

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

*RICARDO LUHM SILVA*

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO EM BIODIGESTORES  
ANAERÓBIOS COM CONTROLE DE TEMPERATURA**

*MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO*

*CURITIBA  
2016*

RICARDO LUHM SILVA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO EM BIODIGESTORES  
ANAERÓBIOS COM CONTROLE DE TEMPERATURA**

*Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Energias Renováveis do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Especialista em Energias Renováveis”.*

*Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria de Fátima dos Santos Ribeiro*

CURITIBA  
2016

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

*RICARDO LUHM SILVA*

### **PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO EM BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COM CONTROLE DE TEMPERATURA**

*Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 21 de novembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.*

---

*Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior*

*Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis*

---

*Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen*

*Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica*

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

*Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria de Fátima dos S. Ribeiro*  
*Orientadora - UTFPR*

---

*Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior*  
*UTFPR*

---

*Prof. Dr. Leandro Alberto Novak*  
*SANEPAR*

*O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso*

## RESUMO

SILVA, R.L. **Caracterização de biodigestores com controle de temperatura com enfoque na produção de biogás e metano na digestão anaeróbica**. 2016. 44 p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A utilização do processo de digestão anaeróbia com enfoque em tratamento de água e dejetos é uma prática comum em diversos países, porém com o crescimento populacional surgiram novas demandas para aperfeiçoar este processo e também aproveitar o biogás, por meio da sua queima, produzindo energia térmica e a possível transformação desta em eletricidade. Estudos realizados mostram que o controle da temperatura é essencial para aumentar a produção do biogás e também reduzir o tempo necessário para que o dejetos ou resíduo fique no reator e conclua seu tratamento. Neste contexto a presente pesquisa teve como objetivo analisar as tecnologias e as faixas de controle de temperatura utilizadas na literatura e os efeitos destas na produção do biogás. Foram identificadas as tecnologias com maior potencial para a aplicação em instalações com reatores anaeróbios já existentes, assim como para novas instalações, principalmente em regiões mais frias que estão sujeitas às variações bruscas na temperatura, o que é prejudicial ao processo. A tecnologia que apresentou a melhor configuração para obtenção mais rápida de biogás com uma composição de metano aceitável, com média de sessenta por cento de metano no biogás, foi o sistema de digestão anaeróbia em duas fases, ou também conhecido por two phase anaerobic digestion (TPAD), que utiliza um reator de fluxo ascendente, ou também conhecido por upflow anaerobic sludge blanket (UASB), adotando uma faixa de temperatura termofílica de 55°C com dois a três dias de retenção hidráulica, seguido de outro reator UASB na faixa de temperatura mesofílica de 35°C com doze a quinze dias de retenção hidráulica. Outra tecnologia estudada, com potencial de aumentar a produção de biogás no sistema foi o pré-tratamento do dejetos, como as técnicas de aquecimento por meio de micro-ondas e sistemas de tratamento mecânico por ultrassom que poderão ser incorporadas aos sistemas TPAD, necessitando mais experimentos para obter a melhor configuração de parâmetros e funcionamento do sistema para uma condição ótima de tratamento de dejetos e resíduos e uma maior produção de biogás.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia, Controle de Temperatura, Biogás, TPAD, UASB

## **ABSTRACT**

**SILVA, R.L. Characterization of anaerobic biodigesters with temperature control on biogas methane.** 2016. 44 p. Monograph (Specialization in Renewable Energy), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

*The use of anaerobic digestion process with a focus on water treatment and waste is a common practice in many countries, but with population growth came a new demand to improve the process, also to convert the biogas generated by anaerobic digestion, by burning it and converting thermal energy, transforming it into electricity. Studies show that the temperature control is essential to increase biogas production and to reduce the time required for the manure, sludge or waste to stay inside the reactor to complete their treatment. In this context, the present study is aimed to analyze which technologies and which temperature control levels are used and their consequent effects in the biogas production. New technologies have been identified with greater potential for plants that already use anaerobic reactors as well as for new projects, particularly for colder regions, which are subject to sudden variations in temperature which have a negative effect in the process. The best installation setting identified, with a higher potential for faster obtaining biogas with an acceptable methane composition, averaging sixty percent of methane in the biogas is the two phased anaerobic digestion (TPAD), which uses an upflow anaerobic sludge blanket (UASB), adopting a thermophilic temperature range of 55 °C with two to three days of hydraulic retention period, followed by another UASB reactor in the temperature range mesophilic 35°C with twelve to fifteen days of hydraulic retention period. Another technology was studied with potential to increase the biogas production in the system was the pre-treatment of the manure, such as the techniques of microwave heating and mechanical treatment systems, like ultrasound, which may be incorporated in future studies together with TPAD systems, but more experiments are needed to get the best parameter and operation system settings for optimal condition of waste, manure and sludge treatment for an increased biogas production.*

**Key Words:** Anaerobic Digestion, Temperature Control, biogas, TPAD, UASB.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Fluxo do processo de biodigestão anaeróbia para produção de metano.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2 – Faixas de temperatura de operação de bactérias em digestão anaeróbia</i> .....	<i>17</i>
<i>Figura 3 – Representação de digestor anaeróbio de um estágio e baixa carga</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4 – Representação de digestor anaeróbio de um estágio e alta carga.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 – Sistema de dois estágios de digestor anaeróbio de e alta carga.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 – Sistema com pré tratamento e dois estágios de digestor anaeróbio de e</i> <i>alta carga.</i> .....	<i>28</i>
<i>Figura 7 – Reator anaeróbio modelo indiano visto em corte</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8 – Reator anaeróbio modelo chinês visto em corte</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9 – Reator anaeróbio modelo marinha brasileira.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 10 – Reator anaeróbio modelo UASB com recirculação interna.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11 – Produção de Biogás em função da COV para diferentes temperaturas</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12 – Produção de Biogás em função da COV para faixa termófila variando</i> <i>pH.</i> .....	<i>36</i>
<i>Figura 13 – Produção de Biogás em função da COV para faixa mesófila variando pH.</i> .....	<i>36</i>
<i>Figura 14 – Fração de Metano no Biogás em função da COV para diferentes faixas</i> <i>de temperatura.</i> .....	<i>37</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Faixas de Composição do Biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 2 – Poder calorífico inferior do biogás e outros gases.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 3 – Dados de performance de diferentes tipos de pré-tratamentos.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 4 – Produção de metano para um sistema sem controle de temperatura .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 5 – Comparativo em relação a reatores de dois dias de TRH .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 6 – Dados de performance de um digestor alta carga com diferentes temperaturas.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 7 – Produção de metano de um digestor TPAD com diferentes TRH e faixas de temperatura.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 8 – Dados de diferentes sistemas TPAD variando TRH e COV.....</i>	<i>39</i>

## **LISTA DE SIGLAS**

*EEA – Empresa de Engenharia Ambiental.*

*pH – Potencial Hidrogeniônico*

*TRH – Tempo de Retenção Hidráulica*

*AGV – Ácidos Graxos Voláteis*

*VFA – Volatile Fatty Acids*

*NH<sub>3</sub> – Amônia*

*CO<sub>2</sub> – Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono*

*CH<sub>4</sub> – Metano*

*H<sub>2</sub> – Gás Hidrogênio*

*H – Hidrogênio Atômico*

*N – Nitrogênio Atômico*

*O – Oxigênio Atômico*

*H<sub>2</sub>S – Sulfeto de Hidrogênio ou gás sulfídrico*

*CO – Monóxido de Carbono*

*CO – Monóxido de Carbono*

*DQO – Demanda Química de Oxigênio*

*TPAD – Two Phased Anaerobic Digestion*

*ST – Sólidos Totais*

*SV – Sólidos Voláteis*

*VS – Volatile Solids*

*Q<sub>lodo</sub> – Vazão do afluente*

*OLR – Organic Load Rate*

*COV – Carga Orgânica Volumétrica*

*COV<sub>e</sub> – Carga Orgânica Volumétrica de entrada ou afluente*

*COV<sub>s</sub> – Carga Orgânica Volumétrica de saída ou efluente*

*COV<sub>rem</sub> – Carga Orgânica Volumétrica de removida ou destruída*

*Q<sub>biogás</sub> – Vazão do biogás*

*Q<sub>CH<sub>4</sub></sub> – Vazão de metano*

*C<sub>e</sub> – Concentração de sólidos orgânicos na entrada ou afluente*

*C<sub>s</sub> – Concentração de sólidos orgânicos na saída ou efluente*

*V<sub>bio</sub> – Volume Útil do reator ou digestor*

*°C – Graus Celsius*



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Delimitação do tema.....	11
1.2	Objetivos.....	11
1.2.1	Objetivos específicos.....	12
1.3	Metodologia.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Digestão anaeróbia.....	13
2.1.1	Etapas do processo de digestão anaeróbia.....	13
a)	Hidrólise.....	13
b)	Acidogênese.....	13
c)	Acetogênese.....	14
d)	Metanogênese.....	14
e)	Resumo do processo de digestão anaeróbia.....	14
2.1.2	Biogás e metano.....	15
2.1.3	Regimes de temperatura na digestão anaeróbia.....	17
2.1.4	Influência do potencial hidrogeniônico (pH) na digestão anaeróbia.....	18
2.1.5	Parâmetros operacionais dos biodigestores.....	19
a)	Carga volumétrica e Vazão diária de lodo bruto ou afluente.....	19
b)	Tempo de Retenção Hidráulica.....	20
c)	Mistura e agitação na digestão anaeróbia.....	20
2.1.6	Indicadores de eficiência dos biodigestores.....	20
a)	Remoção de sólidos voláteis.....	20
2.2	Eficiência na produção de metano.....	21
3	resultados.....	23
3.1	Classificação dos digestores anaeróbios.....	23
3.1.1	Sistemas de um estágio.....	23
a)	Digestor anaeróbio de baixa carga.....	23
b)	Digestor anaeróbio de alta carga.....	24
3.1.2	Sistemas de dois estágios e alta carga.....	25
3.1.3	Sistemas de dois estágios e alta carga com pré-tratamento.....	26
3.2	Modelos de biodigestores e controle de temperatura.....	28
3.3	Desempenho de sistemas de digestores anaeróbios.....	32

3.3.1	<i>Sistemas de um estágio sem controle de temperatura</i> .....	32
3.3.2	<i>Sistemas de um estágio e alta carga</i> .....	33
3.3.3	<i>Sistemas de dois estágios e alta carga</i> .....	37
4	<i>CONCLUSÃO</i> .....	40
	<i>Referências Bibliográficas</i> .....	42

## 1 INTRODUÇÃO

*A digestão anaeróbia consiste em um grupo de processos nos quais microrganismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio. Este processo de digestão reduz a carga orgânica descartada no meio ambiente e também gera biogás, utilizado como combustível, seja por meio da sua queima e a consequente obtenção de energia térmica, ou a transformação da energia térmica em energia elétrica. Este tipo de processo pode ser aplicado na indústria, no meio rural, urbano e também para propósitos domésticos.*

*Van Helmont foi um dos primeiros cientistas no século XVII a observar a produção de material inflamável de matéria orgânica em decomposição. Alessandro Volta, em 1776, já relacionava a variação da produção de biogás, com a quantidade de matéria orgânica disponível, ao observar regiões pantanosas. Estes locais reuniam as condições de matéria orgânica e ausência de oxigênio suficientes para as bactérias de digestão anaeróbia. Em 1856, Reiset detectou a formação de metano em estrumeiras e propôs um estudo para explicar o processo de decomposição anaeróbia deste tipo de resíduo. Em 1868, Bechamp concluiu que o metano proveniente da decomposição é formado a partir da ação de microrganismos. Popoff, em 1875, pesquisou diferentes tipos de matérias primas para obtenção do metano. Quinze anos após Popoff, Van Senu confirmou que a digestão anaeróbia era feita por microrganismos e Omeliansui conseguiu isolar os microrganismos que produziam diferentes tipos de compostos químicos necessários para a formação do metano. Nos anos subsequentes até o ano de 1967, houveram diversos experimentos descrevendo como estes microrganismos se comportavam, em quais etapas do processo de digestão anaeróbia cada um destes estava presente assim como cada subproduto que era produzido. (EMPRESA DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2005).*

*Após o século XIX, na Índia houve o primeiro registro de um equipamento dedicado a biodigestão da matéria orgânica por meio do processo anaeróbio. A partir do século XX iniciaram-se os estudos intensivos buscando maneiras de aumentar a eficiência de equipamentos de biodigestão, seja na produção do gás ou no tratamento de resíduos (ABBASI, 2011).*

