

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
ENGENHARIA AMBIENTAL

VICTOR ROSA MEREGE

Estratégias para medição de biogás e degradabilidade da matéria  
orgânica em reatores anaeróbios

São Carlos, SP

2011



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
ENGENHARIA AMBIENTAL

ESTRATÉGIAS PARA MEDIÇÃO DE BIOGÁS E  
DEGRADABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM  
REATORES ANAERÓBIOS

Aluno: Victor Rosa Merege

Orientador: Prof. Associado Valdir Schalch

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

São Carlos, SP

2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M559a	<p>Merege, Victor Rosa</p> <p>Estratégias para medição de biogás e degradabilidade da matéria orgânica em reatores anaeróbios / Victor Rosa Merege ; orientador Valdir Schalch. -- São Carlos, 2011.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.</p> <p>1. Reatores anaeróbios. 2. Biogás. 3. Matéria orgânica do solo. I. Título.</p>
-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

# FOLHA DE APROVAÇÃO

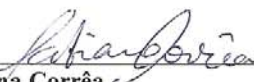
---

Candidato(a): **Victor Rosa Merege**

Monografia defendida e aprovada em: **27/10/2011** pela Comissão Julgadora:



**Prof. Valdir Schalch**



**Tatiana Corrêa**



**Rodrigo Eduardo Córdoba**



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

Coordenador da Disciplina 1800091 - Trabalho de Graduação



*Dedico esta monografia aos meus pais, que sempre lutaram para me proporcionar a melhor educação e sempre me deram os melhores exemplos de vida. Dedico também, a todas as pessoas que trabalham para transformar este mundo num lugar melhor para todos.*

## **AGRADECIMENTOS**

O meu especial agradecimento vai para as pessoas que tornaram este trabalho possível, que são elas: meu amigo Alcino de Paula, ao professor Valdir Schalch e à equipe da Volkswagen.

Agradeço principalmente ao meu grande amigo e companheiro de república Marcus que me ajudou a escrever esse trabalho e a todos que me ajudaram nas revisões.

Muito obrigado a todos!



*“Não há certezas, apenas oportunidades.”*

*Alan Moore*

## **RESUMO**

**MEREGE, V. R. Estratégias para medição de biogás e degradabilidade da matéria orgânica em reatores anaeróbios.** 2011. 51 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

A presente pesquisa teve com principal objetivo estudar a produção de biogás e a degradabilidade da matéria orgânica em reatores anaeróbios. Além disso, procurou-se analisar as características do biossólido e do lixiviado resultante do processo. O estudo foi realizado na fábrica de motores da Volkswagen do Brasil, site de São Carlos – SP, com a utilização de quatro reatores com capacidade de 50L cada, projetados para o monitoramento de temperatura e pressão e coleta de biogás e lixiviado. Cada reator recebeu uma mistura de matéria orgânica úmida (MOU) e matéria orgânica seca (MOS) em quatro diferentes proporções volumétricas, sendo o material proveniente, respectivamente, do refeitório e da área verde de onde foi realizado o estudo. O experimento durou seis meses, mas devido a alguns problemas operacionais não foi obtido nenhum resultado prático. Porém, o estudo traz uma valiosa contribuição sobre as dificuldades que este tipo de trabalho pode apresentar.

Palavras chave: Reator anaeróbio, biogás, matéria orgânica.

## **ABSTRACT**

**MEREGE, V. R. Strategies for measurement of biogas and degradability of organic matter in anaerobic reactors.** 2011. 51 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

The present research has as the main goal to study the biogas production and degradability of organic matter in anaerobic reactors. In addition, it is shown an attempt to analyze the properties of the leachate and sewage sludge resulting from the process. The study was conducted at the Volkswagen do Brasil engine plant, site of São Carlos - SP, with the use of four reactors with a capacity of 50L each, designed for monitoring temperature and pressure and collection of biogas and leachate. Each reactor received a mixture of moist organic matter (MOM) and dry organic matter (DOM) in four different volumetric proportions, collected from, respectively, the cafeteria and the green area where the study was conducted. The experiment lasted six months, but due to some operational problems there were no practical results. However, this study provides a valuable contribution to the difficulties that can be found in this kind of research.

**Keywords:** Anaerobic reactor, biogas, organic matter.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Índice per capita de coleta de RSU no Brasil .....	19
Tabela 3. 2 - Caracterização mássica dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos, SP.....	21
Tabela 3. 3 - Dados da caracterização física e química da matéria orgânica.....	22
Tabela 3. 4 - Concentrações limites inibidoras na hidrólise .....	27
Tabela 4. 1 - Parâmetros, métodos e frequências de coleta das amostras.....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Diagrama do processo Valorga.....	29
Figura 4. 1 - Reatores utilizados no experimento.....	33
Figura 4. 2 - Detalhe do manômetro.....	34
Figura 4. 3 - Detalhe do termômetro .....	35
Figura 4. 4 - Detalhe da válvula de gás .....	36
Figura 4. 5 - Aplicação de silicone no registro da válvula de gás .....	36
Figura 4. 6 - Detalhe do registro de coleta de lixiviado .....	37
Figura 4. 7 - Sacos de lixo contendo MOU .....	38
Figura 4. 8 - Homogeneização da MOU .....	39
Figura 4. 9 - Material plástico recolhido .....	39
Figura 4. 10 - Montes de MOU em vermelho e MOS em amarelo .....	40
Figura 4. 11 - Amostras coletadas .....	41
Figura 4. 12 - Preenchimento dos reatores .....	41
Figura 4. 13 - Reator preenchido .....	42
Figura 4. 14 - Fechamento dos reatores.....	42
Figura 4. 15 - Reatores finalizados.....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

