução obtidos para Sólidos Fixos e Voláteis para os biodigestores comparando-se a entrada e a saída.

Valores negativos (–) indicam redução na saída dos biodigestores e valores positivos (+) indicam acréscimo na saída.

#### 4.4. DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE E ACIDEZ

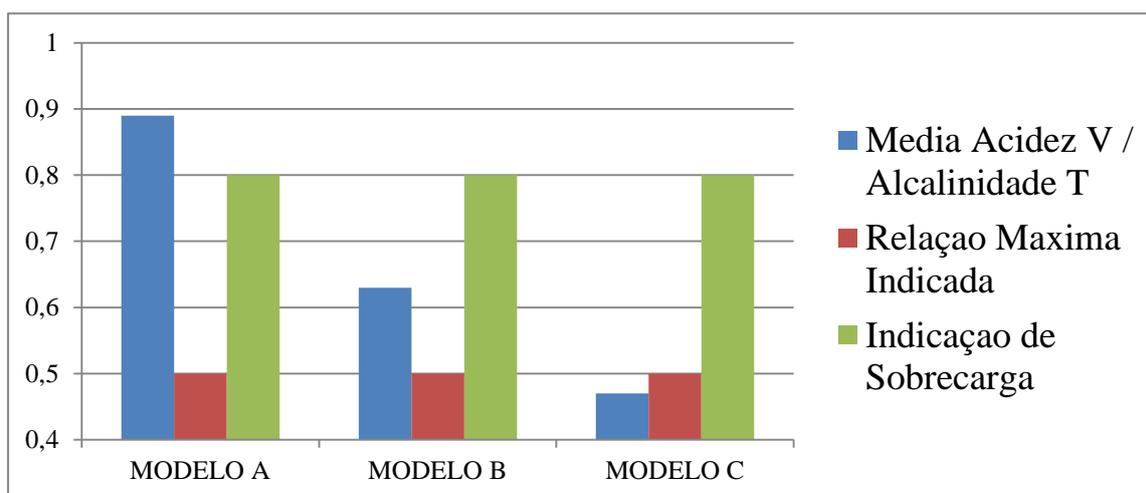
Alcalinidade e acidez são parâmetros importantes na digestão anaeróbia, pois em cada fase da digestão têm-se bactérias e arqueas que necessitam de um ponto ideal de acidez ou alcalinidade (MOURA, 2011). A alcalinidade mede a quantidade dos carbonatos de magnésio e cálcio ou seus equivalentes presentes na digestão, realizando a neutralização dos ácidos, pelo efeito tampão do carbonato (KUNZ, 2011).

A concentração de acidez teve variação no decorrer do experimento, o que pode ter ocasionado desequilíbrio nas fases de fermentação ácida, a metanogênese.

Segundo Silva (1977), para uma boa digestão anaeróbia a relação de Acidez volátil/Alcalinidade total deve estar entre 0,1 e 0,5, pois valores acima desta faixa indicam instabilidade, distúrbios e sobrecarga na digestão anaeróbia. Valores próximos de 1,0 indicam inibição da metanogênese e futuro colapso do sistema.

No experimento realizado a campo foi observado que a relação de acidez/alcalinidade teve variações acima de 1,0 para os biodigestores A e B e para o biodigestor C o maior valor foi 0,9, sendo que a media da relação para os três modelos ficaram abaixo de 0,9 como mostra a Figura 22.

**Figura 202:** Media referentes a relação de acidez volátil / alcalinidade total em  $\text{mg-L}^{-1}$ .



As medias de acidez do experimento ficaram com valores acima do encontrado por Campos, Carmo e Botelho (2006) de  $150 \text{ mg-L}^{-1}$  de acidez, e valores superiores a este indicam que o biodigestor não esta operando em fase ótima. Esta variação pode ocorrer antes mesmo de surgir alterações no pH.

#### 4.5. COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

A Tabela 5 apresenta a concentração do biogás obtido em cada biodigestor estudado, comparando-se os dados com os obtidos por Groth (2012).