*Dentre as diversas variáveis que possibilitam o aumento da eficiência das bactérias na digestão anaeróbia, a temperatura é um dos principais fatores. É possível classificar as bactérias que realizam o processo de digestão anaeróbia em dois grupos, considerando somente sua adaptação em determinadas faixas de temperaturas. As bactérias mesofílicas são mais adaptadas à faixa de 30 a 38°C, enquanto as termofílicas adaptam-se a uma faixa de temperatura entre 49 a 57°C. Nada impede a sobrevivência destas bactérias em outras faixas de temperaturas, mas suas capacidades de produção de biogás e a capacidade de redução da carga orgânica são drasticamente reduzidas (SPEECE,1996).*

*No Brasil, a aplicação de equipamentos que realizam digestão anaeróbia foi voltada inicialmente para o tratamento de dejetos da suinocultura e agora estas tecnologias estão se expandindo também para o tratamento de resíduos orgânicos urbanos e em etapas do tratamento de efluentes de esgoto (LIMA, 2007; LEITE, 2011).*

*Muitas das regiões brasileiras onde se aplicam tal tecnologia, estão localizadas em regiões de clima frio ou apresentam variações na temperatura, afetando assim o desenvolvimento das bactérias mesofílicas e termofílicas, podendo reduzir a produção de biogás. Por isso esses equipamentos têm seu desempenho reduzido no período do outono-inverno, justamente quando a demanda por energia é maior.*

### **1.1 Delimitação do tema**

*A necessidade de projetar e implantar sistemas de digestão anaeróbia de maior eficiência com relação a sua capacidade de gerar biogás, principalmente em períodos frios, fez com que estudos fossem desenvolvidos na área de controle de temperatura, para que houvesse um comportamento ideal do equipamento, fornecendo melhores condições para o desenvolvimento das bactérias.*

*Assim este estudo refere-se a tecnologias de biodigestores que adotam controle de temperatura e possuem o foco em maximizar a produção de biogás e metano.*

### **1.2 Objetivos**

*Caracterizar biodigestores com controle de temperatura e a avaliar a influência desses sistemas na produção de biogás e metano.*

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- *Identificar modelos de biodigestores com controle de temperatura do processo de biodigestão;*
- *Identificar as variáveis e parâmetros operacionais que influenciam na produção de biogás e metano;*
- *Verificar as faixas de temperatura utilizadas na digestão anaeróbia e seus efeitos na produção na produção de biogás e metano;*
- *Buscar os indicadores de eficiência de digestores anaeróbios com controle de temperatura*
- *Verificar quais biodigestores com controle de temperaturasão os mais promissores de acordo com os parâmetros de eficiência encontrados neste estudo.*

### **1.3 Metodologia**

*Este estudo foi realizado por meio de pesquisa bibliográfica utilizando-se, dissertações, teses, artigos de periódicos, assim como sites de empresas com tecnologias e soluções voltadas para o assunto de controle de temperatura no processo de digestão anaeróbia.*

*A caracterização dos biodigestores foi feita com base nas faixas de temperatura de operação, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica volumétrica e indicadores de eficiência como quantidade de biogás produzido diariamente, quantidade de metano contido no biogás e porcentagem de sólidos voláteis convertidos em gás.*

*Posteriormente foram analisados os equipamentos, sistemas e mecanismos com controle de temperatura mais promissores, que resultaram em uma maior produção de metano por quantidade de sólidos voláteis convertido, identificando as condições do experimento, como a temperatura de operação e o tempo de retenção hidráulica adotados para obter esse parâmetro de eficiência.*

*Os parâmetros e indicadores serão detalhados no decorrer deste estudo.*

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Digestão anaeróbia**

*Um biodigestor, ou reator de digestão anaeróbia é constituído por um ecossistema de micro-organismos que atuam em conjunto para converter matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia.*

*McCarty e Smith (1986) apud Speece (1996) descrevem que os microrganismos que constituem a digestão anaeróbia realizam um processo complexo de reações bioquímicas envolvendo muitas espécies de bactérias, que atuam de forma simbiótica. O processo que caracteriza os grupos de micro-organismos, pode ser dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.*

#### **2.1.1 Etapas do processo de digestão anaeróbia**

##### **a) Hidrólise**

*O processo de degradação da matéria orgânica inicia-se com a hidrólise do afluente gerando-se compostos mais simples. Em outras palavras, os compostos orgânicos complexos ou polímeros orgânicos que constituem o dejetos/efluente, são “quebrados” em compostos mais simples como açúcares, ácidos orgânicos e aminoácidos, que poderão ser assimilados por outros microrganismos (PALMISANO, 1996).*

*Esta conversão é executada por enzimas produzidas por bactérias fermentativas hidrolíticas. A etapa hidrolítica é considerada a mais lenta do que as etapas subsequentes, o que limita o processo global de digestão anaeróbia. Os principais fatores que influenciam a hidrólise são: pH, temperatura, tempo de retenção hidráulica, tamanho e distribuição das partículas (SALOMON, 2007).*

##### **b) Acidogênese**

*A acidogênese é a segunda etapa da digestão anaeróbia. Nesta etapa são produzidos ácidos, principalmente os orgânicos ou ácidos graxos voláteis ou AGV (volatile fatty acids, VFA), e alguns outros produtos como a amônia (NH<sub>3</sub>), gás carbônico (CO<sub>2</sub>), ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S)(APPELS,2008). O ácido acético, propiônico, butírico são os ácidos graxos voláteis que podem ser obtidos neste processo, porém*

o ácido acético é o produto mais comum nesta etapa. Esta etapa é considerada rápida, com um tempo de duplicação de microrganismos de aproximadamente 30 minutos (SALOMON, 2007). Há casos no qual as condições de temperatura e pH não são atendidas podendo desestabilizar o processo, atrasando o tempo necessário para os microrganismos se desenvolverem (ZUPANCI,2012).

### **c) Acetogênese**

Na terceira etapa, a acetogênese, existem dois mecanismos que transformam os AGVs formados anteriormente, em acetato, hidrogênio e gás carbônico: a acetogênese de hidrogenação, produz  $CO_2$  e  $H_2$  e a acetogênese dedesidrogenação, converte os ácidos graxos em acetato.

Somente o acetato e o hidrogênio são assimilados na etapa subsequente, que é composta por bactérias metanogênicas (SALOMON, 2007). Segundo Speece (1996) a maior parte do metano resultante provém do acetato.

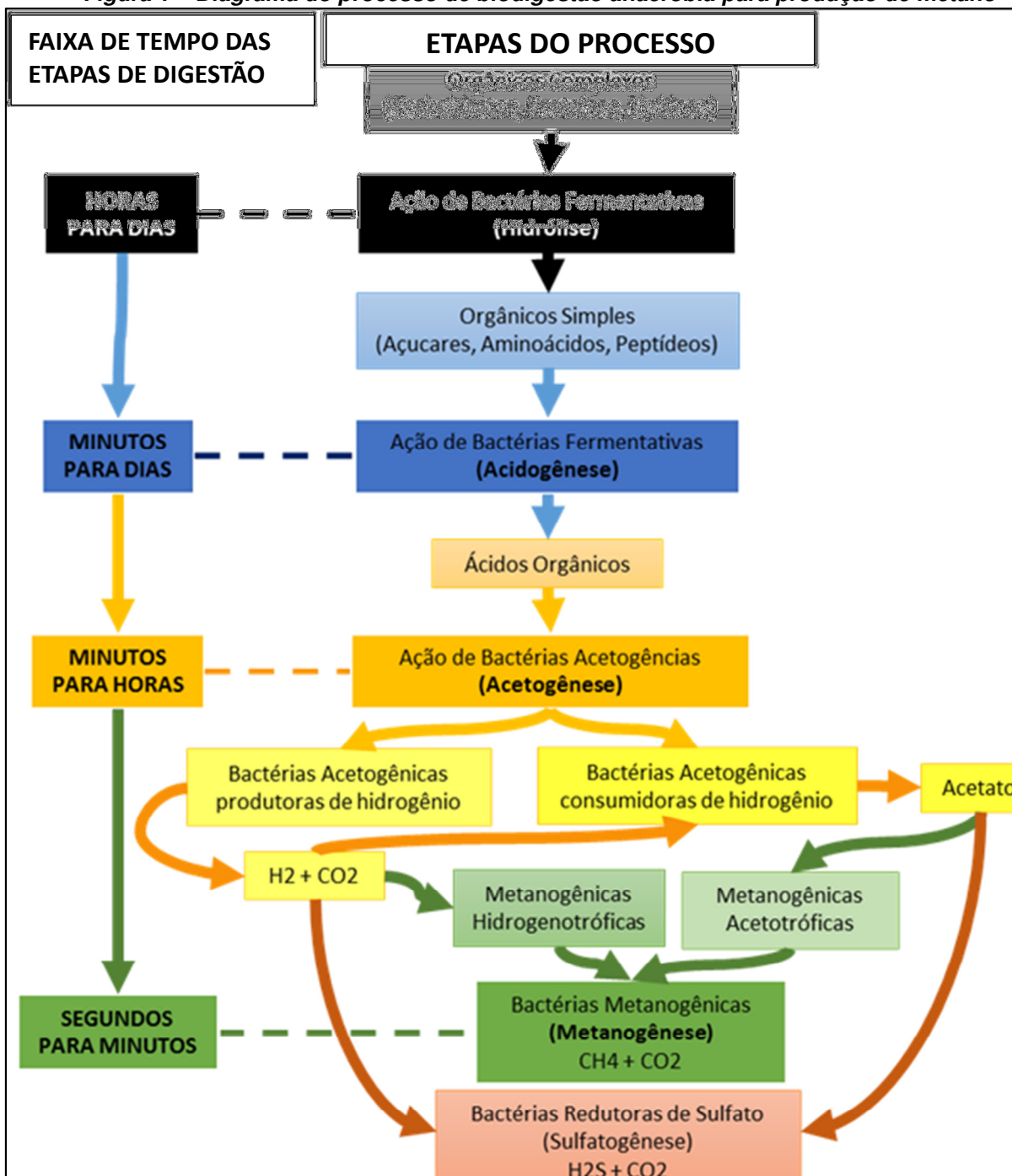
### **d) Metanogênese**

A última etapa deste processo consiste na ação de bactérias metanogênicas que convertem acetato e hidrogênio ( $H_2$ ) em metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). O metano também é produzido por dois mecanismos distintos de acordo com Speece (1996). As bactérias metanogênicas hidrogenotróficas transformam metano a partir do  $CO_2$  e  $H_2$ , sendo que estes organismos se desenvolvem rapidamente em um período de 6 horas. O segundo mecanismo funciona com a ação das bactérias metanogênicas acetotróficas que convertem os acetatos em metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), porém a velocidade de desenvolvimento desse grupo é menor, podendo demorar de dois a três dias, além de ser extremamente sensível à pH inferior a cinco (SALOMON, 2007).

### **e) Resumo do processo de digestão anaeróbia.**

O resumo do processo de conversão bioquímica para a produção de metano ocorre conforme indicado na figura 1, nela são ilustradas as quatro etapas da decomposição da matéria orgânica, a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese assim como a faixa de tempo médio de operação de cada etapa do processo (SILVA,2009 WEN,2010).

Figura 1 – Diagrama do processo de biodigestão anaeróbia para produção de metano



Fonte: Adaptado de Silva (2009) e Wen(2010)

### 2.1.2 Biogás e metano.

O biogás, até o momento da ratificação do Protocolo de Kyoto e da implementação dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, era considerado como um subproduto da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos. Hoje este



cenário mudou e em alguns casos o biogás passou a ser o produto principal ou também um requisito ambiental de uma instalação (SALOMON, 2007).

O biogás é uma mistura de gases, onde o metano e o dióxido de carbono compõem a maioria dessa mistura. Observa-se na tabela 1 a faixa de composição química em forma de porcentagem, que um biogás pode ter (SALOMON, 2007).

**Tabela 1 – Faixas de Composição do Biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos**

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Ácido sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1 - 3

*Fonte: Adaptado de Salomon (2007)*

O poder calorífico é determinado pelo teor de metano contido no gás, que pode variar entre 40% a 75%, dependendo da fonte geradora. Ao realizar a limpeza do biogás é possível obter o biometano, que possui uma faixa de 97% de metano conforme mostrado na tabela 2.

