

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM**  
**REATOR ANAERÓBIO DE DUPLO ESTÁGIO**  
**VISANDO A OBTENÇÃO DE BIOENERGIA E**  
**CRÉDITOS DE CARBONO:**  
**ESTUDO DE CASO CEASAMINAS**

**Eduardo da Silva Guimarães Martins da Costa**

**Belo Horizonte**

**2011**

**TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM  
REATOR ANAERÓBIO DE DUPLO ESTÁGIO  
VISANDO A OBTENÇÃO DE BIOENERGIA E  
CRÉDITOS DE CARBONO:  
ESTUDO DE CASO CEASAMINAS**

**Eduardo da Silva Guimarães Martins da Costa**

Eduardo da Silva Guimarães Martins da Costa

**TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM  
REATOR ANAERÓBIO DE DUPLO ESTÁGIO  
VISANDO A OBTENÇÃO DE BIOENERGIA E  
CRÉDITOS DE CARBONO:  
ESTUDO DE CASO CEASAMINAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Orientador: Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

C24t Costa, Eduardo da Silva Guimarães Martins da  
Tratamento de resíduos sólidos em reator anaeróbio de duplo estágio visando a obtenção de bioenergia e créditos de carbono [manuscrito]: estudo de caso CEASAMINAS / Eduardo da Silva Guimarães Martins da Costa. – 2011. v,108 f., enc.: il.

Orientador: Gilberto Caldeira Bandeira de Melo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 90-108.

Bibliografia: f. 84-89.

1. Meio ambiente – Teses. 2. Resíduos sólidos – Teses. 3. Resíduos orgânicos - Reaproveitamento – Teses. 4. Biogás – Teses. I. Melo, Gilberto Caldeira Bandeira de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628.4 (043)

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por ter me dado as forças, a calma e a sabedoria necessárias para a conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo César Faiçal, cuja inteligência, dedicação e presteza possibilitaram o projeto, a construção e a operação do aparato experimental utilizado na pesquisa.

Ao Professor Gilberto Caldeira, pela paciência e orientação na longa estrada trilhada até a finalização desta dissertação.

Ao Professor Carlos Chernicharo, cujos profundos conhecimentos em digestão anaeróbia foram fundamentais à realização desta pesquisa.

Ao Professor Günter Busch, idealizador do processo de digestão anaeróbia utilizado neste trabalho, cujos ensinamentos me inspiraram a chegar até aqui.

Ao pessoal da CEASAMINAS pelo imenso apoio e boa vontade para atender às demandas da pesquisa.

Ao pessoal do AMITEC, do Instituto Euvaldo Lodi – IEL, pelo indispensável apoio institucional.

Aos meus pais, Moreira e Patrícia e à minha avó Cleonice, pela compreensão nos momentos mais atribulados e pelo enorme apoio.

À minha noiva Cris, cujo suporte e compreensão me fizeram seguir em frente.

## RESUMO

A utilização de resíduos sólidos orgânicos biodegradáveis como biomassa visando à geração de energia é uma boa prática que pode ajudar a aumentar a disponibilidade de energia para a humanidade. Tais resíduos apresentam alto potencial de geração de biogás com baixa emissão de carbono para a atmosfera, podendo constituir uma interessante fonte energética alternativa. Neste trabalho foi avaliada a eficiência e a aplicabilidade de um tratamento anaeróbio de duplo estágio dos resíduos sólidos orgânicos biodegradáveis com o objetivo de aproveitar o potencial energético dos mesmos, gerando biogás e créditos de carbono. Esses resíduos foram produzidos na CEASAMINAS em seu entreposto de Contagem-MG. Para a realização do trabalho, foi construído aparato experimental complexo e automatizado, utilizando um sistema de digestão anaeróbia de duplo estágio. Tal sistema é inovador e tem a vantagem de produzir biogás de alta qualidade (>70% de CH<sub>4</sub>), possibilitando ainda o controle da produção do biogás através da variação da taxa de aplicação de DQO no reator de metanogênese ao longo do tempo. Foi avaliada também a utilização do biogás gerado para produção de energia elétrica e calor através de um motor CHP (Combined Heat Power), além dos créditos de carbono possíveis de serem obtidos com o processo. Foram realizados 4 testes de 14 dias cada, que procuraram simular os resíduos produzidos pela CEASAMINAS em 2009. Os resultados mostraram um bom funcionamento do aparato montado, sendo possível prever a produção hipotética de biogás a partir dos resíduos da CEASAMINAS. Os experimentos mostraram que é possível produzir 130,41 LBiogás.kgSV<sup>-1</sup> com um percentual médio de CH<sub>4</sub> de 73,13%. Nessas condições, verificou-se que, em média, é possível a produção anual de 536.786 kWh de energia elétrica e 1.090.299 kWh de energia térmica com os resíduos da CEASAMINAS. Com tal disponibilidade energética, a instalação de um motor CHP de 61,27 kW trabalhando 24 h.dia<sup>-1</sup> é possível, ainda com a recuperação de 124,46 kW de potência em calor gerado. Além a geração de energia, é possível a redução de 13.791,51 tCO<sub>2</sub>e em emissões de carbono em 21 anos. Tal redução ainda pode se transformar em créditos de carbono via projetos MDL.