C/N	Relação de concentração entre carbono e nitrogênio
kg	Quilograma
g	Grama
MOU	Matéria orgânica úmida
MOS	Matéria orgânica seca
RSD	Resíduos sólidos domiciliares
RSU	Resíduos sólidos urbanos
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ST	Sólidos totais
STV	Sólidos totais voláteis
COT	Carbono orgânico total
NTK	Nitrogênio total Kjeldhal
DQO	Demanda química de oxigênio
AGV	Ácidos graxos voláteis
psi	Libra força por polegada quadrada ( <i>pound force per square inch</i> )
cv	Cavalo – Vapor
mg CaCO <sub>3</sub> /L	Miligramas de carbonato de cálcio por litros
mg/g	Miligramas por gramas
mg/L	Miligramas por litros
%mg/mg	Miligramas por miligramas
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
t/mês	Toneladas por mês
°C	Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.</b>	<b>OBJETIVO PRINCIPAL .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.</b>	<b>PANORAMA DOS RESÍDUOS DOMICILIARES NO BRASIL .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.</b>	<b>DIGESTÃO ANAERÓBIA.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>TEMPERATURA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>pH.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.3.</b>	<b>RETENÇÃO DE PARTÍCULAS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.4.</b>	<b>TOXICIDADE .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.5.</b>	<b>ALCALINIDADE.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.6.</b>	<b>ÁCIDOS GRAXOS VOLÁTEIS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.7.</b>	<b>NUTRIENTES .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.8.</b>	<b>INIBIDORES .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.9.</b>	<b>OUTROS FATORES .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4.</b>	<b>REATORES ANAERÓBIOS DE RESÍDUOS DOMICILIARES.....</b>	<b>27</b>
<b>3.5.</b>	<b>BIOGÁS.....</b>	<b>30</b>
<b>3.6.</b>	<b>LIXIVIADO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.7.</b>	<b>BIOSSÓLIDO .....</b>	<b>31</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.</b>	<b>DESCRIÇÃO GERAL .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.</b>	<b>CONSTRUÇÃO DOS REATORES .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>PRESSÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>TEMPERATURA .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>BIOGÁS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.4.</b>	<b>LIXIVIADO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.</b>	<b>ETAPAS DO PROCESSO.....</b>	<b>37</b>

<b>4.3.1. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3.2. PREENCHIMENTO DOS REATORES .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4. MONITORAMENTO DO SISTEMA.....</b>	<b>43</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>5.1. TEMPERATURA .....</b>	<b>45</b>
<b>5.2. BIOGÁS .....</b>	<b>45</b>
<b>5.3. AMOSTRAS DAS MISTURAS .....</b>	<b>45</b>
<b>5.4. LIXIVIADO.....</b>	<b>46</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>48</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei nº 12.305, marco regulatório no setor de resíduos sólidos, sancionada em agosto de 2010 e regulamentada em dezembro do mesmo ano, institui o princípio de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Compreendendo fabricantes, distribuidores, comerciantes e consumidores, destacam-se os principais objetivos:

[...]

II – não-geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;

[...]

IV – adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;

[...]

XIV – incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados à melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluída a recuperação e o aproveitamento energético.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, um estudo realizado pela Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, no ano de 2010, foram produzidas quase 61 milhões de toneladas de resíduos sólidos no país. Trabalhos de autores como Frésca (2007), Carvalho (1999) e Monteiro et al. (2001), mostram que em média, 50% dos resíduos domiciliares é composta por matéria orgânica putrescível.

O aproveitamento da matéria orgânica para a geração de biogás já vem sendo estudado por autores como Forster-Carneiro, Pérez e Romero (2007) e Tosetto (2009). A energia proveniente da queima do biogás traz uma alternativa de uso para esses resíduos, que atualmente são encaminhados para aterros sanitários onde em poucos casos, gera-se energia a partir do biogás formado.

É dentro deste contexto que o presente trabalho apresenta um estudo sobre a digestão anaeróbia em reatores, utilizando a matéria orgânica proveniente do refeitório e da área verde da fábrica de motores da Volkswagen do Brasil, na cidade de São Carlos - SP.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar, em reatores anaeróbios, a degradabilidade da matéria orgânica gerada no refeitório e na área verde da fábrica de motores da Volkswagen do Brasil, localizada em São Carlos - SP.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Dentro do principal objetivo, tem-se o estudo da composição e da quantidade do biogás, do líquido e do biossólido gerados no processo de degradação da matéria orgânica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. PANORAMA DOS RESÍDUOS DOMICILIARES NO BRASIL

Os resíduos sólidos compreendem todos os dejetos provenientes das atividades humanas e animais e toda a massa heterogênea dos resíduos de uma comunidade (THOBANO-GLOUSS et al., 1994). Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o Brasil passou a contar com uma diretiva em âmbito nacional de como gerir corretamente esses resíduos. Além disso, a mesma lei traz o incentivo à busca de tecnologias sustentáveis para o tratamento adequado destes resíduos, procurando integrar a sociedade e o meio ambiente com a criação de cooperativas e o reaproveitamento energético dos materiais.

No Brasil, a geração de resíduos sólidos tem aumentado a cada ano. Um estudo realizado pela Abrelpe mostra que de 2009 para 2010 houve um crescimento de 6,8% na geração de RSU, totalizando 60.868.080 de toneladas. Outro dado mostra que 6,7 milhões de toneladas foram descartados incorretamente. Os aterros sanitários, segundo o mesmo estudo, representam a destinação final de 57,6% dos resíduos coletados, seguido de 24,3% dos aterros controlados e 18,1% dos lixões.

A Tabela 3.1 mostra a quantidade de RSU coletada e a produção per capita em cada região do país:

Tabela 3. 1 - Índice per capita de coleta de RSU no Brasil

Região	2010	
	RSU Coletado (t/dia)	Índice (kg/habitante/dia)
Norte	10.623	0,911
Nordeste	38.118	0,982
Centro – Oeste	13.967	1,119
Sudeste	92.167	1,234
Sul	18.708	0,804
<b>Brasil</b>	<b>173.583</b>	<b>1,079</b>

Fonte: ABRELPE (2010), modificado.

### 3.1.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física dos resíduos sólidos é definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-NBR 10007, 2004) como sendo a “determinação dos constituintes e de suas respectivas porcentagens em peso e volume, em uma amostra de resíduos sólidos, podendo ser físico, químico ou biológico”. Possui fundamental importância para a gestão e reaproveitamento dos materiais que são descartados, além de fornecer uma ferramenta para a escolha do tratamento mais adequado para os resíduos.

A composição dos resíduos domiciliares é diversificada e heterogênea, variando em função de fatores como nível socioeconômico da população, época do ano e tipo de coleta existente (FRESCA, 2007).