**Tabela 2 – Poder calorífico inferior do biogás e outros gases.**

Gás	PCI (kcal/m <sup>3</sup> )	PCI (kJ/m <sup>3</sup> )
Metano	8.500	35.558
Propano	22.000	92.109
Butano	28.000	117.230
Gás Natural	7.600	31.819
Biogás (64% CH <sub>4</sub> )	5.500	23.027
Biogás (75% CH <sub>4</sub> )	6.375	26.690
Biometano (97% CH <sub>4</sub> )	8.245	34.520

*Fonte: Adaptado de Salomon (2007)*

### 2.1.3 Regimes de temperatura na digestão anaeróbia.

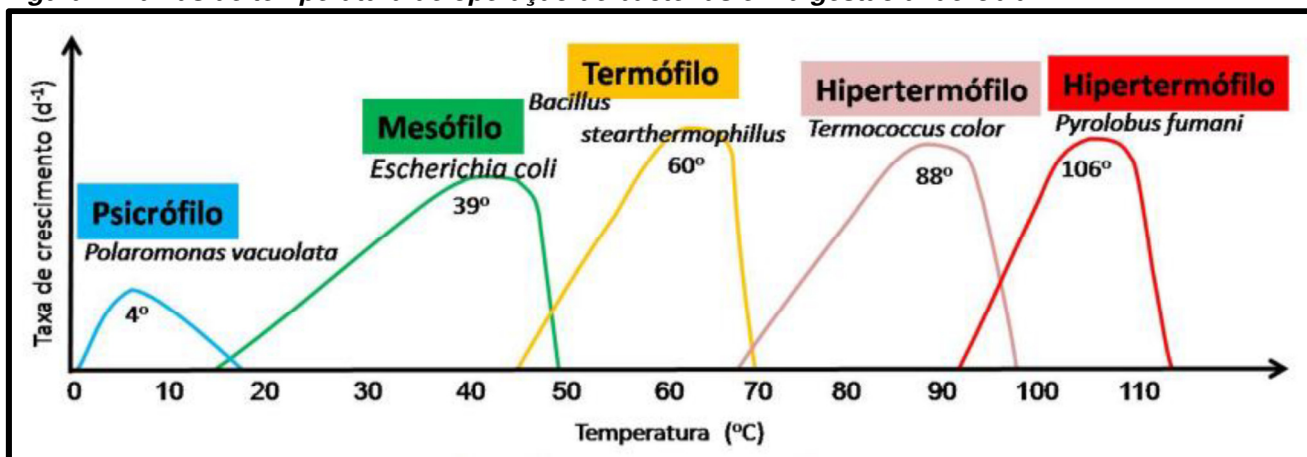
A digestão anaeróbia é um processo que necessita de uma diversidade de microrganismos, sendo que cada grupo de microrganismos possui condições de sobrevivência e proliferação diferenciados, que devem ser considerados para uma boa performance do processo de degradação da matéria orgânica e obtenção do biogás. Para cada microrganismo que participa da digestão anaeróbia existe um regime ótimo de temperatura que resulta em uma taxa máxima de crescimento microbiano (LEITE, 2011).

Os principais regimes de temperatura de bactérias considerados na literatura para digestão anaeróbia são três (SPEECE, 1996):

- Psicrófilo, cuja temperatura varia entre 0°C e 18°C, com a temperatura ótima de taxa de crescimento microbiano de 4°C
- Mesófilo, cuja temperatura varia entre 20°C e 40°C; com a temperatura ótima de taxa de crescimento microbiano de 39°C
- Termófilo, cuja temperatura varia entre 40°C e 70°C; com a temperatura ótima de taxa de crescimento microbiano de 60°C

A figura 2 mostra as variações de temperatura aproximadas e temperaturas ótimas para o crescimento de várias espécies de microrganismos.

Figura 2–Faixas de temperatura de operação de bactérias em digestão anaeróbia



Fonte: SPEECE et al. (1996).

Segundo Gavala et al. (2003) a maioria dos microrganismos opera na faixa mesofílica, devido à proximidade da temperatura do processo com a temperatura ambiente, proporcionando uma maior estabilidade do processo e menor consumo de

energia. Appels et al. (2008) observaram que as metanogênicas acetotróficas são mais sensíveis a variação de temperatura.

A digestão anaeróbia termofílica é mais rápida que a digestão mesofílica, pois as reações bioquímicas aumentam com temperaturas maiores. Este aumento é mais significativo durante as etapas iniciais de hidrólise, melhorando as taxas de quebra das matérias orgânicas complexas, permitindo o tratamento de elevado volume de material orgânico, quando comparada à faixa mesofílica, e reduzindo o tempo de retenção hidráulica (CARRERE et al,2010). A redução do tempo de retenção hidráulica poderá reduzir o tamanho dos reatores anaeróbios, pois quanto mais rápido a digestão da matéria orgânica, menor o tempo necessário dentro do biodigestor(APPELS et al,2008).

Outra vantagem da faixa termofílica é a destruição mais eficiente de organismos patogênicos, produzindo efluentes livres de agentes causadores de doenças, permitindo a posterior utilização desses sem preocupações com a qualidade do efluente. Em faixas mesófilas a destruição destes agentes não é eficiente (SPEECE et al,2002).

Entretanto, microrganismos termofílicos possuem desvantagens, como a maior susceptibilidade às variações de temperatura, o que pode causar instabilidade no desenvolvimento dos microrganismos. Portanto, o processo necessita de um fornecimento maior de energia para manter o sistema na temperatura ideal. Outro ponto negativo é o aumento da produção de ácidos graxos voláteis, que tendem a reduzir o pH durante o processo de digestão, fator que afeta de maneira negativa na estabilidade da metanogênese e que é mais sensível ao pH baixo e variações de temperatura(APPELS,2008).

#### **2.1.4 Influência do potencial hidrogeniônico (pH) na digestão anaeróbia.**

Processos anaeróbios em geral possuem operação otimizada com pH próximo a neutralidade, porém estes podem ser afetados pelo excesso de produção e acúmulo de ácidos ou álcalis, tais como ácidos orgânicos voláteis ou amônia (LEITE,2011).

Chernicharo (1997) relata que a fase metanogênica possui um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, porém aceita-se uma faixa de pH entre 6,0 e 8,0. Valores fora desses parâmetros podem inibir a ação da metanogênese. O autor

ressalta ainda que na acidogênese obtém-se um crescimento ótimo com um pH entre 5,0 e 6,0.

Como já mencionado no item anterior os ácidos graxos voláteis, provenientes da acidogênese tendem a diminuir o pH enquanto a alcalinidade aumenta com a digestão de compostos orgânicos nitrogenados, que produzem amônia e reagem com o CO<sub>2</sub> produzido nas últimas etapas da biodigestão (SPEECE, 1996; SALOMON, 2007).

### 2.1.5 Parâmetros operacionais dos biodigestores

#### a) Carga volumétrica e Vazão diária de lodo bruto ou afluente.

A quantidade de matéria orgânica injetada em um reator anaeróbico é outro parâmetro importante no funcionamento do equipamento. Porém o lodo bruto ou afluente que é injetado em um reator é uma mistura de resíduo orgânico com água, por isso deve-se conhecer e avaliar separadamente as definições de carga orgânica volumétrica (COV) ou organic load rate (OLR) e de vazão diária de lodo (Q)(LEITE,2011).

Define-se carga orgânica volumétrica como a massa de matéria orgânica aplicada diariamente no biodigestor, por unidade de volume do biodigestor (LEITE, 2011).

A equação 1 expressa o cálculo da COV:

$$\text{COV} = \frac{Q \times C_{\text{entrada}}}{V} = \frac{\left[\frac{L}{d}\right] \times \left[\frac{gSV}{L}\right]}{[L]} = \left[\frac{gSV}{L \times d}\right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$$\text{COV} = \text{Carga Orgânica Volumétrica} \left[\frac{kgSV}{m^3 \times d}\right] \text{ ou } \left[\frac{gSV}{L \times d}\right]$$

$$Q = \text{Vazão diária de lodo} \left[\frac{L}{d}\right] \text{ ou } \left[\frac{m^3}{d}\right]$$

$$C_{\text{entrada}} = \text{Concentração da carga orgânica no lodo bruto ou afluente} \left[\frac{kgSV}{m^3}\right] \text{ ou } \left[\frac{gSV}{L}\right]$$

$$V = \text{Volume Útil do reator} [L] \text{ ou } [m^3]$$

**b) Tempo de Retenção Hidráulica.**

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo necessário para que um afluente seja digerido em um reator anaeróbio. O TRH depende principalmente do substrato/efluente inserido e do tipo de reator anaeróbio. O TRH e a capacidade de decomposição dos sólidos voláteis são os parâmetros essenciais para determinar a eficiência de um digestor anaeróbio. (SALOMON,2007). Nges (2008) determinou que um TRH ideal é de no mínimo doze dias sem que a capacidade de tratar o efluente e a obtenção de biogás seja comprometida, tanto para a faixa de temperatura mesofílica quanto para a termofílica. Já Appels (2008) recomenda que este valor não seja menor que dez dias.

Deve-se sempre buscar um menor tempo de retenção para uma maior taxa de decomposição. Calcula-se o tempo de retenção pela relação entre o volume do reator, dado em metros cúbicos, e o volume da carga diária, dado em metro cúbicos (SALOMON, 2007).

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{[L]}{\frac{[L]}{[d]}} = [d] \text{Equação 2}$$

**c) Mistura e agitação na digestão anaeróbia.**

A agitação do efluente tem como finalidade manter a sua temperatura uniforme, distribuir o material a ser decomposto e reduzir a formação de espuma.

A agitação em reatores pode ser realizada por meio da recirculação do biogás ou misturadores mecânicos (CHERNICHARO, 1997; LEITE,2011). Gómez et al. (2009) constatou que a existência de agitação resulta em desempenho superior do processo quando comparado à sistema estático sem agitação, porém a variação da rotação dos misturadores não é uma variável que aumenta a eficiência da digestão.

### **2.1.6 Indicadores de eficiência dos biodigestores**

**a) Remoção de sólidos voláteis**

Segundo Leite (2011) lodos e afluentes gerados em sistemas de digestão anaeróbia são constituídos de água e sólidos totais (ST). A fração orgânica dos ST, que pode ser transformada em biogás é representada pelos sólidos voláteis (SV) ou volatile solids (VS) como é normalmente mencionado na literatura.

Uma forma de medir a eficiência de um digestor é medindo a concentração de sólidos voláteis na entrada e saída do sistema, que pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$E = \frac{C_{entrada} - C_{saída}}{C_{entrada}} \text{ ou } \frac{C_{afluente} - C_{efluente}}{C_{afluente}} \text{ Equação 3}$$

$C_{entrada}$  = Concentração da carga orgânica no lodo bruto ou afluente  $\left[ \frac{\text{kgSV}}{\text{m}^3} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L}} \right]$

$C_{saída}$  = Concentração da carga orgânica no lodo tratado ou efluente  $\left[ \frac{\text{kgSV}}{\text{m}^3} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L}} \right]$

$E$  = Eficiência de tratamento da carga orgânica [%]

## 2.2 Eficiência na produção de metano.

A eficiência de um reator anaeróbio (*Conversão de SV em CH<sub>4</sub>*  $Q_{\text{biogás}}$ ) pode ser obtida pela quantidade de metano produzida diariamente ( $Q_{\text{CH}_4}$ ) dividido pela quantidade de sólidos voláteis removidos ( $COV_{\text{removida}}$ ) dada pelas fórmulas a seguir:

$$COV_e = \frac{Q \times C_{entrada}}{V} = \left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L} \times \text{d}} \right] \text{ Equação 4}$$

$$COV_s = \frac{Q \times C_{saída}}{V} = \left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L} \times \text{d}} \right] \text{ Equação 5}$$

$$COV_e - COV_s = COV_{\text{removida}} = \left[ \frac{\text{gSVrem}}{\text{L} \times \text{d}} \right] \text{ Equação 6}$$

Onde:

$COV_e$  = Carga Orgânica Volumétrica entrada  $\left[ \frac{\text{kgSV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L} \times \text{d}} \right]$

$COV_s$  = Carga Orgânica Volumétrica saída  $\left[ \frac{\text{kgSV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L} \times \text{d}} \right]$

$COV_{\text{removida}}$  = Carga Orgânica Volumétrica removida  $\left[ \frac{\text{kgSV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{gSV}}{\text{L} \times \text{d}} \right]$

$E$ :

$$Q_{\text{biogás}} \times \text{Composição}_{\text{CH}_4} = Q_{\text{CH}_4} \text{ Equação 7}$$

$Q_{\text{biogás}}$  = Produção de Biogás diária =  $\left[ \frac{\text{ml Biogás}}{\text{d}} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{ml Biogás}}{\text{d}} \right]$

$\text{Composição}_{\text{CH}_4}$  = Porcentagem de Metano no biogás [%]

$Q_{\text{CH}_4}$  = Produção de Metanos diária =  $\left[ \frac{\text{ml CH}_4}{\text{d}} \right]$  ou  $\left[ \frac{\text{ml CH}_4}{\text{d}} \right]$

De forma que:

$$\text{Convers\~ao de SV em CH}_4\text{Q}_{\text{biog\~as}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{\text{COV}_{\text{removida}}} = \frac{Q_{\text{biog\~as}} \times \text{Composi\~ao}_{\text{CH}_4}}{\text{COV}_e - \text{COV}_s} \text{Equa\~ao 8}$$

$$\text{Convers\~ao de SV em CH}_4\text{Q}_{\text{biog\~as}} = \left[ \frac{\text{ml CH}_4}{\text{gSVrem}} \right]$$

A equa\~ao 8 que resume a convers\~ao de s\~olidos vol\~ateis, contempla fatores como a composi\~ao de metano no biog\~as e a efici\~encia de remo\~ao de s\~olidos vol\~ateis em uma \~unica equa\~ao.