**Tabela 4:** Composição Media do biogás em cada biodigestor

Produção	Biodigestor	Biodigestor	Biodigestor	Referencia
Media	A	B	C	Groth (2012)

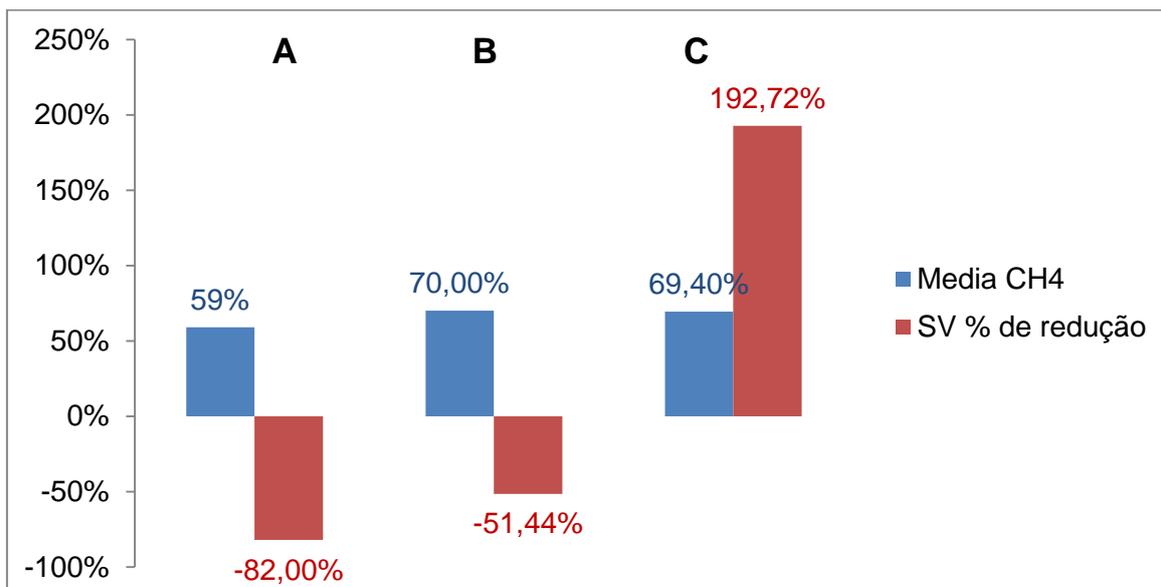
Composto	%	%	%	%
CO <sub>2</sub>	40,20	32,60	32,60	<b>25-55</b>
CH <sub>4</sub>	59	70	69,4	<b>40-75</b>
H <sub>2</sub>	0,0126	0,2	0,2	<b>0-1</b>
O <sub>2</sub>	2,30	0,5	0,74	<b>0-2</b>
H <sub>2</sub> S	0,0046	0,1	0,1	<b>0-3</b>

Por meio da análise dos dados coletados obteve-se media de produção para cada modelo de biodigestor com resultados comparáveis ao determinado por Groth (2012), para produção de metano, dióxido de carbono e oxigênio. No entanto, foram obtidos teores de gás Hidrogênio e gás sulfídrico mais elevados para os modelos B e C podendo comprometer o gerador e as demais partes metálicas nas quais este biogás tiver contato. A presença de altas concentrações de gás sulfídrico inviabiliza seu uso em motores, pois é extremamente reativo, situação agravada quando esta sob pressão e temperaturas elevadas e presença de umidade (GÜLZOW,2013).

Neste caso, o biodigestor A apresenta teor baixo de gás sulfídrico, o que implica no uso de biogás em motores estacionários para geração de energia elétrica sem que haja comprometimento devido à corrosão das partes metálicas e acúmulo de borra no pistão. De acordo com Santos (2000), o teor de gás sulfídrico para uso em motores deve ser menor que 1000 ppm (<1%).