Frésca (2007) estudou as características dos resíduos gerados em São Carlos – SP. Seu objetivo consistia em analisar a influência dos programas de coleta seletiva da cidade no resíduo que chegava ao aterro sanitário e relacionar os resultados obtidos em função dos aspectos socioeconômicos da população. Para isso, o autor utilizou uma divisão setorial da cidade criada pela empresa que administrava a coleta de lixo no município e com isso, realizou nos materiais coletados de cada setor, o método de quarteamento (ABNT-NBR 10007, 2004), que consiste basicamente na transformação de uma grande quantidade de resíduos coletados em uma amostra representativa. Seu trabalho identificou que a maior parte dos resíduos era constituída de matéria orgânica (59,08%), como mostra a Tabela 3.2:

Tabela 3. 2 - Caracterização mássica dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos, SP

Setor	RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIÁRES – COLETA CONVENCIONAL							
	Matéria Orgânica	Papel e Papelão	Tetra Pak	Vidro	Metal e Alumínio	Plástico Rígido	Plástico Filme	Outros
1	67,10%	4,90%	0,93%	2,20%	1,89%	3,27%	9,21%	12,42%
2	54,95%	11,14%	0,87%	1,35%	1,59%	4,01%	7,41%	20,96%
3	47,24%	9,49%	0,82%	2,47%	1,22%	3,41%	7,88%	26,30%
4	60,82%	6,43%	0,57%	1,51%	1,66%	3,31%	9,69%	17,63%
5	51,76%	6,17%	0,96%	1,56%	1,36%	4,20%	6,76%	22,30%
6	72,41%	3,52%	0,87%	1,13%	1,07%	2,00%	7,07%	12,57%
7	63,72%	4,01%	1,13%	0,81%	1,38%	2,18%	6,20%	20,82%
8	61,95%	2,73%	1,34%	0,69%	1,26%	2,15%	6,73%	24,17%
9	53,96%	8,66%	0,87%	2,39%	1,01%	2,13%	7,18%	23,40%
10	57,20%	5,95%	1,54%	2,45%	1,54%	2,74%	9,39%	20,11%
11	68,08%	4,07%	0,77%	1,01%	1,08%	1,94%	6,32%	17,81%
12	42,55%	9,22%	1,03%	2,75%	1,19%	3,34%	6,95%	23,60%
13	62,33%	8,23%	0,77%	1,56%	1,44%	3,39%	6,70%	17,34%
14	57,21%	6,49%	0,95%	0,93%	1,03%	2,31%	9,36%	22,87%
15	64,97%	5,58%	0,67%	2,30%	0,90%	2,23%	7,63%	17,01%
<b>Média</b>	<b>59,08%</b>	<b>6,44%</b>	<b>0,94%</b>	<b>1,67%</b>	<b>1,31%</b>	<b>2,84%</b>	<b>7,63%</b>	<b>20,09%</b>

Fonte: FRÉSCA (2007)

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros físico-químicos da matéria orgânica putrescível presente nos resíduos sólidos de algumas cidades brasileiras.

Tabela 3. 3 - Dados da caracterização física e química da matéria orgânica

<b>Parâmetro</b>	<b>Campina Grande (PB)</b>	<b>Vitória (ES)</b>	<b>Caxias do Sul (RS)</b>	<b>Porto Alegre (RS)</b>
pH	4,9	5,4	5,5	4,5
Umidade (%)	80,0	53,7	70,6	89,8
ST (%)	20,0	46,3	29,4	10,2
STV (%)	69,0	47,2	72,4	-
COT (%)	38,3	26,2	40,2	43,0
NTK (%)	1,3	1,2	-	2,0
DQO (%)	26,7	-	-	-
C/N	29,4	21,8	-	21,5

Fonte: Cassini (2003), modificado.

Outros autores como Carvalho (1999) e Monteiro et al. (2001) também estudaram as características dos resíduos sólidos de diferentes cidades e concluíram que a matéria orgânica representa a maior porcentagem, em massa, dos resíduos sólidos domiciliares coletados. O Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT (2000) constatou que a matéria orgânica putrescível representa 55% (porcentagem em peso) dos resíduos sólidos urbanos no país. Isso mostra o grande potencial que há no reaproveitamento deste material.

### 3.2. ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi realizado na fábrica de motores da Volkswagen do Brasil. Localizada na cidade de São Carlos (SP), a fábrica tem área total de 750 mil m<sup>2</sup>, dos quais 35 mil m<sup>2</sup> são de área construída e o restante de área verde. Atualmente, a fábrica emprega cerca de 1250 colaboradores diretos e indiretos e a geração de resíduos provenientes do refeitório chega a 8 t/mês.

A Volkswagen do Brasil - Indústria de Veículos Automotores Ltda., desenvolve, produz, monta e comercializa motores, automóveis, veículos comerciais e componentes para o mercado nacional e internacional. A empresa assume o compromisso com a melhoria contínua para alcançar a compatibilidade entre seus processos, produtos e o meio ambiente, assim co-

mo com a redução da utilização dos recursos naturais visando à preservação do meio ambiente e a prevenção dos danos ambientais. Estes compromissos são alcançados através do cumprimento da legislação e demais normas ambientais vigentes, principalmente as que tratam da geração de emissões atmosféricas, uso e descarte de água, manipulação de materiais perigosos e disposição final de resíduos perigosos.

### **3.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA**

A digestão anaeróbia é o processo biológico no qual microrganismos, em ambiente livre de oxigênio, convertem a matéria orgânica em gases, água e energia (CHERNICHARO, 1997). O processo ocorre em quatro etapas, intituladas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, descritas a seguir por Monroy et al. (2007).

Na hidrólise, acontece a solubilização do material particulado insolúvel e a decomposição dos polímeros orgânicos em monômeros e dímeros, os quais atravessam a membrana celular. Os polímeros são transformados através da ação de enzimas chamadas hidrolases, que são excretadas pelas bactérias fermentativas.

A acidogênese é a etapa na qual a matéria orgânica é transformada em ácidos graxos voláteis, como o ácido acético, o propiônico e o butírico. Além disso, outros compostos são formados nesse processo, tais como o hidrogênio, dióxido de carbono e álcoois. As bactérias acidogênicas, preferencialmente, degradam a matéria orgânica transformando-a em ácidos; os outros compostos são formados pelo acúmulo de hidrogênio durante as perturbações no sistema.

A acetogênese, em geral, pode ser dividida em dois mecanismos diferentes: a acetogênese de hidrogenação, que produz ácido acético,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ ; e a acetogênese de desidrogenação, que converte os ácidos graxos de cadeia curta e de cadeia longa em ácido acético.

A metanogênese é um processo conduzido por dois diferentes tipos de bactérias denominadas acetoclásticas e hidrogenofílicas. As primeiras convertem o ácido acético em dióxido de carbono e metano, sendo as responsáveis pela maioria do metano produzido. As hidrogenofílicas produzem metano utilizando hidrogênio e dióxido de carbono.

Por ser um sistema de interações complexas, a digestão anaeróbia pode sofrer alterações pela variação das condições internas e externas. A seguir, se apresentam as variáveis mais representativas que interferem no processo.

### 3.3.1. TEMPERATURA

A temperatura influencia a atividade metabólica dos microrganismos, pois afeta diretamente a velocidade das reações biológicas (MONROY et al. 2007). Além disso, tem um efeito acentuado na velocidade de transferência de gases, na tensão superficial, na viscosidade e na sedimentação de alguns sólidos biológicos.