### **3 RESULTADOS**

#### **3.1 Classificação dos digestores anaeróbios**

*Os digestores anaeróbios podem ser classificados como contínuos ou de batelada, sendo que neste estudo serão escritos apenas os primeiros.*

*Os digestores anaeróbios contínuos podem ser classificados nos seguintes tipos: sistemas de um estágio, dois estágios e batelada (VANDEVIVERE et al. 2002). Além dos tipos acima citados, Carrere (2010) acrescenta o pré-tratamento, precedendo os dois estágios. O tratamento do efluente serve para melhorar a performance nas etapas subsequentes.*

##### **3.1.1 Sistemas de um estágio**

*Processos de estágio único utilizam somente um reator para todas as fases da digestão anaeróbia. Eles podem ser de baixa carga de sólidos ou alta carga de sólidos, dependendo do teor de sólidos no interior do digestor (REICHERT, 2005; LEITE, 2011).*

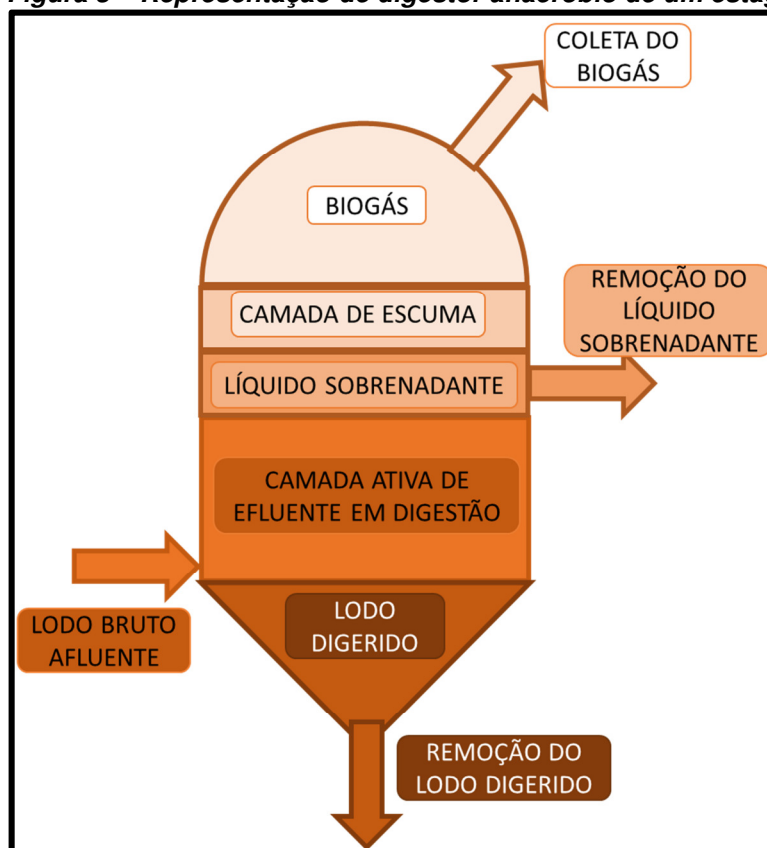
##### **a) Digestor anaeróbio de baixa carga**

*Nos sistemas convencionais de digestão do afluente, a biodigestão ocorre em único estágio no mesmo reator, onde o volume de sólidos suspensos voláteis deve ser inferior ou igual a  $1,2 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , com tempos de retenção entre 30 e 45 dias. Na unidade há formação das seguintes zonas: zona de lodo digerido, zona principal de lodo em digestão, zona de sobrenadante e zona superior de acumulação de gás. (LEITE, 2011).*

*Esta divisão em zonas pode ser observada na figura 3 que mostra um esquema básico de um reator anaeróbio de um estágio de baixa carga.*



**Figura 3 – Representação de digestor anaeróbio de um estágio e baixa carga**



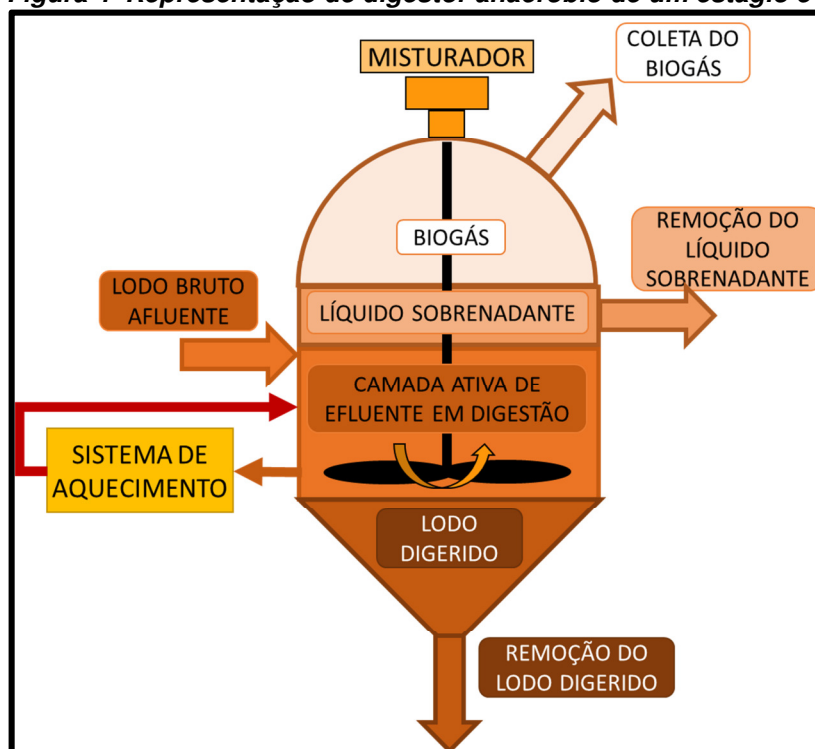
Fonte: Adaptado de Leite (2011)

### **b) Digestor anaeróbio de alta carga**

Os digestores anaeróbios de alta carga de sólidos também executam todas as etapas de digestão em único estágio, porém estes possuem características adicionais como a taxa de volume de sólidos suspensos voláteis superiores a  $1,2 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , a existência de um misturador eficiente e principalmente o aquecimento com controle de temperatura do efluente, com a finalidade de se obter o máximo rendimento na digestão e reduzir os tempos de retenção hidráulica (Metcalf et al., 2003; Leite, 2011).

Estes elementos que diferenciam um sistema de alta carga em relação ao de baixa carga, como o sistema de aquecimento e o misturador com recirculação do efluente podem ser observados na figura 4.

**Figura 4—Representação de digestor anaeróbico de um estágio e altacarga.**



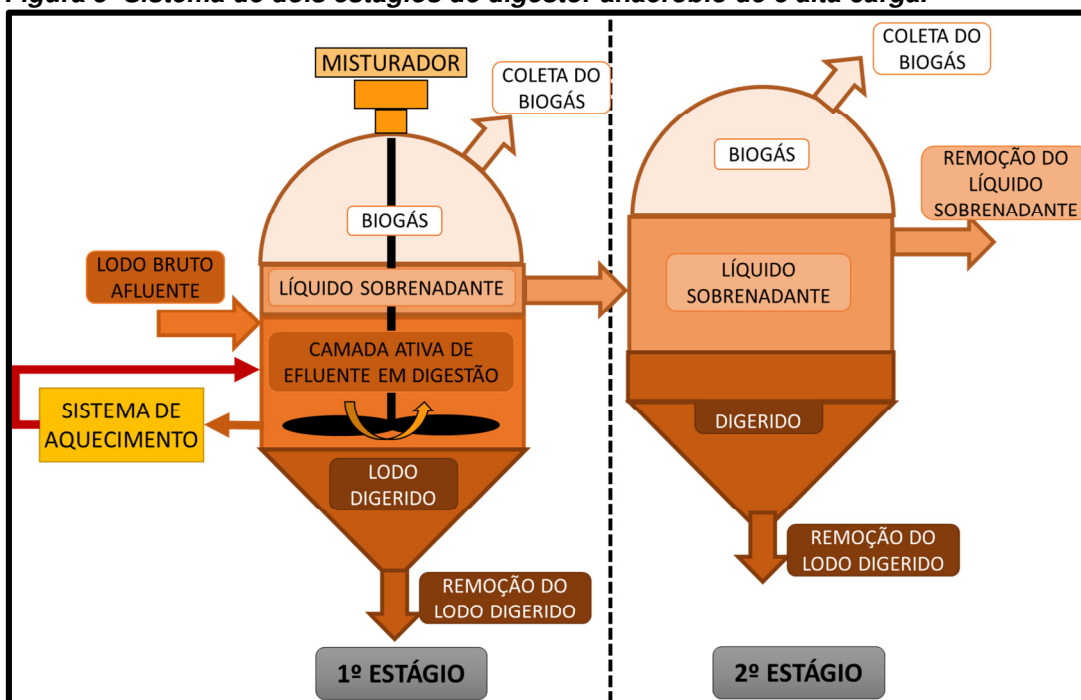
Fonte: Adaptado de Leite (2011)

### 3.1.2 Sistemas de dois estágios e alta carga

Os digestores anaeróbios de dois estágios possuem os mesmos elementos de agitação, aquecimento e controle de temperatura dos sistemas de um estágio. Porém o processo de digestão ocorre em dois estágios realizados por dois reatores distintos, dessa forma é possível criar uma condição ideal para cada um dos reatores, podendo trabalhar com configurações em regime mesófilo e termófilas para ambos estágios ou utilizando a combinação dos dois sistemas (Leite, 2011).

A figura 5 mostra o funcionamento de um digestor com dois estágios, conhecido também com *Two Phased Anaerobic Digester (TPAD)*. O afluente entra no primeiro estágio onde é parcialmente digerido, e parte de seu efluente que não foi tratado segue para o segundo estágio onde ocorre o restante da digestão do efluente. O aquecimento do afluente, pode ser realizado em ambos estágios assim como o uso de misturadores. Há casos onde o efluente é injetado novamente no digestor e este também pode ser aquecido para manter a temperatura interna do processo. Em ambas as fases ocorre a coleta do gás, porém esta irá variar de acordo com o dimensionamento dos reatores e com os seus parâmetros de controle.

**Figura 5—Sistema de dois estágios de digestor anaeróbico de e alta carga.**



Fonte: Adaptado de Leite (2011)

### 3.1.3 Sistemas de dois estágios e alta carga com pré-tratamento

O pré-tratamento tem como objetivo preparar o afluente e aumentar a performance dos equipamentos que recebem este material tratado. Um pré-tratamento pode ser de origem biológica, térmica, mecânica ou química (CARRERE, 2010).

O pré-tratamento biológico, segundo Carrere (2010), é idêntico ao primeiro estágio dos digestores dois estágios já descritos neste documento, que utilizam do aquecimento do afluente em faixas termofílicas ou hiper termofílicas por um período de retenção entre um a sete dias, acelerando a hidrólise, aumentando a taxa de redução de matéria orgânica, elevando a produção de metano e destruindo organismos com potencial patogênico.

O pré-tratamento térmico, conhecido na literatura como hidrólise térmica (*thermal hydrolysis*), é similar ao tratamento biológico e consiste em aquecer o afluente utilizando temperaturas entre 90 °C a 175 °C em período de tempo relativamente curto entre 30 e 60 minutos. O aquecimento pode ser feito usando trocador de calor, utilizando vapor de água como fonte de calor, ou utilizando um equipamento de micro-ondas (COELHO, 2010; CARRERE, 2010).