No caso específico do biodigestor modelo A, a baixa concentração de H<sub>2</sub>S ocorrem devido à injeção de oxigênio como descreve HAAS (2013) que, dependendo da temperatura, do tempo de reação e posição na qual o ar é adicionado, a concentração do Sulfeto de Hidrogênio é reduzida em até 95%, com concentração final menor que 0,005%.

A Figura 23 apresenta a media de produção de metano para cada biodigestor bem como a porcentagem de redução media de sólidos voláteis para cada modelo.



**Figura 213:** Media de produção de CH<sub>4</sub> e redução média de sólidos voláteis. Valores negativos (–) indicam redução na saída dos biodigestores e valores positivos (+) indicam acréscimo na saída para media de SV.

O biodigestor A de mistura completa apresentou-se menos eficiente na produção de CH<sub>4</sub>, sendo que Ferreira (2015) indica que a queda no rendimento da produção de CH<sub>4</sub> está mais relacionado às cargas orgânicas e o pH do substrato, do que à temperatura. Souza (2005), Silva (1983) e Lucas Junior *et al.*(1987), referem-se à agitação da biomassa como parte interferente na digestão e, conseqüentemente, na produção de biogás, sendo sua finalidade manter o substrato com temperatura uniforme e evitar a formação de crostas.

**Tabela 5:** Media de produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> para os três modelos de biodigestores

Modelo	Media CH <sub>4</sub> (%)	F	Media CO <sub>2</sub> (%)	F
A	59.00 a	2,9608 ns	40.20 a	11.8848**

<b>B</b>	70.33 a	32.60 b
<b>C</b>	69.40 a	32.60 b
<b>C.V.(%)</b>	12.15	8.10

Em cada coluna, as médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ).

C.V. - coeficiente de variação

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ ).

Segundo Souza (2008) o efeito da agitação foi significativo na produção de metano com redução de 16,7%, na temperatura de 40°C e TRH de 10 dias.

Em geral, a agitação favoreceu a produção volumétrica de metano para os TRHs mais baixos (SOUZA, 2008).

De modo geral, o biodigestor A (mistura completa) apresentou melhores índices no efluente, indicando sua eficiência. A redução de sólidos voláteis, fixos e totais e na DQO foram mais altas comparadas ao biodigestor B (Canadense com agitação).

O biodigestor C (sem agitação ou controle de temperatura) apresentou aumento na quantidade de sólidos voláteis totais e fixos, além da DQO, indicando que o modelo não permite a digestão completa dos dejetos de maneira eficiente, e que a ausência de agitação tem implicado em formação de material sólido e crostas no interior do biodigestor, provocando a formação de caminhos preferenciais e diminuição no tempo de retenção hidráulica. O aumento nos parâmetros citados indica o deslocamento de porções de material não digerido do interior do biodigestor, que se acumulará nos tanques de estabilização.

Este fato reforça a ideia de que biodigestores necessitam de manejo contínuo e cuidadoso e a importância da agitação e controle de temperatura para eficientemente tratar dejetos danosos ao meio ambiente.

A relação de acidez volátil/alcalinidade total indica que o modelo A está próximo de entrar em colapso e o modelo B está acima do indicado. Segundo estudos de Silva (1977) quando esta relação passa de 0,8 indica uma sobre carga

e acima de 1,0 significa o colapso total. O modelo C ficou abaixo de 0,5 sendo este o modelo que está há cinco (5) anos sem ser realizada uma limpeza e ou agitação.

Os modelos estudados mantem o pH dentro da faixa ideal indicada para digestão anaeróbica. Nas concentrações de sólidos fixos, voláteis e totais, os modelos com agitação A e B, obtiveram uma maior redução na saída oque resulta em maior produção de biogás.