A digestão anaeróbia acontece em dois intervalos de temperatura: o termofílico (45 – 60 °C) e o mesofílico (25 – 40 °C). Segundo Seghezze (2004), o processo de hidrólise é mais lento em baixas temperaturas, por isso uma maior quantidade de matéria orgânica permanece sem degradar. No entanto, se esses sólidos são retidos no reator, separados da fase líquida, podem ser degradados em um digestor adicional ou no mesmo, quando a temperatura se elevar novamente.

Operar digestores com altas temperaturas traz algumas vantagens como (ANGELIDAKI, ELLEGAARD, AHRING, 2003):

- O volume do reator é menor para tratar a mesma quantidade de resíduo;
- A taxa de digestão é mais rápida e os tempos de retenção mais curtos;
- Maior eficiência na destruição de microrganismos patogênicos;
- Alta eficiência na hidrólise do material particulado.

### 3.3.2. pH

Segundo Angelidaki, Ellegaard e Ahring (2003) o processo de digestão anaeróbia está relativamente limitado a um intervalo de pH entre 6,0 e 8,5. Valores fora desta faixa podem causar um desequilíbrio no processo. Cada grupo bacteriano que contribui na digestão tem um pH ótimo de trabalho e pode crescer em um intervalo específico. A metanogênese e a acetogênese tem um pH ótimo próximo de 7,0; já a acidogênese tem um pH ótimo de 6,0. A acidificação do sistema pode ser causada pelo acúmulo de ácidos graxos voláteis, mas isso depende das características dos resíduos presentes no reator. Os ácidos orgânicos e o dióxido de carbono diminuem o valor do pH, e a amônia que contribui para o aumento deste.



### 3.3.3. RETENÇÃO DE PARTÍCULAS

Os efluentes orgânicos podem conter substâncias dissolvidas e quantidades significativas de material coloidal e particulado (SEGHEZZO, 2004). Os processos de retenção de partículas em sistemas de tratamento biológicos baseados em biopelículas ou biofilmes são:

- Transporte do líquido até a superfície da biopelícula;
- Sedimentação devido à gravidade, seguindo a lei de Stokes;
- Intercepção por colisão entre as partículas com a biopelícula.

### 3.3.4. TOXICIDADE

As bactérias metanogênicas geralmente são as mais sensíveis à toxicidade. O inibidor mais comum é o amoníaco, dado que alguns substratos contêm amoníaco em concentrações tóxicas e que se somam ao produzido pela hidrólise das proteínas, isto causa um conflito que, dependendo da temperatura e do pH, determina o grau de ionização e se relaciona com a concentração de amoníaco livre, causando a inibição do processo. No entanto, o sistema pode aclimatar-se para tolerar concentrações mais altas do componente tóxico, depois de um período de adaptação. Angelidaki e Ahring (2003) afirmaram que o processo de produção de biogás pode tolerar uma concentração de 800 mg/L de amoníaco livre.

A relação Carbono/Nitrogênio também é fundamental para a estabilidade do processo. Foram reportadas relações C/N na faixa de 25 a 32 que causam um efeito positivo na produção de metano. Porém, uma baixa relação C/N causa um excesso de nitrogênio que se necessita para a síntese da biomassa e consequentemente, aumenta a inibição. O contrário leva a uma deficiência na síntese de biomassa.

Outra causa de inibição é o acúmulo de ácido acético, produto das etapas acetogênicas, resultando no acúmulo de ácidos propiônico e butírico, que podem causar dois efeitos: diminuem a constante de hidrólise da etapa hidrolítica do material insolúvel que acaba por reduzir a produção de mais ácidos e, seu acúmulo diminui o pH que conduz a uma diminuição da inibição pelo amoníaco livre devido à mudança no equilíbrio  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  para o  $\text{NH}_4^+$ .

Por fim é importante destacar que quando o substrato possui uma alta concentração de sulfato, este pode causar inibição pela formação de ácido sulfídrico. Valores de concentração

total de ácido sulfídrico na faixa de 100 a 300 mg/L ou de ácido sulfídrico livre de 50 a 150 mg/L causam cessão total na produção de biogás.

### **3.3.5. ALCALINIDADE**

A alcalinidade é a capacidade do sistema de suportar e amortizar a presença de ácidos, sem diminuir o pH. Isto ocorre devido à presença de íons hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonatos ( $\text{H}_2\text{CO}_3^-$ ) criando um efeito “tampão”. Valores típicos de alcalinidade para a digestão anaeróbia estão entre 1500 e 7500 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ .

### **3.3.6. ÁCIDOS GRAXOS VOLÁTEIS**

Os ácidos graxos voláteis são ácidos orgânicos gerados principalmente na fase acidogênica. Seus valores de concentração podem atingir de 200 a 1000 mg Ácido Acético/L, para sistemas que operam em condições termofílicas e com alto conteúdo de sólidos no substrato. O aumento da carga orgânica pode elevar os níveis de AGV provocando um efeito inibidor nos microrganismos presentes.

### **3.3.7. NUTRIENTES**

Além das concentrações de carbono e nitrogênio, outros elementos são de grande importância para os processos biológicos. O fósforo interfere na síntese de ácidos nucleicos e o potássio aumenta a permeabilidade da parede celular, ajudando na troca de nutrientes com o meio. Outro elemento muito importante é o molibdênio que ajuda a inibir o desenvolvimento de bactérias sulfatorredutoras, responsáveis pela produção de  $\text{H}_2\text{S}$ .

### 3.3.8. INIBIDORES

A presença de antibióticos, detergentes e metais pesados podem inibir o processo de biometanização. Algumas das concentrações limites são mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4 - Concentrações limites inibidoras na hidrólise

<b>Substância</b>	<b>mg / L</b>
Cobre	10 – 250
Cálcio	8000
Sódio	8000
Magnésio	3000
Sulfatos	200
Níquel	100 – 1000
Zinco	350 – 1000

Fonte: <http://www.gtz.de> (2002)

### 3.3.9. OUTROS FATORES

Outro fator importante na digestão anaeróbia é agitação da massa contida no reator, pois com a agitação se consegue liberação do gás preso no interior e a mistura homogênea do substrato e da população bacteriana, evitando assim a formação de crosta na superfície (MONROY et al. 2007).

## 3.4. REATORES ANAERÓBIOS DE RESÍDUOS DOMICILIARES

Na busca de soluções adequadas para a gestão dos RSD do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias que apresentem como principal atributo a sustentabilidade. Uma destas alternativas é o tratamento dos RSD, utilizando reatores anaeróbios.