O pré-tratamento mecânico, pode ser dividido em quatro categorias: ultrassom, centrífugo (*Lysis-centrifuge*), trituradores/moedores (*Grinding*) e sistemas

de alta pressão (*high pressure*). Estes tratamentos usam energia mecânica para romper (*lyse*) os compostos orgânicos complexos, atuando de forma similar à hidrólise térmica, e por sua vez aumentando a performance da produção de metano e a aumentado a destruição de sólidos voláteis, sem alterar o regime de temperatura dos microrganismos (CARRERE,2010).

O pré-tratamento químico, pode ser dividido em duas categorias: a ozonização e o tratamento alcalino. A ozonização atua como pré-tratamento ou na recirculação do efluente da digestão anaeróbia. O tratamento alcalino por sua vez usa soluções básicas junto com tratamentos térmicos a temperaturas de 120 a 130 °C por um período de 5 até 240 minutos. O objetivo desses tratamentos é a redução na demanda química (DQO) final, que consiste na quantidade total de oxigênio necessária para tratar o afluente, e também o aumento da produção de metano (CARRERE,2010).

Como o enfoque dos tratamentos foram principalmente na remoção de sólidos voláteis e aumento na produção de biogás/metano, Carrere (2010) realizou um comparativo de qual método é mais eficiente nestes itens por meio da tabela 3. Observa-se que sistema por ultrassom possui o melhor desempenho energético e o sistema térmico possui a maior remoção de sólidos voláteis.

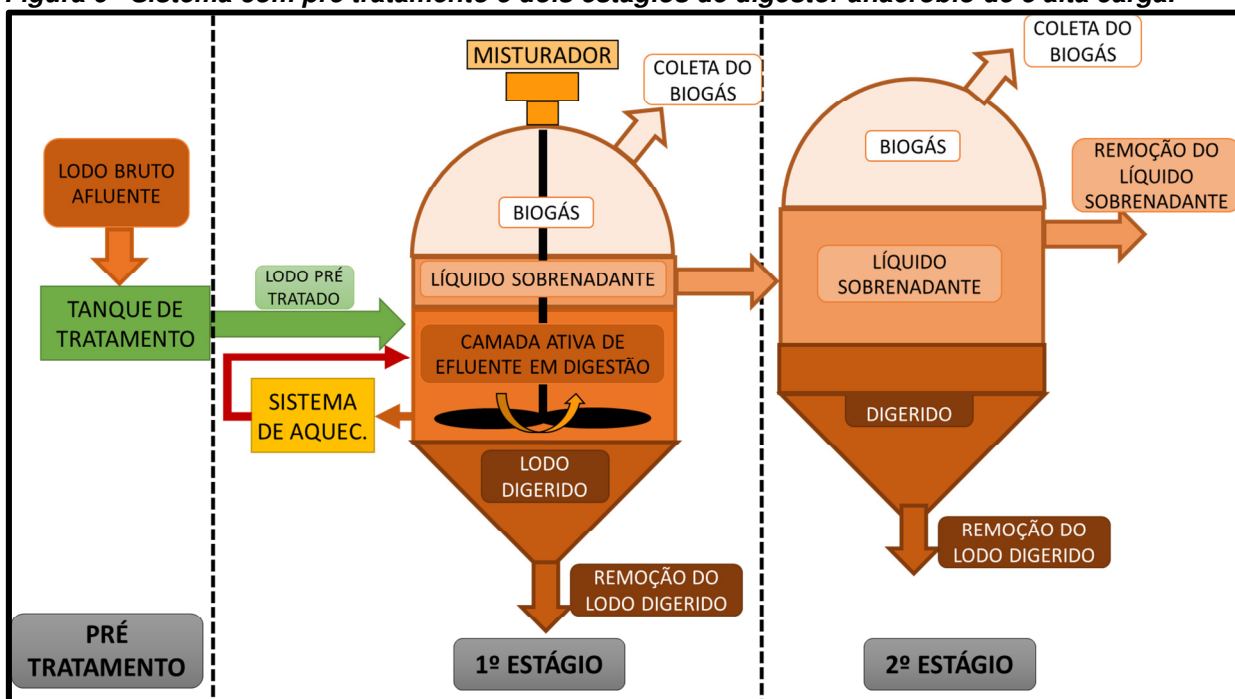
**Tabela 3 – Dados de performance de diferentes tipos de pré-tratamentos.**

PROCESSO	CONDIÇÕES DO TRATAMENTO	REMOÇÃO DE SV	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA (kWh/kg SV)	ENERGIA TÉRMICA CONSUMIDA (kWh/kg SV)	TOTAL DE ENERGIA CONSUMIDA (kWh/kg SV)	ENERGIA DO BIOGÁS MÁXIMA (kWh/kg sólidos totais ST)
Sistema Mesófilo	Sem tratamento	40,0%	0,04	0,5	0,54	1,9
Sistema Termófilo	Sem tratamento	50,0%	0,03	1	1,03	2,4
Biológico (Térmico)	70 oC 9 -48h	50,0%	0,03	1	1,03	2,4
Térmico (Thermal Hydrolysis)	170 oC 15-30 min	60,0%	0,04	2	2,04	2,9
Ultrassom (Sonication)	100W, 16s 30kW/m <sup>3</sup>	50,0%	0,37	0,5	0,87	2,4
Triturador (Ball milling)	-	50,0%	1,04	0,5	1,54	2,4
Alta pressão	200 bar	50,0%	0,33	1	1,33	2,6

Fonte: Adaptado de Carrere (2010)

A figura 6 mostra uma configuração que envolve um pré-tratamento, combinando com um sistema de dois estágios de alta carga. A configuração do arranjo dos equipamentos poderá variar de acordo com o enfoque dos produtos finais da digestão anaeróbia, seja o objetivo final o tratamento do afluente ou a obtenção de biogás.

**Figura 6 – Sistema com pré tratamento e dois estágios de digestor anaeróbio de e alta carga.**



Fonte: Adaptado de Leite (2011)

### 3.2 Modelos de biodigestores e controle de temperatura

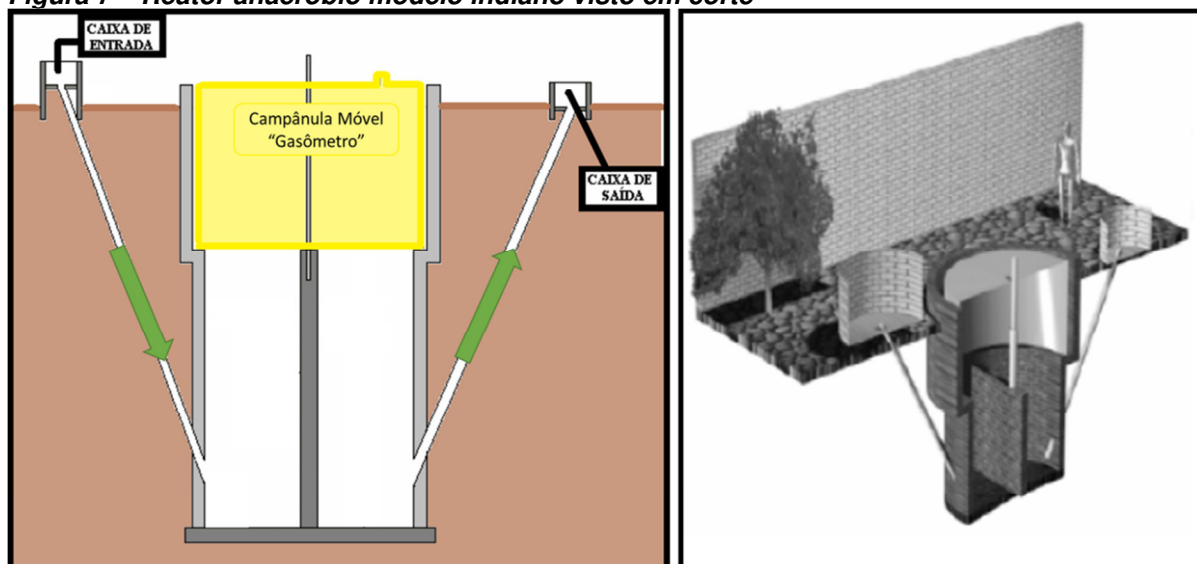
O tipo de reator utilizado é outra variável nos sistemas de digestão anaeróbia, que influencia em como o equipamento é projetado, nos mecanismos de funcionamento, nos custos de aquisição, nos custos de instalação e nos parâmetros de performance do sistema. O fator mais importante que é considerado neste estudo é a existência de mecanismos para controle de temperatura, pois é um fator recente considerado na concepção dos projetos de reatores e alguns modelos antigos não consideravam esta opção, ou possuem um aspecto construtivo que desfavorece o controle da temperatura.

Os modelos de biodigestores considerados são os modelos chinês, indiano, modelo da marinha brasileira e o UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) pois são os mais difundidos no mercado do brasileiro (SAKUMA 2013).

O modelo de reator indiano e o modelo chinês, possuem as ficam normalmente abaixo da superfície do solo, sendo necessário escavar um buraco para a instalação do reator. Por estar enterrado o contato externo do reator com o ar é menor, permitindo assim uma maior estabilidade da temperatura. Ambos reatores ficam na vertical e a diferença entre o funcionamento deles é a parte do reator na qual o gás produzido é acumulado.

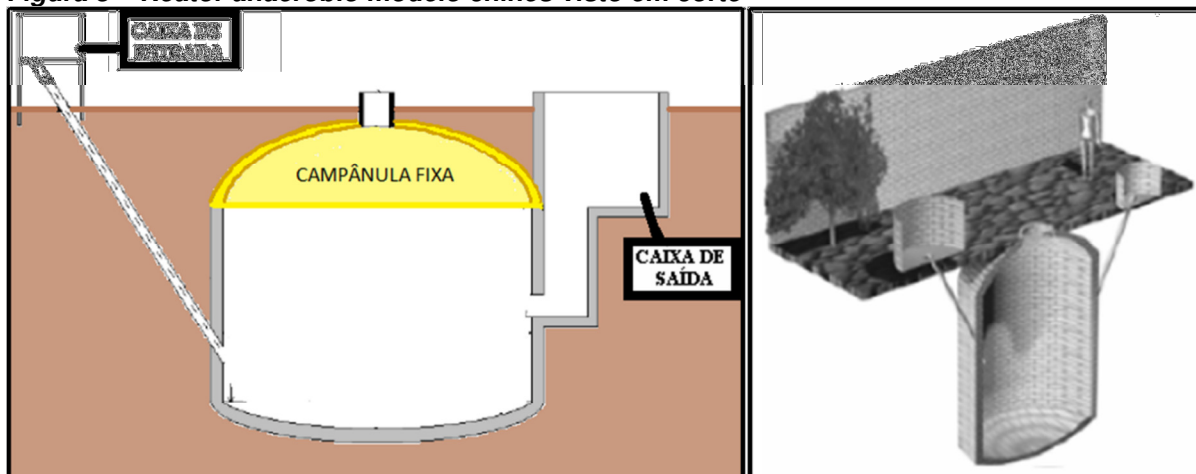
O modelo indiano possui a parte superior do reator móvel, permitindo que a pressão do gás permaneça constante conforme exibido na figura 7. O modelo chinês possui a parte superior fixa conforme exibido na figura 8. Os projetos conceituais destes modelos, não consideravam mecanismos para controle de temperatura, mas é possível realizar uma adaptação nesse sentido.

**Figura 7 – Reator anaeróbio modelo indiano visto em corte**



Fonte: Adaptado de Sakuma (2013)

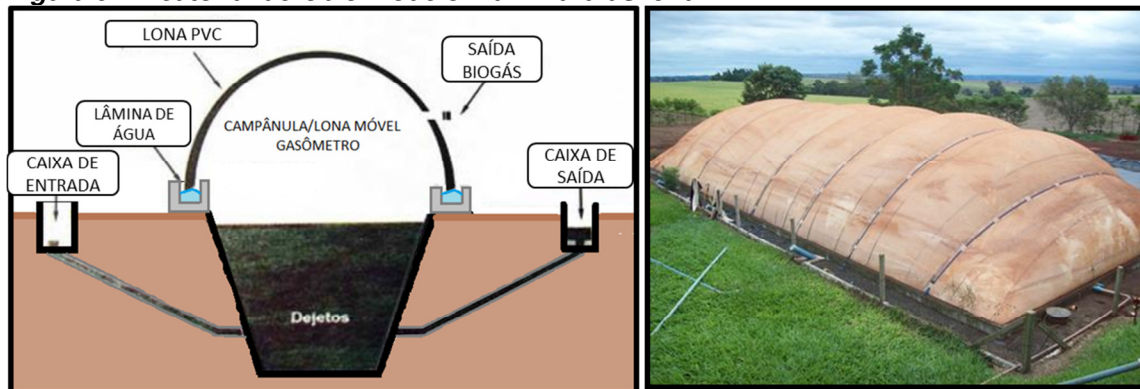
**Figura 8 – Reator anaeróbio modelo chinês visto em corte**



**Fonte: Adaptado de Sakuma (2013)**

O modelo da marinha brasileira é um dos reatores mais difundidos no Brasil, por ser constituído de materiais de baixo custo, usando lona de PVC impermeável e alvenaria conforme mostra a figura 9. Sua facilidade para construção e instalação mais simples do que os modelos indianos e chinês facilitaram a difusão deste modelo no Brasil.