#### 4.6: ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE BIOGÁS GERADO.

Para o cálculo da quantidade de dejetos produzidos por dia utilizou-se a equação 1 e para o calculo da produção total de biogás utilizamos a equação 2.

$$\mathbf{Dpd= Dda* Na} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual:

**Dpd:** Dejetos produzidos por dia (m<sup>3</sup>)

**Na:** Quantidade de animais

**Dda:** Dejetos produzidos por dia por animal (m<sup>3</sup>)

:

$$\mathbf{Cpb= Na* x.} \quad \text{Equação (2)}$$

Na qual:

**Cpb:** Capacidade de produção de biogás (m<sup>3</sup>/dia)

**Na:** Número de animais

**x:** produção de biogás por animal (m<sup>3</sup>)

A partir destas equações, o biodigestor modelo A poderia produzir 462 m<sup>3</sup>-dia<sup>-1</sup>, o modelo B poderia produzir 114,80 m<sup>3</sup>-dia<sup>-1</sup>, e o modelo C poderia produzir 53,20 m<sup>3</sup>-dia<sup>-1</sup>de biogás.

#### 4.7: CUSTO MÉDIO DE IMPLANTAÇÃO DOS BIODIGESTORES ESTUDADOS.

Os valores foram calculados a partir de orçamentos validos no Estado de Santa Catarina, para construção dos modelos estudados neste trabalho a uma

distancia media de 30 km da sede da empresa, com profundidade máxima de 3m e construção da casa de maquinas a uma distancia de 10m do biodigestor.

**Tabela 6:** Custo médio de implantação dos biodigestores estudados

<b>Modelo</b>	<b>Capacidade do biodigestor</b>	<b>Mistura Completa</b>	<b>Com Agitação</b>	<b>Lagoa Coberta</b>
		<b>R\$ 155,00m<sup>3</sup></b>	<b>R\$ 105,00m<sup>3</sup></b>	<b>R\$ 85,00m<sup>3</sup></b>
<b>A</b>	1700 m <sup>3</sup>	<b>R\$ 263.500,00</b>	R\$ 178.500,00	R\$ 144.500,00
<b>B</b>	360 m <sup>3</sup>	R\$ 55.800,00	<b>R\$ 37.800,00</b>	R\$ 30.600,00
<b>C</b>	270 m <sup>3</sup>	R\$ 41.850,00	R\$ 28.350,00	<b>R\$ 22.950,00</b>

O tempo de retorno do investimento varia de acordo com a finalidade da implantação do biodigestor. No caso dos biodigestores estudados, o modelo A teve o retorno do valor investido em três (3) anos, segundo o proprietário que utiliza o biogás produzido para gerar energia que é consumida em sua olaria. Na implantação dos modelos B e C foram utilizados recursos provenientes de projetos da Itaipu e o biogás produzido nas propriedades e encaminhado para Micro Central Termoelétrica (MCT).

## 5. CONCLUSÃO

O correto dimensionamento e manutenção dos biodigestores proporcionam alta produção e qualidade do biogás e, consecutivamente, biofertilizante de melhor qualidade agronomica.

Na comparação dos resultados observam-se alguns pontos nos quais há divergência entre os modelos analisados, pois a produção média de metano ( $\text{CH}_4$ ) para o biodigestor A de mistura completa ficou abaixo de 60%, porém sua produção de biogás é constante. Para os modelos B e C, a produção média de metano ( $\text{CH}_4$ ) ficou próxima a 70%, mas sua produção não é constante e sofre interferências climáticas, levando um maior tempo para iniciar a produção do biogás.

A agitação proporciona maior redução dos parâmetros analisados presentes nos dejetos do modelo A e B e o indicador de sobrecarga e a relação de acidez e alcalinidade que nestes modelos está próximo de 0,8 que é o máximo esperado podendo estes entrar em colapso a qualquer momento.

O modelo C é basicamente uma lagoa coberta e obteve resultados que indicam caminhos preferenciais para passagem dos dejetos ocasionando o arraste de parte da matéria orgânica armazenada em seu interior levando a um aumento dos sólidos e da DQO na saída deste biodigestor.

Com a implantação de uma bomba de recirculação ou um agitador mecânico o modelo C poderia melhorar seus resultados em relação aos parâmetros nos dejetos de saída e na produção do biogás.