Os reatores anaeróbios podem apresentar diferentes configurações, dependendo de ca-

racterísticas como:

- Alimentação em batelada ou contínua;
- Temperatura mesofílica ou termofílica;
- Alta ou baixa quantidade de sólidos;
- Configuração em um ou mais estágios.

Castillo e Arellano (2003) estudaram o comportamento dos resíduos sólidos do município de Bucaramanga, Colômbia, em reatores anaeróbios. Os autores dividiram seu estudo em duas etapas: a primeira foi sobre a seleção do inóculo mais apropriado para o processo e a segunda foi sobre o comportamento dos reatores com diferentes tempos de detenção hidráulica (TDH). Para a seleção do inóculo levou-se em conta a produção de metano e sua porcentagem no biogás produzido, assim como a estabilidade na variação do pH e a qualidade físico-química do biossólido resultante. O experimento foi conduzido em três reatores de 20L, contendo, respectivamente, lodo de reator UASB, lodo de um biodigestor anaeróbio alimentado com esterco de porco e uma mescla dos lodos anteriores na proporção volumétrica de 1:1.

Como resultado final, constatou-se que o melhor inóculo foi a mistura dos dois tipos de lodo e que se obtêm uma maior produção específica de metano quando se opera o reator com um TDH de 18 dias.

Outro estudo, realizado por Tosetto (2009), analisa a codisposição da fração orgânica dos resíduos sólidos do município de São Carlos – SP, com o lodo proveniente de tanques sépticos. Neste trabalho o autor inoculou em quatro reatores de 50L cada, quantidades diferentes de resíduos e lodo.

O experimento durou 189 dias e durante esse tempo foram monitorados parâmetros como temperatura, produção de biogás e de lixiviado. Como resultados, constatou-se que os reatores que receberam mais lodo produziram mais metano.

Existem hoje no mercado, tecnologias como a Valorga que foi inicialmente desenvolvida na França e mais tarde pela Steinmuller Valorga Sarl, uma subsidiária da companhia alemã Steinmuller Rompf Wassertechnik GmbH. Inicialmente desenvolvida para tratar somente resíduos orgânicos, foi adaptada para tratamento de RSU separados na fonte.

O processo da planta Valorga (Figura 1) consiste de seis unidades: unidade de recebimento e processamento do resíduo, digestor anaeróbio, cura do composto, utilização do biogás, tratamento de efluentes gasosos e uma unidade opcional de tratamento de esgotos (quando o efluente não é tratado em estação de tratamento de esgoto municipal). A planta inclui balança para pesagem dos caminhões, local fechado para descarga com tratamento do ar, se-

parador eletromagnético, triagem para retirada de outros materiais e triturador para redução do tamanho das partículas. Depois disso, o resíduo é alimentado continuamente à unidade de digestão anaeróbia.

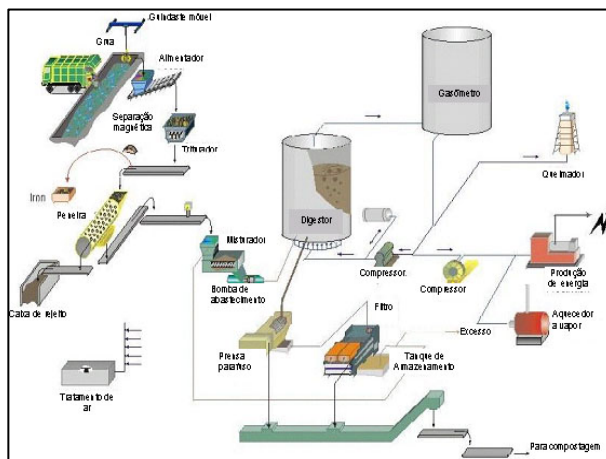


Figura 3. 1 - Diagrama do processo Valorga  
Fonte: Techfina (2004)

Na unidade de digestão anaeróbia (digestor ou reator) os resíduos são misturados com o lixiviado recirculado numa massa com cerca de 20 a 35 % de teor de sólidos, dependendo do tipo de resíduo. Portanto, o uso de água é mínimo. O digestor pode operar tanto da fase mesofílica quanto na termofílica.

O reator Valorga é um cilindro vertical de concreto com cerca de 20 m de altura e 10 m de diâmetro interno. Há uma parede vertical interna em toda a extensão vertical e a 2/3 do diâmetro do reator. Esta repartição interna minimiza a formação de curto-circuito e assegura fluxo contínuo em toda extensão do reator. Os orifícios para alimentação e retirada da massa digerida ficam localizados nos dois lados desta parede. A mistura material em digestão é feita pela injeção de biogás à alta pressão através de orifícios na base do reator. Não há partes mecânicas e a manutenção se resume à limpeza periódica dos orifícios na base do digestor.

Após a digestão, o material digerido passa por um filtro-prensa para retirada do excesso de umidade. O lixiviado é usado na recirculação e o excesso tratado (*in situ* ou em uma ETE) e a parte sólida é enviada à planta de compostagem, onde permanece por duas semanas. O biogás gerado é utilizado para geração de eletricidade e vapor ou é injetado na rede de gás da cidade.

### 3.5. BIOGÁS

O biogás é geralmente composto por: metano (40 - 75%), dióxido de carbono (25 - 40%), nitrogênio (0,5 - 2,5%), oxigênio (0,1 - 1%), ácido sulfídrico (0,1 - 0,5%), amoníaco (0,1 - 0,5%), monóxido de carbono (0 - 0,1%) e hidrogênio (1 - 3%) (CASTANON, 2002). Caracteriza-se por ser um gás corrosivo devido à presença do ácido sulfídrico, exigindo cuidados especiais nos equipamentos utilizados.

O metano liberado diretamente na atmosfera produz o agravamento do efeito estufa, pois possui um potencial de dano global – GWP, cerca de 23 vezes o do dióxido de carbono (IPCC, 2007).

Tendo em vista que o metano possui poder calorífico da ordem de 35.800 KJ/m<sup>3</sup>, o poder calorífico do biogás pode variar de 22.500 a 25.000 KJ/m<sup>3</sup>. Isto significa um aproveitamento de 6,25 a 10 KWh/m<sup>3</sup> (JORDÃO et al., 1995). Quando o CO<sub>2</sub> é retirado da mistura gasosa, o poder calorífico do biogás pode atingir 60% do poder calorífico do gás natural.