**Figura 9 – Reator anaeróbio modelo marinha brasileira.**



**Fonte: Adaptado de Sakuma (2013)**

Este modelo de reator possui sua maior dimensão na horizontal, e possui uma profundidade menor quando comparado aos modelos indiano ou chinês com a mesma capacidade de tratamento e sua lona fica exposta à temperatura ambiente e rajadas de vento na superfície. Para compensar a profundidade reduzida o digestor da marinha possui uma largura e comprimento maiores. Em contrapartida estes precisam de uma área maior. Como a lona fica exposta à temperatura ambiente e o reator possui uma grande área de contato, estes digestores perdem calor em climas

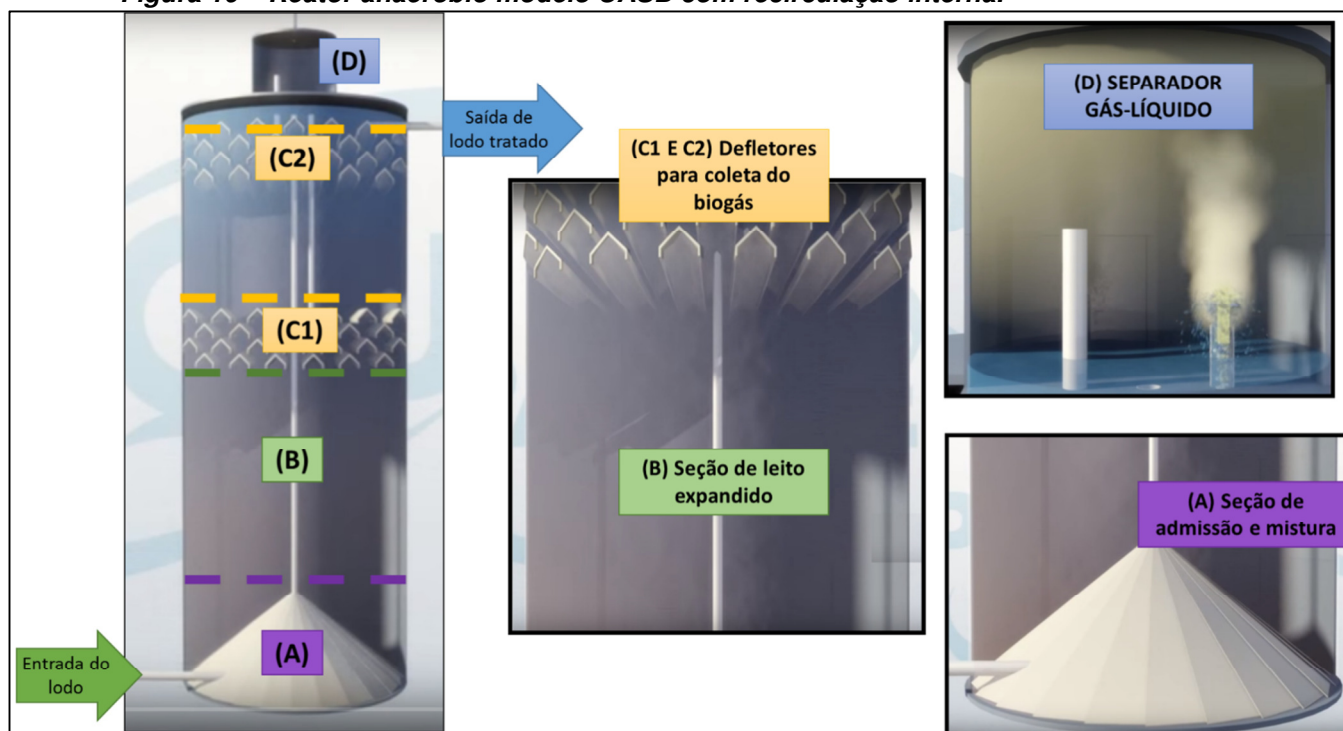


frios ou climas que possuem variações de temperaturas bruscas, fazendo com que as bactérias operem a temperaturas abaixo da temperatura ótima de 35°C.

Os reatores UASB, também conhecido por DAFA (Digestores anaeróbios de fluxo ascendente) ou RAFA (Reatores anaeróbios de fluxo ascendente) constituem cerca de 75% dos sistemas de tratamento anaeróbico no mundo, utilizados principalmente no tratamento de esgoto, de acordo com Sanz et al. (2005).

A figura 10 mostra um modelo mais moderno de um reator UASB, denominado BIOPAQ®IC produzido pela francesa PAQUES®. Na região "A" ocorre a entrada do afluente, que aproveita a vazão do material injetado e joga em defletores em forma de pá, que auxiliam a mistura e distribuição da matéria orgânica. Na região "B" ocorre a maior parte da decomposição e as fases da digestão ficam separadas devido à diferença de densidades entre os produtos de cada fase da decomposição, pois a medida que a matéria orgânica é decomposta, sua densidade diminui. Na região "C1" e "C2" ocorre a coleta do biogás, que é enviado para a região "D" junto com o dejetos parcialmente ou totalmente tratados. Na região "D" o gás é separado e a parte líquida é enviada novamente para a região "A", maximizando o processo de remoção da matéria orgânica.

**Figura 10 – Reator anaeróbico modelo UASB com recirculação interna.**



Fonte: Adaptado de Paques (2016)



Estes modelos normalmente não consideram o aquecimento inicial do afluente nem a manutenção da temperatura interna, porém o aspecto construtivo destes permite a aplicação de trocadores de calor na entrada do afluente e a manutenção da temperatura pode ser feita utilizando as mesmas técnicas de isolamento térmico usados nas indústrias, como por exemplo, manta de lã de vidro e cimento refratário.

### 3.3 Desempenho de sistemas de digestores anaeróbios

#### 3.3.1 Sistemas de um estágio sem controle de temperatura

Sakuma (2013) utilizou um reator anaeróbio sem mecanismo de pré-tratamento do efluente, sem controle de temperatura e com um tempo de retenção hidráulica de dois dias. A tabela 4 mostra os dados obtidos no experimento, como a massa de biogás, vazão do afluente, que corresponde a alimentação do reator, as concentrações de sólidos voláteis na entrada e na saída, porcentagem de metano no biogás, entre outros. Com isso foi calculada a produção de metano em relação aos sólidos voláteis adicionados no sistema ( $86 \text{ mL.gSVe}^{-1}$ ) e também em relação aos sólidos voláteis removidos no sistema ( $271 \text{ mL.gSVrem}^{-1}$ ).

**Tabela 4 – Produção de metano para um sistema sem controle de temperatura**

%CH4	massa específica biogás	massa de biogás por dia	volume de biogás por dia	volume de CH4 por dia	Vazão de Afluente por dia	Concentração de SV de entrada	Concentração de SV de saída	Remoção de Sólidos Voláteis	COVe	Produção CH4 por Sólidos Voláteis	Produção CH4 por Sólidos Voláteis
%	$\frac{g_{biogás}}{mL_{biogás}}$	$\frac{g_{biogás}}{dia}$	$\frac{mL_{biogás}}{dia}$	$\frac{mL_{CH4}}{dia}$	$\frac{L_{afluente}}{dia}$	$\frac{g_{Sve}}{L_{afluente}}$	$\frac{g_{SVs}}{L_{afluente}}$	%	$\frac{g_{Sve}}{dia}$	$\frac{mL_{CH4}}{g_{Sve}}$	$\frac{mL_{CH4}}{g_{SVrem}}$
66	0,00114	103	90.406	59.668	100	6,9	4,7	31,9%	690,0	86	271

Fonte: Adaptado de Sakuma (2013)

A tabela 5 analisa dois experimentos, um sem controle de temperatura, realizado por Sakuma (2013), e outro com o primeiro estágio de um sistema TPAD com diferentes temperaturas, realizado por Ge (2011), ambos com mesmo TRH de dois dias. Na última coluna da tabela foi comparada a produção de metano em relação à quantidade de sólidos voláteis adicionados ao sistema dividido pela a produção de metano obtido no experimento realizado por Sakuma ( $86 \text{ mL.gSVe}^{-1}$ ). Observa-se uma produção de 116% a 197% de gás superior ao sistema sem controle de temperatura, onde é obtido mais metano por grama de sólido volátil

adicionado. Para a temperatura de controle de 35°C, houveram alguns resultados nos experimentos realizados por Ge (2011) cuja produção de metano foi menor que os valores obtidos por Sakuma (2013).

**Tabela 5 – Comparativo em relação a reatores de dois dias de TRH**

<b>Estágios Analisado</b>	<b>Produção de metano Ge (2011)</b>	<b><math>\left(\frac{mL}{g\ SVe}\right)</math> (Ge – 2011)</b>
<b>(2 dias de Tempo de Retenção Hidráulica)</b>	<b><math>\left(\frac{mL}{g\ SVe}\right)</math></b>	<b><math>\frac{\left(\frac{mL}{g\ SVe}\right) (Ge - 2011)}{\left(\frac{mL}{g\ SVe}\right) (SAKUMA - 2013)}</math></b>
Primeiro Estágio Termo (50 °C)	100	116%
Primeiro Estágio Termo (60 °C)	160	185%
Primeiro Estágio Termo (65 °C)	150	173%
Primeiro Estágio Termo (70 °C)	170	197%
Primeiro Estágio Meso mín (35 °C)	70	81%
Primeiro Estágio Meso máx (35 °C)	110	127%

*Fonte: Adaptado de Sakuma (2013) e Ge (2011)*

### **3.3.2 Sistemas de um estágio e alta carga**

Hajji (2006) realizou experimentos em um digestor de alta carga de um estágio e faixa de temperatura mesófila, utilizando lixo municipal como dejetos, tempo de retenção de 21 dias e variando a temperatura em 35 °C, 37 °C e 40 °C. Foi observado que a produção diária de biogás foi de 50% maior a 37 °C e de até 100% maior a 40 °C, quando comparado a produção a 35 °C.

Chae et al (2006) avaliou a performance de reatores operando em diferentes temperaturas dentro da faixa mesofílica, variando também o volume de carga alimentada no reator. Observa-se, na tabela 6, que maiores temperaturas proporcionam uma maior produção de gás e o aumento da carga orgânica volumétrica, representada pela alimentação do sistema, influencia na produção de gás, sendo esta afetada negativamente com cargas superiores a 10% do volume do reator. Os valores ótimos da produção de gás foram obtidos na configuração do sistema para uma temperatura de 35°C e 5% de carga de alimentação e são relativamente próximos aos obtidos por Speece (2002).