Biodigestores de mistura completa mantem uma produção de biogás constante em comparação aos outros modelos estudados que necessitam de determinado período de tempo para dar início a produção de biogás após a entrada dos dejetos e, assim, obter uma produção constante de biogás para ser convertido em energia por meio de geradores.

## 6. REFERENCIAS

ANEEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da energia elétrica 2009**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> .Acesso em 02 mai. 2016.

APHA - American Public Health Association 2005. **Métodos padrão para o exame de água e águas residuais**. Washington. 21ª edição.

BARRERE, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 2. Ed. São Paulo: Icone, 2003, 106 p.

BIOENERGIA, Canal – Jornal da. **Biodiesel e Biogás: O potencial da produção de biogás**. 2016. Disponível em: <<http://www.canalbioenergia.com.br/opcoes-de-materias-para-producao-de-biogas/>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

BIPERS- Boletim Informativo Pesquisa e Extensão. **Coletânea de Tecnologia sobre dejetos de Suínos**. 2002.

CALZA, Lana F. et al. **Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás**. *Eng. Agríc.* [online]. 2015, vol.35, n.6, pp.990-997. ISSN 1809-4430. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p990-997/2015>.

CAMPOS, C M.; CARMO, F. R do; BOTELHO, C. G. **Desenvolvimento e operação de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) no tratamento dos efluentes da suinocultura em escala laboratorial**. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.30, n. 1, p. 140, jan./fev.2006.

CARMO, F. R.; CAMPOS, C. M. M.; BOTELHO, C. G. **Desenvolvimento e operação de reator anaeróbio de manta de lodo (RAMAL/UASB), utilizando materiais alternativos**. In: Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Lavras, 15., 2002, Lavras, MG. Anais... Lavras: UFLA, 2002. p. 157.

CARVALHO, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 2º Ed. São Paulo: ícone, 2003. 106p.

CCE - CENTRO PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Guia Técnico do Biogás**. Algés: JE92 Projetos de Marketing Ltda, 2000.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K.S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. **Bioresource Technology**. v. 99, n.10, p. 4044–4064, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407001563>> Acessado em: 10 out. 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios – **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 5, 1997. 380 p.

DOS SANTOS, Mônica AA; SCHMIDT, Verônica; BITENCOURT, Vanessa C. **Esterqueiras: Avaliação Físico-Química e microbiológica do dejetos suíno armazenado**. 2006.

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético o biogás**. 2015. 124 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FILHO, Paulo Penido. **Os motores a combustão interna**. 1 ed. Belo Horizonte. 1983.699 p.

GLEIS, Stefan; GROTH, Michael. Conceitos de energia renovável - **Noções básicas de biogás, indústrias-chave, tecnologia de desgaseificação e geração de energia**. Acesso em 11 out. 2014.

GÜLZOW, Ot. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5. ed. Gülzow-prüzen Alemanha: FachagenturNachwachsendeRohstoffeE.v. (fnr), 2013. 236 p. Eng. Ftal. Marcos de Miranda Zattar.

JOHANN, C.D. **Dimensionamento de uma instalação para aproveitamento do biogás existente nas pequenas propriedades rurais.** 2012. 52 f. Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina. 2012.

HAAS, Luiza Beatriz. **Desenvolvimento de um filtro para a remoção de H<sub>2</sub>S de Biogás.** / Luiza Beatriz Haas.— Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013. 45 p.[http://www4.unioeste.br/portalpos/media/Dissertacao\\_Luiza\\_B\\_Hass.pdf](http://www4.unioeste.br/portalpos/media/Dissertacao_Luiza_B_Hass.pdf). Acesso em 25 de junho 2015.

HENN, A. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – condições de partida.** 2005, 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

HORIUCHI, JI; SHIMIZU, T.; TODA, K .; KANNO, T.; KOBAYASHI, M. 2002. **A produção seletiva de ácidos orgânico em reator anaeróbio de acido por controle de pH.** *Tecnologia Bioresource* 82: 209-213.

ITAIPU, Plataforma de Energias Renováveis. **Condomínio Ajuricaba.** Foz do Iguaçu. Julho 2011.