Um estudo conduzido por Salomon e Lora (2006) mostra o potencial brasileiro de geração de energia elétrica a partir do biogás. Os autores compararam a produção de biogás proveniente de diferentes resíduos e concluíram que, segundo o Ministério de Minas e Energia (2005) a energia proveniente desta fonte pode chegar a 43% do total da potência instalada pelas fontes renováveis contempladas no PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

### 3.6. LIXIVIADO

WU et al. (1988) descreveram o lixiviado como:

“[...] produto derivado da hidrólise dos compostos orgânicos e da umidade do sistema, com características que variam em função do tipo de resíduo sólido, da idade do aterro, das condições meteorológicas, hidrológicas do local do aterramento. Geralmente, o lixiviado possui elevada carga orgânica, fontes de nitrogênio amoniacal, metais pesados e grupos microbianos”.

Segundo Netto et al., (1999), o lixiviado gerado a partir de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é um dos mais sérios problemas, sendo sua carga poluidora potencialmente maior que a de águas residuárias.

Há vários métodos (ou metodologias) sugeridos para tratamento de lixiviado, um deles é sua recirculação no aterro. De acordo com Kim e Pohland (1999), a recirculação ajuda a transformar o aterro sanitário em um reator anaeróbio, promovendo o tratamento anaeróbio do lixiviado e a aceleração da degradação dos resíduos devido ao aumento do fluxo da umidade, o qual estimula a atividade microbiana por promover melhor contato entre substratos insolúveis, nutrientes solúveis e microrganismos.

### **3.7. BIOSSÓLIDO**

O efluente ou produto final semissólido do reator de digestão anaeróbia é um bioossólido que pode trazer uma série de contaminantes dependendo do substrato e das condições de operação do reator. O material digerido é produzido tanto na acidogênese quanto na metanogênese e em cada uma das fases as características são diferentes. Na acidogênese o material é fibroso e consiste de matéria vegetal estrutural incluindo lignina e celulose, possui alta capacidade de retenção de umidade e pode também conter minerais. Na metanogênese o material digerido é uma espécie de lodo e frequentemente contém nitratos e fosfatos.

Entre os principais contaminantes estão alguns metais pesados e microrganismos patogênicos. Antigamente era comum a prática da disposição destes resíduos no mar, contudo, esta prática foi proibida mundialmente pelos países membros da Organização das Nações Unidas através do acordo de Helsinki, firmado em 1987. A norma mais difundida que regula a qualidade dos lodos finais é a de WEF (1993), que baseado em critério de redução de patógenos, classifica o efluente em classe A ou classe B, permitindo sua utilização.

O tratamento do bioossólido pode ser dividido em duas etapas: a primeira etapa consiste em reduzir o volume mediante a redução da água presente no bioossólido, com o qual se reduz o potencial Z das partículas, aumentando-se, conseqüentemente, o processo de espessamento e desidratação; depois se realiza a estabilização do mesmo através da eliminação de patógenos por meio de tratamentos químicos, térmicos ou biológicos. A segunda etapa consiste em tratamentos posteriores como a compostagem, lodos ativados, secagem térmica, incineração, pirólise, gaseificação, oxidação úmida, fusão de lodos, entre outros.

Além de conter lignina que não pode ser digerida pelos microrganismos anaeróbios, o bio sólido também pode conter amônia que é fitotóxica e dificulta o crescimento das plantas se for usado como condicionante de solo. Por essas duas razões, um estágio de maturação ou compostagem deve ser empregado após a digestão. A lignina e outros materiais são degradados por microrganismos aeróbios, como os fungos. Durante a maturação, a amônia é transformada em nitratos, melhorando assim a fertilidade do bio sólido (CHAUDHARY, 2008).



## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. DESCRIÇÃO GERAL**

O experimento foi realizado usando-se quatro bombonas de 50 litros cada, construídas em polietileno (corpo e tampa) e preenchidas com misturas em diferentes proporções de matéria orgânica úmida – MOU (composta principalmente por restos de frutas, verduras, legumes, arroz, feijão e carnes) e matéria orgânica seca – MOS (composta por grama cortada e folhas secas), provenientes, respectivamente, do que é descartado do refeitório e do que é gerado na área verde da fábrica de motores da Volkswagen do Brasil.

### **4.2. CONSTRUÇÃO DOS REATORES**

Os reatores receberam conexões para a coleta de gás e lixiviado e instalação de termômetro e manômetro para a medição da temperatura e pressão interna, respectivamente, permitindo assim o monitoramento do sistema. A Figura 4.1 ilustra os quatro reatores utilizados no experimento:



Figura 4. 1 - Reatores utilizados no experimento

#### 4.2.1. PRESSÃO

Com o intuito de verificar a pressão no interior dos reatores, indicando assim a formação de gases no processo, foram instalados na tampa de cada reator, um manômetro de metal da marca Lubefer com diâmetro de 50mm e pressão máxima de trabalho de 60 psi (Figura 4.2).



Figura 4. 2 - Detalhe do manômetro

#### 4.2.2. TEMPERATURA

Para a análise da temperatura durante o período do experimento, utilizaram-se termômetros da marca AMC que medem temperaturas de 0 a 150 °C, acoplados na parte superior do corpo do reator (Figura 4.3).



Figura 4. 3 - Detalhe do termômetro

Para a conexão dos termômetros foi utilizado flange roscável em PVC e a vedação feita com silicone industrial.

#### 4.2.3. BIOGÁS

Para a coleta do biogás gerado, foram instaladas válvulas  $\frac{3}{4}$ " com engate rápido para tubulação de gás no centro da tampa (Figura 4.4). Para garantir a vedação do sistema, foi utilizado silicone na rosca da tampa e na junção da válvula com a tampa. Além disso, o furo na tampa para o encaixe da válvula foi feito com rosca, e a utilização de fita veda-rosca, permitiu um melhor encaixe da válvula.



Figura 4. 4 - Detalhe da válvula de gás

Como os reatores permaneceram na fábrica da Volkswagen, optou-se por aplicar silicone no registro da válvula (Figura 4.5) como indicador de abertura da mesma, pois o silicone se descolaria se alguém não autorizado manipulasse o registro e com isso seria possível saber se o experimento fosse adulterado.



Figura 4. 5 - Aplicação de silicone no registro da válvula de gás

#### 4.2.4. LIXIVIADO

A coleta do lixiviado foi projetada para ser realizada na parte inferior do corpo do reator. Utilizou-se para esse fim, conexões e válvulas em esfera com diâmetro de ½” em PVC, como mostra a Figura 4.6.



Figura 4. 6 - Detalhe do registro de coleta de lixiviado

No fundo dos reatores foram adicionados aproximadamente 14 kg de brita nº 2 (previamente lavada) cobrindo completamente o orifício de saída, evitando assim o escape da massa orgânica na hora da coleta do lixiviado.