**Tabela 6 – Dados de performance de um digestor alta carga com diferentes temperaturas.**

Temp (°C)	Alimentação do Sistema	Produção de Metano (CH <sub>4</sub> ) Média ( $\frac{mlCH_4}{gSV}$ )
25	5% do vol.	317
	10% do vol.	352
	20% do vol.	312
	40% do vol.	122
30	5% do vol.	397
	10% do vol.	388
	20% do vol.	383
	40% do vol.	170
35	<b>5% do vol.</b>	<b>437</b>
	10% do vol.	421
	20% do vol.	319
	40% do vol.	228

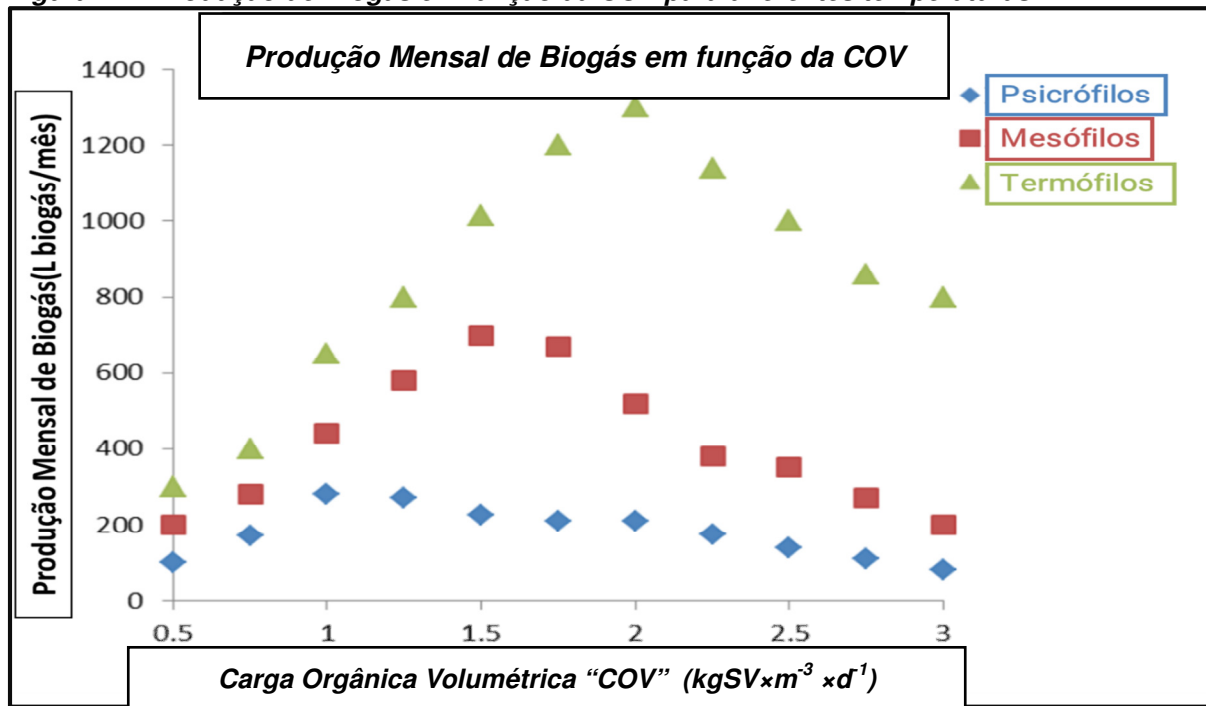
Fonte: Adaptado de Chae (2006)

Vikrant (2014) analisou a influência das faixas de operação dos microrganismos e do pH em reatores em relação à taxa de alimentação dos reatores, utilizando dejetos bovinos como matéria orgânica para digestão. Verifica-se na figura 11, a variação da produção de biogás em relação à faixa de operação dos microrganismos do reator e também em relação à carga orgânica volumétrica do reator.

Como a produção do biogás foi uma média mensal e o tempo de retenção hidráulica não foi indicado no estudo, não foi possível observar os efeitos negativos gerados pela faixa de temperatura termófila no longo prazo, que tende a acelerar a hidrólise, produzindo mais ácidos, baixando o pH do sistema e inibindo a

metanogênese. Por isso, no estudo em questão a performance do sistema termófilo foi muito superior ao regime mesófilo.

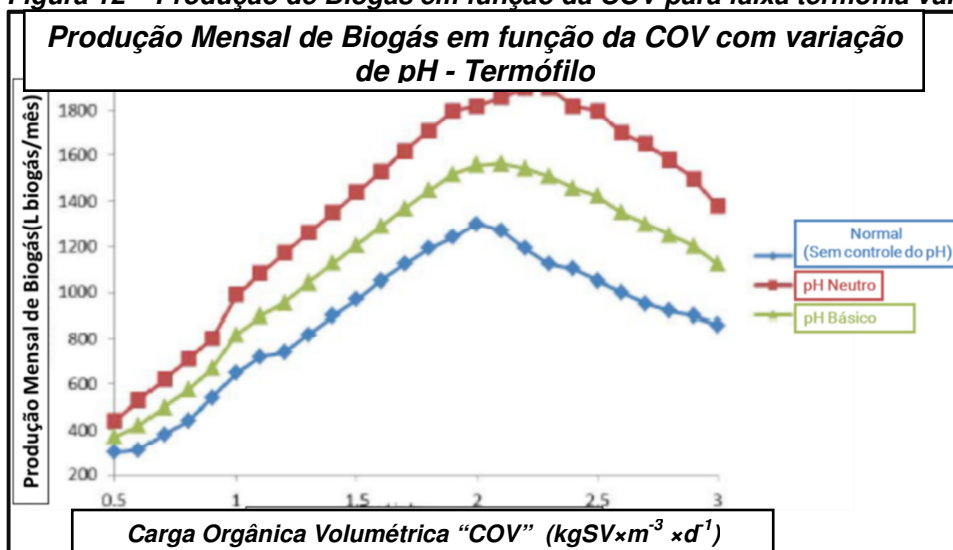
Figura 11 – Produção de Biogás em função da COV para diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado de Vikrant (2014)

A figura 12 mostra a variação da produção de biogás em relação à variação do pH do sistema termófilo e à taxa de alimentação do reator, indicando que um pH neutro possui um efeito positivo na produção do biogás. Outro fator que pode ser observado na figura 11 e 12 é a influência da carga orgânica volumétrica, que possui uma taxa ótima de alimentação entre 1,5 a 2 kgSV × m<sup>-3</sup> × d<sup>-1</sup>. Para valores acima ou abaixo dessa faixa o desempenho na produção de biogás é reduzido.

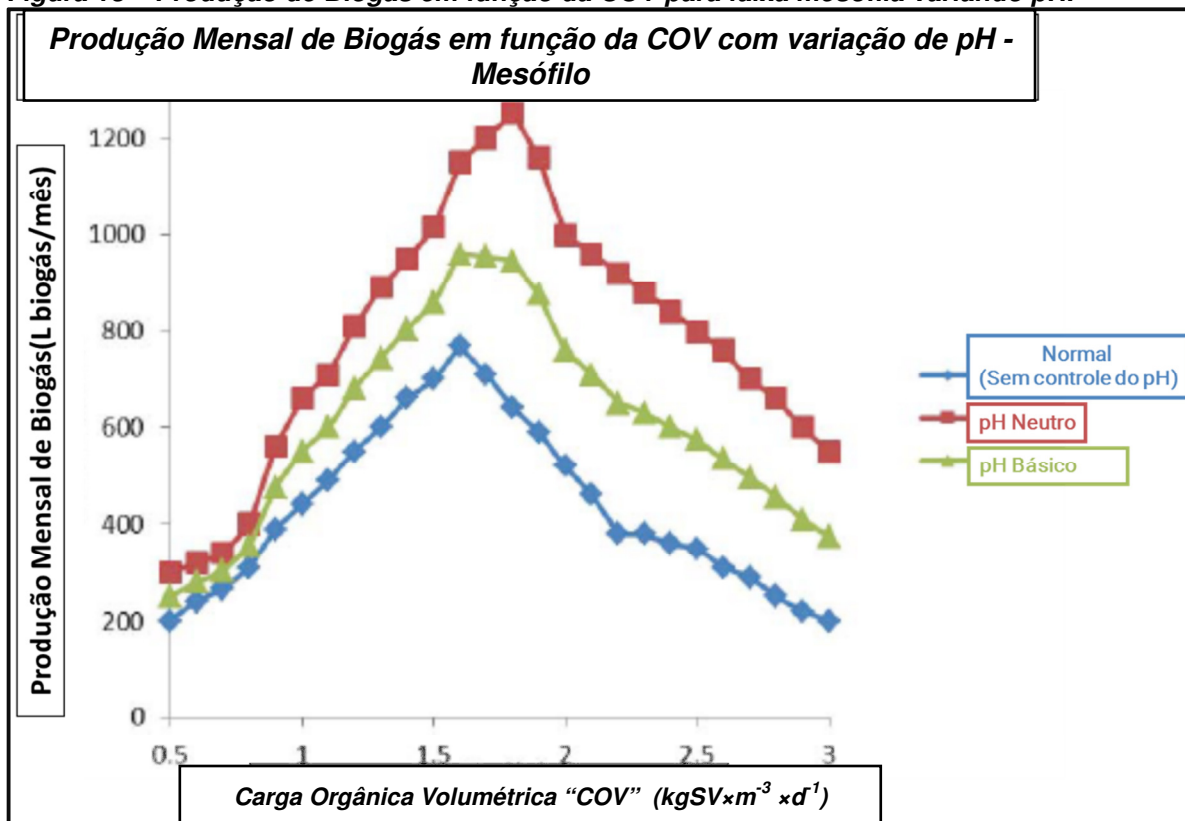
Figura 12 – Produção de Biogás em função da COV para faixa termófila variando pH.



Fonte: Adaptado de Vikrant (2014)

A figura 13 mostra a variação da produção de biogás em relação ao pH do sistema mesófilo e taxa de alimentação do reator, reforçando a influência positiva do pH neutro na produção do biogás.

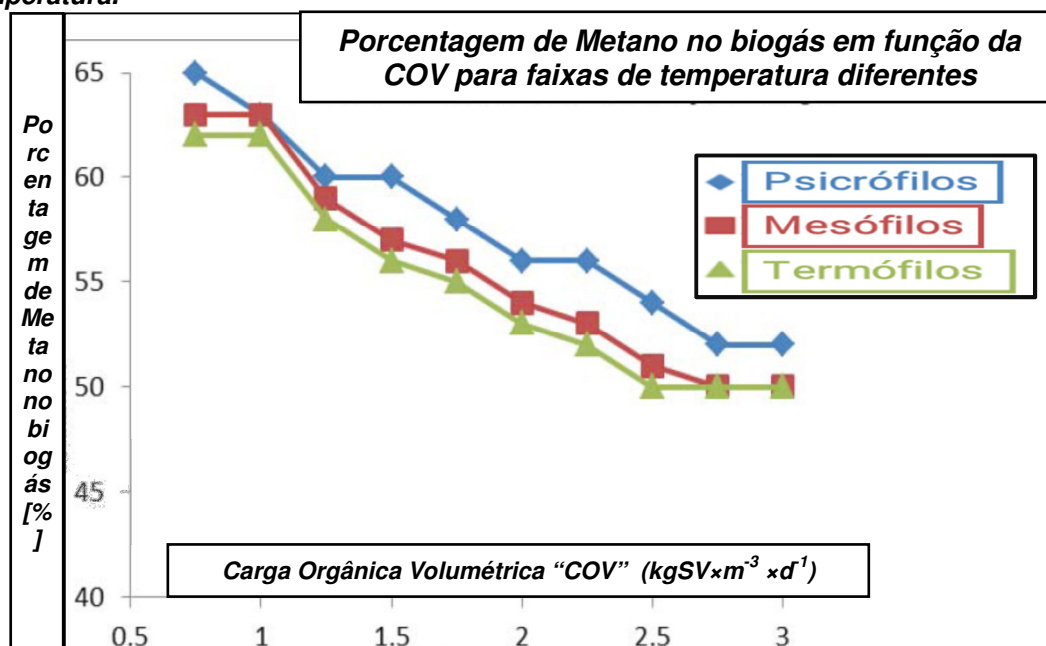
Figura 13 – Produção de Biogás em função da COV para faixa mesófila variando pH.



Fonte: Adaptado de Vikrant (2014)

A figura 14 mostra a variação do metano presente no biogás em relação à carga orgânica volumétrica, mostrando que o aumento da COV faz com que a presença do metano seja reduzida e com isso o poder calorífico do biogás seja reduzido. Por isso deve-se buscar uma COV de  $1,5 \text{ kgSV} \times \text{m}^{-3} \times \text{d}^{-1}$  de forma a maximizar a produção de biogás sem perder o teor de metano do gás produzido, não comprometendo o poder calorífico do gás.

**Figura 14 – Fração de Metano no Biogás em função da COV para diferentes faixas de temperatura.**



Fonte: Adaptado de Vikrant (2014)

### 3.3.3 Sistemas de dois estágios e alta carga

Speece (2002), já havia utilizando o sistema em dois estágios mesofílicos e dois estágios termofílicos porém devido à falta de estudos e parâmetros de processo ainda incertos, não obteve resultados de performance diferenciais comparados a sistemas de um estágio.

Han et al. (1996) testaram o efeito do tempo de retenção hidráulica em sistemas de duplo estágio, comparando com sistemas convencionais de simples estágio mesofílico e foi verificado que o tempo de retenção ótimo foi entre 11 a 17 dias, obtendo até o dobro da remoção de sólidos voláteis quando comparados ao sistema de um estágio.