KUNZ, A. Biodigestão anaeróbia, parâmetros de interesse e manejo de instalações. In: **Capacitação em tecnologias do biogás para operação e tomada de decisão em condomínios de agroenergia,** Foz do Iguaçu, 2011.

LEITÃO , R. C .; Cornélio, A. V. H .; ZEEMAN , G .; et ai . **Os efeitos das variações operacionais e ambientais nos sistemas de tratamento de águas residuais anaeróbio : uma revisão.** *Tecnologia Bioresource* . n.97 , p.1105-1118 , 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405000052>> Acessado em: 15 maio 2016. doi: 10.1016/j.biortech.2004.12.007

MIRANDA, A. P.; AMARAL, L. A.; LUCAS JUNIOR, J. **Influência da temperatura na biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos e suínos**. In: X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. 2006.

MOURA, Johnson Pontes de. **Estudo do Dimensionamento da Produção de Biogás a partir de resíduos residenciais, industriais e de matrizes suínas a partir de uma revisão da literatura**. Disponível em: <<http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1155&class=02>>. Acesso em 13 out 2014.

NISHIMURA, R. **Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2009. Acesso em 06 out. 2014.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: A alternativa energética**. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1992. 93p.

OLIVEIRA, P.A.V. et al. **Manual de Manejo e utilização de Dejetos de Suínos**. Concórdia, Santa Catarina, CNPSA- EMBRAPA (Documento 27), 1993.

OLIVEIRA, S. V. W. B. **Estudo de Viabilidade de Aplicação do Biogás no Ambiente Urbano**. FUNDACE, Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia e Administração, Ribeirão Preto – SP. 2009.

ORRICO JUNIOR, M. A. P. **Biodigestão anaeróbia e compostagem de dejetos de suínos, com e sem separação de sólidos**. 2007. 77f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS Jr, J. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica.** Engenharia Agrícola, v.29, n.3, p.474-482. 2009. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162009000300014&lang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162009000300014&lang=pt) Acessado em: 12 out. 2014.

ORTIZ, Gerardo;VILLAMAR, Cristina Alejandra e VIDAL, Gladys. **Odor de digestão anaeróbia de dejetos de suínos: Influencia do pH, temperatura e carga orgânica** Sci. (Piracicaba, Braz.) [Online]. 2014, vol.71, n.6, pp.443-450. ISSN 0103-9016.<http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0372>.

PRATI, Lisandro. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** 83 f. Curitiba, 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica)--Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005. Disponível em:< <http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/148.pdf>>. Acesso em: 06 de out. 2014.

SILVA, M.O.S.A. **Análises físico-químicas para controle das estações de tratamento de esgotos.**São Paulo: CETESB, 1977. 226p.

SOUZA, Cecília de Fátima et al. **Produção volumétrica de metano: dejetos de suínos.** *Ciênc. agrotec.* [online]. 2008, vol.32, n.1, pp.219-224. ISSN 1413-7054. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542008000100032>.

SOUZA, M. E. **Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.** Revista DAE. V. 44, p. 88-94, 1984.

SOUZA, Cecília F .; LUCAS JUNIOR, Jorge de e FERREIRA, Williams PM. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de Suínos soluçar Efeito de Três temperaturas e Dois níveis de Agitação fazer pelo substrato: considerações sobre a partida.** Eng. Agríc. [Online] .2005, vol.25, n.2, pp.530-539. ISSN 0100-6916.

SPEECE, R. E. (1996 ) . **biotecnologia anaeróbia para efluentes industriais**. Arquebactéria Press, Nashville , Tennessee , EUA .

VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Introdução às máquinas hidráulicas**. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/honorato/arquivos/IntroducaoMaquinasHidraulicas.pdf>>. Acesso em 17out. 2014.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. vol 1. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p.

YENIGUM, Orhan; DEMIREL, Burak. **Inibição de amônia na digestão anaeróbia**: Uma revisão Processo de Bioquímica. V48, n. 5, p. 901-911, 2013.