#### 4.3. ETAPAS DO PROCESSO

Os reatores foram preenchidos com quatro diferentes misturas de MOU e MOS listadas a seguir:

Reator 1: Preenchido somente com MOU, totalizando 28 kg do resíduos;

Reator 2: Preenchido com 28 kg de mistura entre MOU e MOS na proporção volumétrica de 1:0,5 respectivamente;

Reator 3: Preenchido com 28 kg de mistura entre MOU e MOS na proporção volumétrica de 1:1 respectivamente;

Reator 4: Preenchido com 28 kg de mistura entre MOU e MOS na proporção volumé-

trica de 1:2 respectivamente.

As relações acima foram adotadas com o intuito de estudar a variação das concentrações de carbono e nitrogênio da mistura e seu efeito na degradação da matéria orgânica em função da proporção volumétrica de cada resíduo. Como a MOU é rica em nitrogênio e a MOS rica em carbono (DIAZ; SAVAGE, 2007), procurou-se atingir a melhor relação entre esses dois elementos.

#### 4.3.1. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

O experimento iniciou-se com a preparação da MOU, a qual foi previamente acondicionada em sacos plásticos como mostra a Figura 4.7.



Figura 4. 7 - Sacos de lixo contendo MOU

Após a abertura dos sacos plásticos, seu conteúdo foi misturado sobre a grama para dispersar os líquidos e para que os restos no final do processo possam ser degradados naturalmente. Como cada saco continha diferentes quantidades de compostos orgânicos, uma homogeneização foi realizada como ilustra a Figura 4.8.





Figura 4. 8 - Homogeneização da MOU

Como o processo de separação do material orgânico no refeitório não é 100% eficiente foi necessário retirar alguns materiais da mistura, como copos e embalagens plásticas (Figura 4.9).



Figura 4. 9 - Material plástico recolhido

Após o processo de homogeneização, pesou-se 28 kg de MOU em uma balança eletrônica (marca Ramuza tron, modelo IDR-10000, capacidade máxima de 150 kg e capacidade mínima de 1 kg) e colocou-se o material ao lado de outros três montes de capim e folhas secas para comparação visual do volume. Optou-se por fazer a comparação visual dos volumes, pois não havia no local um recipiente graduado para a medição volumétrica. A Figura 4.10 apresenta o monte de MOU (demarcação em vermelho) e os montes de MOS (demarcação em amarelo) nas proporções volumétricas de 1:0,5; 1:1 e 1:2, respectivamente. Após o preparo da MOS, utilizou-se um triturador da marca Trapp (modelo TRF-70 com potência de 1,5 cv) para

triturar os montes separadamente e com isso, facilitar o processo de mistura.



Figura 4. 10 - Montes de MOU em vermelho e MOS em amarelo

Depois de preparar cada mistura, retirou-se uma amostra de aproximadamente 300 g de cada (Figura 4.11). As amostras são descritas a seguir:

Amostra nº 1: Contém apenas MOU;

Amostra nº 2: Contém apenas MOS;

Amostra nº 3: Contém a mistura de MOU e MOS na proporção volumétrica de 1:0,5 respectivamente;

Amostra nº 4: Contém a mistura de MOU e MOS na proporção volumétrica de 1:1 respectivamente;

Amostra nº 5: Contém a mistura de MOU e MOS na proporção volumétrica de 1:2 respectivamente.

As amostras foram coletadas para a realização das seguintes análises em laboratório: DBO, DQO, pH, sólidos totais, relação C/N e umidade; para, com isso, comparar ao final do processo as características iniciais e finais da matéria orgânica inserida em cada reator e avaliar sua degradabilidade.





Figura 4. 11 - Amostras coletadas

Por fim, iniciaram-se os trabalhos de preenchimento dos reatores.

#### 4.3.2. PREENCHIMENTO DOS REATORES

O primeiro reator foi preenchido somente com 28 kg de MOU. Para o segundo reator pesou-se 28 kg de MOU e misturou-se com o monte de MOS que continha metade daquele volume. Pesou-se então 28 kg da mistura e preencheu-se o reator de número 2 (Figura 4.12).



Figura 4. 12 - Preenchimento dos reatores

O processo para os reatores de número 3 e 4 foi semelhante ao anterior, variando-se apenas as proporções de MOS. A Figura 4.13 mostra o reator preenchido:



Figura 4. 13 - Reator preenchido

Com os quatro reatores preenchidos, aplicou-se silicone nas tampas e nas bordas das bombonas, criando assim uma vedação para evitar o escape de gás. Com a ajuda de uma ferramenta especialmente usinada, fecharam-se os reatores e suas válvulas (Figura 4.14).



Figura 4. 14 - Fechamento dos reatores

Os reatores preenchidos e devidamente selados foram colocados lado ao lado no galpão de compostagem da fábrica (Figura 4.15).



Figura 4. 15 - Reatores finalizados

#### **4.4. MONITORAMENTO DO SISTEMA**

O experimento foi projetado para ter seis meses de duração. Durante este período, que começou em 25/03/2011 e terminou em 25/09/2011, pretendeu-se realizar algumas coletas de amostras para posterior análise em laboratório de suas características físico-químicas. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros a serem analisados, bem como o método utilizado e a frequência de coleta das amostras.

Tabela 4. 1 - Parâmetros, métodos e frequências de coleta das amostras

Parâmetros	Aplicação	Unidades	Método	Frequência
Temperatura	Reatores	°C	Termômetro	Diária
DQO	MOU	mg/g	Colorimétrico	Início do experimento
	MOS	mg/g		Início do experimento
	Misturas	mg/g		Início e final do experimento
	Lixiviado	mg/L		Quinzenal
pH	MOU		Potenciométrico	Início do experimento
	MOS			Início do experimento
	Misturas			Início e final do experimento
	Lixiviado			Quinzenal
Umidade	MOU	% mg/mg	Gravimétrico	Início do experimento
	MOS	% mg/mg		Início do experimento
	Misturas	% mg/mg		Início e final do experimento
Sólidos Totais – Fixos e Voláteis	MOU	mg/g	Gravimétrico	Início do experimento
	MOS	mg/g		Início do experimento
	Misturas	mg/g		Início e final do experimento
	Lixiviado	mg/L		Quinzenal
Sólidos Suspensos e Dissolvidos – Fixos e Voláteis	Lixiviado	mg/L	Gravimétrico	Quinzenal
Nitrogênio Total Kjeldahl	Lixiviado	mg/L	Kjedahl	Quinzenal
Nitrogênio Amoniacal	Lixiviado	mg/L	Destilação preliminar	Quinzenal
Composição do Biogás	Biogás	%	Cromatografia à gás	Quinzenal
Alcalinidade	Lixiviado	mg CaCO <sub>3</sub> /L		Quinzenal
Ácidos Voláteis	Lixiviado	mg CaCO <sub>3</sub> /L		Mensal
Metais (Zn, Pb, Cd, Ni, Fe, Mn, Cu e Cr)	Lixiviado	mg/L		Quinzenal

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1. TEMPERATURA**

A coleta de dados de temperatura foi realizada durante o primeiro mês de experimento com a ajuda da equipe da Volkswagen, no entanto, as leituras se aproximaram muito da temperatura ambiente (variando de 15 a 30 °C). Isso provavelmente se deve ao fato da vareta do termômetro (que faz a leitura da temperatura) ter ficado acima do conteúdo dos reatores, pois a massa sofreu recalque durante o processo. Com isso, decidiu-se por descartar os dados de temperatura obtidos.