Ge et al. (2010) compararam a eficiência de um sistema de reatores duplo estágio com as duas fases operando no regime mesofílico com temperatura de  $35^\circ\text{C}$ , com outro sistema operando a fase inicial em um regime termofílico, com

temperaturas de 50 °C e tempo de retenção de dois dias e a segunda fase em regime mesofílico com temperatura de 35 °C e tempo de retenção entre treze a catorze dias. Constatou-se que o sistema termo-meso foi mais eficiente do que o sistema meso-meso, apresentando uma produção de metano 25% superior, assim como um aumento de 20% na remoção de sólidos voláteis (SV). Este desempenho pode ser atribuído a uma velocidade de hidrólise três vezes maior.

Riau et al. (2009) compararam a eficiência de sistemas duplo estágio, considerando a variação nos tempos de retenção, conforme pode ser observado na tabela 7. Em relação ao sistema de mesofílico de simples estágio, os sistemas de dois estágios tipo TPAD produz até 47% a mais de metano.

**Tabela 7 – Produção de metano de um digestor TPAD com diferentes TRH e faixas de temperatura.**

<b>Sistema</b>	<b>Produção de Metano (CH<sub>4</sub>) Estágio Termo (mL/g SVrem)</b>	<b>Produção de Metano (CH<sub>4</sub>) Estágio Meso (mL/g SVrem)</b>	<b>Produção de Metano (CH<sub>4</sub>) Diária do Sistema TPAD (mL/g SVrem)</b>	<b>Comparação em Relação ao sistema Mesofílico Simples Estágio</b>
Mesofílico Simples Estágio	-	420	420	-
TPAD 15 dias Termo/15 dias Meso	350	220	570	35,7%
TPAD 5 dias Termo/15 dias Meso	340	180	520	23,8%
TPAD 3 dias Termo/15 dias Meso	140	480	620	47,6%
TPAD 3 dias Termo/12 dias Meso	100	460	560	33,3%

**Fonte: Adaptado de Riau (2009)**

Dugba e Zhang (1999) e posteriormente Wen (2010) avaliaram a influência do tempo de retenção hidráulica e a proporção do reator da primeira etapa em relação ao da segunda etapa na produção de metano. Observa-se na tabela 8 que a conversão dos sólidos voláteis em metano foi em média de 458 mL CH<sub>4</sub> x gSV<sup>-1</sup>. Não houve variação significativa do tempo de retenção hidráulica nem do volume dos reatores, com isso pode-se concluir que, com pelo menos três dias de retenção, é possível obter resultados aceitáveis de produção de metano e que a variação no volume para o cenário exposto pelos autores não influenciou na produção do metano.

**Tabela 8 – Dados de diferentes sistemas TPAD variando TRH e COV**

DADOS DOS SISTEMAS			SISTEMA COM 3 DIAS DE RETENÇÃO HIDRÁULICA NA FASE INICIAL				SISTEMA COM 6 DIAS DE RETENÇÃO HIDRÁULICA NA FASE INICIAL			
SISTEMA	TAMANHO DO REATOR FASE1/FASE2 (L)	COV (gSV/L/dia)	% de SV removido	SVremovido (g SV/L/dia)	Produção de (CH <sub>4</sub> ) (L CH <sub>4</sub> /L/dia)	Produção de (CH <sub>4</sub> ) (mL/g SV)	% SV removido	VS removido (g SV/L/dia)	Produção de CH <sub>4</sub> (L CH <sub>4</sub> /L/dia)	Produção de CH <sub>4</sub> (mL/g SV)
TPAD I MESO-MESO	3/12	2	29,3%	0,586	0,27	460,75	29,1%	0,582	0,27	463,92
		3	34,8%	1,044	0,48	459,77	30,9%	0,927	0,43	463,86
		4	30,2%	1,208	0,56	463,58	26,1%	1,044	0,48	459,77
		6	19,5%	1,17	0,54	461,54	-	-	-	-
		8	21,1%	1,688	0,78	462,09	-	-	-	-
TPAD II	3/12	2	43,9%	0,878	0,41	466,97	37,1%	0,742	0,34	458,22
		3	43,8%	1,314	0,61	464,23	41,7%	1,251	0,58	463,63
		4	44,1%	1,764	0,82	464,85	38,9%	1,556	0,72	462,72
		6	21,7%	1,302	0,61	468,51	-	-	-	-
		8	29,3%	2,344	0,81	345,56	-	-	-	-
TPAD III	5/10	2	29,3%	0,586	0,27	460,75	32,9%	0,658	0,31	471,12
		3	39,8%	1,194	0,55	460,64	34,6%	1,038	0,48	462,43
		4	37,3%	1,492	0,69	462,47	30,9%	1,236	0,57	461,17
		6	22,1%	1,326	0,62	467,57	-	-	-	-
		8	23,0%	1,84	0,86	467,39	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Dugba e Zhang (1999)apud Wen (2010)

Observa-se também que os experimentos realizados por Dugba e Zhang (1999) apud Wen (2010) tem a redução de SV prejudicada com o aumento da COV acima de  $4\text{g SV} \times \text{L}^{-1} \times \text{d}^{-1}$ .



## 4 CONCLUSÃO

*O controle de temperatura mostrou-se na maioria dos casos avaliados, uma solução eficaz para o aumento da produção de gás, seja pela quantidade de SV removidos ou pela quantidade SV adicionados ao sistema.*

*O sistema de dois estágios TPAD, utilizando uma faixa termofílica no primeiro estágio com um TRH de dois dias, seguido de um segundo estágio na faixa mesofílica com TRH na faixa de 12 a 15 dias é a configuração mais promissora para soluções voltadas para o controle de temperatura. Coelho (2010) mostrou que é possível ampliar a eficiência de um sistema TPAD ao implementar o pré-tratamento utilizando micro-ondas, ficando em aberto para futuros experimentos, avaliar a eficiência combinada dos demais tipos de pré-tratamento com um sistema TPAD.*

*A faixa de temperatura termofílica não se mostrou tão eficiente para sistemas de único estágio, pois a aceleração da hidrólise aumenta o pH do sistema, inibindo a metanogênese. Recomenda-se a utilização desta faixa em sistemas de dois estágios conforme explicado anteriormente.*

*A maior dificuldade encontrada na elaboração deste estudo foi a diferença a metodologia utilizada para realização dos experimentos pelos autores avaliados. Um exemplo desta dificuldade foi a metodologia de cálculo da produção do biogás, que pode ser obtida em função da vazão do afluente, vazão do efluente, sólidos voláteis de entrada, sólidos voláteis removidos, DQO do efluente. Além disso, em alguns casos esses parâmetros não estavam presentes no estudo, de forma que não foi possível comparar a sua eficiência com os demais estudos. Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se para avaliar a eficiência de produção de metano de um digestor as seguintes variáveis de entrada:*

- *COV ou OLR em  $\text{gSVe.L}^{-1}\text{dia}^{-1}$*
- *Concentração de SV na entrada em  $\text{gVSe.L}^{-1}$*

*As seguintes variáveis de saída:*

- *Produção de biogás em  $\text{L}_{\text{CH}_4}.\text{dia}^{-1}$*
- *Concentração de SV na saída em  $\text{gVSs.L}^{-1}$*

*Buscando comparar os seguintes :*

- *Produção de Metano por SV adicionado em  $\text{mL}_{\text{CH}_4}.\text{gVSe}^{-1}$*
- *Produção de Metano por SV removido em  $\text{mL}_{\text{CH}_4}.\text{gVSrem}^{-1}$*

- Eficiência de remoção de sólidos voláteis (%)
- % de CH<sub>4</sub> no biogás

Apesar de em todos os experimentos ter sido observado o aumento da produção de biogás com o aumento da temperatura, não foi avaliado se a energia gerada pela produção de gás adicional obtida por meio do controle de temperatura é maior do que a energia gasta para manter o sistema nas temperaturas ideais sugeridas pelos estudos. Como sugestão para trabalhos futuros fica a necessidade de avaliar se o saldo do balanço energético de um sistema com controle de temperatura é positivo ou negativo, onde saldo pode ser dado pelas seguintes fórmulas:

$E_{gSCT}$  = Energia gerada pelo gás obtido sem controle de temperatura

$E_{gACCT}$  = Energia adicional gerada pelo gás obtido com controle de temperatura

$E_{cMCT}$  = Energia consumida para manter o controle de temperatura

$$E_{gSCT} + E_{gACCT} > E_{cMCT} \quad e \quad \frac{E_{gACCT}}{E_{cMCT}} > 1 \quad \text{Equação 9 e Equação 10}$$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, T.A **Brief History of Anaerobic Digestion and “Biogas”**

*Biogas Energy*, Volume 2 of the series Springer Briefs in Environmental Science p 11-23, 2011.

APPELS, Lise; BAEYENS, Jen; DEGRE`VE, Jen; DEWIL, Raf .**Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge**, 2008.

CARRÈRE, H.;DUMAS, C.;BATTIMELLI, A.; BATSTONE D.J., DELGENÈSA, J.P.;STEYER, J.P.; FERRER,I. **Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review**. *Hazardous Materials V. 183*, .p 1–15,2010.

CHAE, K. J.; JANG, A.; YIM, S.K.; KIM, I.S.;**The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yield from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure**. *Bioresourse Technology*, v.99, p. 1-6, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 10 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. Belo Horizonte, 1997.

COELHO,N. M. G.; DROSTE, R. L.; KENNEDY, K. J.**Evaluation of continuous mesophilic, thermophilic and temperature phased anaerobic digestion of microwaved activated sludge**.

*Water Research* v.45, p. 2822-2834, 2011

EMPRESA DE ENGENHARIA AMBIENTAL. **Curso de Tratamento de Esgoto - Introdução ao Tratamento de Esgotos**.

Disponível em:

<[www.comitespcj.org.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=126:ct-sa-documentos&catid=41&Itemid=309](http://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=126:ct-sa-documentos&catid=41&Itemid=309)>

Acesso em:14 de setembro de 2016.

GAVALA, H. N.; YENAL, U.;SKIADAS, I. V.; WESTERMANN,P.;AHRING,B. K.**Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge: effect of pre-treatment at elevated temperature**. *Water Research*, v.37, p.4561-4572, 2003.

GE, H.;JENSEN, P. D.; BATSTONE, D. J. **Pre-treatment mechanisms during thermophilic–mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge**. *Water Research*v.44, p.123 – 130, 2010.

GE, H.;JENSEN, P. D.; BATSTONE, D. J. **Increased temperature in the thermophilic stage in temperature phased anaerobic digestion (TPAD) improves degradability of waste activated sludge**

*Journal of Hazardous Materials*, v.1G87, p. 355–361, 2011.

GOMÉZ, X.; FERNÁNDEZ, C.; FIERRO, J.; SÁNCHEZ, M.E.; ESCAPA, A.; MORÁN, A. **Bio-hydrogen production from waste fermentation: mixing and static conditions**. *Renewable Energy*, n. 34, p. 970–975, 2009.

HAJJI, A., RHACHI, M. **The influence of temperature on the production of biogas under mesophilic regime**. *University Mohammed, Medina*, 2014

HAN, D.J. **Reaction Characteristics of the Development of Biofilm Process Combined Upflow Blanket Filter and Anoxic-Oxic Process for the Nutrient Removal**. *Kangwon National University, Chuncheon*, 1996

LEITE, W, R, M. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto**. *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis* 2011.

METCALF, B.; EDDY, B.; TCHOBANOGLOUS, G. **Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1819 p. 2003.

NGES, I. A.; LIU, J. **Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions** *Renewable Energy* v.35, p.2200 – 2206, 2010.

PALMISANO, A.; BARLAZ, M. **Anaerobic Digestion of Municipal Solid Wastes**. *Florida, Boca Raton*, 1996

PAQUES, **The BIOPAQ®IC process**.

Disponível em: <<http://en.paques.nl/products/featured/biopaq/biopaqic>>

Acesso em: 14 de setembro de 2016

REICHERT, G. A. **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão**. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. *Campo Grande, MS*. 2005.

RIAU, V. **Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class A biosolids: A semi-continuous study**. *Bioresource Technology*, v.101, p.2706–2712, 2010.

SALOMON, K, R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. *Instituto de Engenharia Mecânica, Minas Gerais*, 2007.

SAKUMA, A. C. **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência**. *Universidade Federal do Paraná, Curitiba*, 2013.

SILVA, W, R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. *Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa*, 2009

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

**VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. Types of anaerobic digester for solid wastes. In: Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Iwa Publishing, 2003. p. 111-140.**

**VIKRANT, U. D.; AJIT, C. C.; YOGESH, V. A. Temperature, pH and loading rate effect on biogas generation from domestic waste. In: Advances in Engineering and Technology, 2014 International Conference on. IEEE, 2014. p. 1-6.**

**ZUPANCIC, G. D.; GRILC, V. Anaerobic treatment and biogas production from organic waste. Management of Organic Waste, p. 1-28, 2012**