### **5.2. BIOGÁS**

Tomando-se as precauções necessárias para evitar o escape do gás produzido no interior do reator, a coleta do biogás estava prevista para ser executada quinzenalmente, porém, devido a um entupimento na instalação dos manômetros, não foi possível aferir a variação de pressão no interior dos reatores, o que acarretou no rompimento das tampas. Apesar de corrigir o problema com os manômetros e de instalar novas tampas, não se dispunha de recipiente adequado para a coleta do biogás. As ampolas de coleta de gás foram adquiridas três meses após o início do experimento, mas como o conteúdo do reator se alterou depois deste tempo, optou-se por não realizar as coletas de gás.

### **5.3. AMOSTRAS DAS MISTURAS**

As cinco amostras retiradas dos reatores foram armazenadas em refrigerador. Durante algumas semanas procurou-se um laboratório capaz de realizar as análises necessárias. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa de São Carlos dispunha da estrutura necessária, mas ao se verificar o estado das amostras descobriu-se que estas se degradaram

por causa de uma falha elétrica do motor do refrigerador. A degradação alterou as características físico-químicas iniciais das amostras, por isso, as mesmas foram descartadas.

#### **5.4. LIXIVIADO**

A coleta do lixiviado foi prejudicada devido à obstrução das válvulas de três reatores, causada pela brita utilizada. Mesmo com os esforços despendidos, as válvulas não se mexiam, impossibilitando assim a coleta do lixiviado.

## **6. CONCLUSÕES**

O presente trabalho teve o intuito de mostrar através de revisão bibliográfica e experiência prática, o potencial do uso da digestão anaeróbia no tratamento da fração orgânica presente nos RSD.

Apesar dos problemas enfrentados durante o experimento, procurou-se mostrar através dos trabalhos de outros autores a grande contribuição que esta tecnologia pode dar à sociedade, através da geração de energia elétrica; da redução no volume de resíduos que chegam aos aterros ou são descartados incorretamente; da utilização na agricultura do biossólido gerado e no combate ao agravamento do efeito estufa.

## **7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para corrigir os problemas e dar continuidade a esta pesquisa, propõe-se algumas sugestões:

- i. Para a medição da temperatura, recomenda-se que sejam posicionados termômetros em diferentes alturas do reator, para com isso obter dados mais representativos;
- ii. Para a coleta de biogás recomenda-se um cuidado maior com o controle da pressão interna dos reatores, para evitar danos a sua estrutura;
- iii. Armazenar, caso necessário, adequadamente as amostras dos reatores para evitar alterações indesejáveis em suas características físico-químicas originais;
- iv. Estudar a quantidade de energia elétrica que poderia ser gerada com o biogás produzido;
- v. Estudar o reaproveitamento do lixiviado gerado no processo;
- vi. Aumentar a escala dos reatores para obter dados mais representativos.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS <sup>1</sup>

ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING, B. K. **Applications of the anaerobic digestion process advances in biochemical engineering/biotechnology**. Springer - Verlag, Berlin Heidelberg, v. 82, p. 1-33, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2010. 202 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004c.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 21 ago. 2011.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 330 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CASSINI, S. T. et al. **PROSAB: Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210 p.

CASTANÓN, N. J. B. **Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais**. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como fonte de energia - Conversão e utilização. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002. 66 p.

CASTILLO, E.; ARELLANO, V. **Estudio de las condiciones de operación de la digestión anaeróbia de RSU**. 2003. Tese (Doutorado) - Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, 2003.

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

CHAUDHARY, B. K. **Dry continuous anaerobic digestion of municipal solid waste in thermophilic conditions**. 2008. 139 f. Dissertação (Mestrado) - School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology, Thailand, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1997. 245 p.

DIAZ, L. F.; SAVAGE, G. M. **Factors that affect the process**. In: Diaz, L. F., De Bertoldi, M.; Bidlingmaier, W. (Org). *Compost Science and Technology*, 1 ed. Stentiford, p. 49-65, 2007.

FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Biometanización de residuo sólido urbano: escala de laboratorio y planta piloto. **HOLOS Environment**, Rio Claro, v.7, n.1, p. 87-104, 2007. Disponível em:  
<<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/holos/article/view/978/906>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

FRÉSCA, F. R. C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física**. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Valência, Espanha, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000, 180 p.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 3 ed. 1995. 720 p.

KIM, J.; POHLAND, F. G. **In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors**. *Water Science Technology*, v. 40, n. 8, p. 203-210, 1999.

MONROY, E. F. C. et al. **Digestión anaerobia una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos**. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, Universidad Industrial de Santander, 2007.

MONTEIRO et al. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

NETTO, J. C.; MOTA, S. **Caracterização e avaliação da tratabilidade biológica do percolato gerado no aterro sanitário oeste em Caucaia (Ceará)**. In: 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Rio de Janeiro, 1999. *Anais*. Rio de Janeiro, ABES, p. 697-703, 1999.

SALOMON, K. R.; LORA E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SEGHEZZO, L. **Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions**. Tese (Doutorado) – Wageningen University, The Netherlands, p. 4-14, 2004.

THOBANOGLOUSS, G.; THEISEN, H.; VIRGIL, S. **Gestión integral de residuos sólidos**. Mc Graw Hill, México, v. 1, 1994. 796 p.

TOSETTO, V. **Avaliação da co-disposição de lodo de tanques sépticos e fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares em reatores anaeróbios**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

WU, Y. C.; HAO, O. J.; OU, K.C.; SCHOLZE, R. J. **Treatment of leachate from a solid waste landfill site using a two-stage anaerobic filter**. *Biotechnology and Bioengineering*, p. 257-266, 1998.