**PALAVRAS-CHAVE:** resíduos sólidos, digestão anaeróbia de duplo estágio, biogás, crédito de carbono, geração de energia

## ABSTRACT

The use of biodegradable organic solid waste as biomass in order to generate energy is a good practice, and can help increase the availability of energy for mankind. Such wastes have a high potential for biogas generation with low carbon emissions to the atmosphere, and may constitute an interesting alternative energy source. In order to find out the energy potential of biodegradable organic solid waste produced at CEASAMINAS in its warehouse in Contagem-MG, in this study was evaluated the efficiency and applicability of a two-stage anaerobic treatment of these wastes with the production of biogas and carbon credits. To carry out the work, a complex and automated experimental apparatus was built, using a two-stage anaerobic digestion system. The digestion system used is innovative and has the advantage of producing high quality biogas (> 70% CH<sub>4</sub>) that allow the control of the biogas production by varying the application rate of COD in the methanogenic reactor over time. Another objective of the research was to evaluate the use of biogas to produce electricity and heat through a CHP engine (Combined Heat Power), and possible carbon credits to be obtained with the process. To simulate the waste produced by CEASAMINAS in 2009, 4 tests were performed every 14 days. The results showed that the apparatus worked well, enabling the prediction of the production of biogas with CEASAMINAS' waste. The experiments showed that it is possible to produce 130,41 LBiogas.kgSV<sup>-1</sup>, with an average CH<sub>4</sub> percentage of 73.13%. Under these conditions, in average, it is also possible to produce 536.786 kWh of electricity and 1.090.299 kWh of thermal energy with CEASAMINAS wastes. With such energy availability, the use of a CHP engine with 61,27 kW power working 24 h.day<sup>-1</sup> is possible, with the recovery of the equivalent power of 124,46 kW in heat. Besides generating energy, the achievement of a 13.791,51 tCO<sub>2</sub>e in carbon emission reductions in 21 years is possible, enabling such reduction to become carbon credits through CDM projects.

**KEY WORDS:** organic waste, double stage anaerobic digestion, biogas, carbon credit, energy generation

# SUMÁRIO

<i>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</i> .....	<i>i</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i> .....	<i>iii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i> .....	<i>v</i>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>5</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1. As Centrais de Abastecimento Brasileiras</b> .....	<b>6</b>
3.1.1. Histórico - A criação das CEASAs no Brasil.....	6
<b>3.2. Centrais de Abastecimento de Minas Gerais S/A - CEASAMINAS</b> .....	<b>7</b>
3.2.1. A geração de resíduos sólidos na CEASAMINAS .....	10
3.2.2. O Programa de distribuição de alimentos da CEASAMINAS - PRODAL.....	12
<b>3.3. Fundamentos da Digestão Anaeróbia</b> .....	<b>13</b>
3.3.1. Hidrólise .....	15
3.3.2. Acidogênese.....	16
3.3.3. Acetogênese .....	16
3.3.4. Metanogênese .....	17
3.3.4.1. Metanogênicas acetoclásticas.....	17
3.3.4.1. Metanogênicas hidrogenotróficas.....	18
<b>3.4. Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos Biodegradáveis através da Digestão Anaeróbia com Produção de Biogás</b> .....	<b>18</b>
3.4.1. – Breve Histórico .....	18
3.4.2. – Tipos de Digestores.....	19
3.4.3. - Aplicações .....	20
<b>3.5. O processo de digestão anaeróbia de duplo estágio</b> .....	<b>21</b>
<b>3.6. O Protocolo de Quioto e o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo)</b> .....	<b>23</b>
3.6.1. Ferramenta para o cálculo das emissões de metano evitadas pela não disposição de resíduos em aterros .....	26
3.6.2. Metodologia AMS-III-AO .....	28
3.6.3. Metodologia AMS-I-C.....	29
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1. Resumo da Metodologia Adotada no Trabalho</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2. Aparato Experimental Utilizado</b> .....	<b>32</b>

4.2.1. Sistema de Hidrólise – Primeiro Estágio .....	34
4.2.2. Reator de Metanogênese – Segundo Estágio .....	35
4.2.3. Sistema de Aquecimento e Manutenção de Temperatura do Reator de Metanogênese: .....	38
4.2.4. Tanques .....	41
Tanque de intermediário ou “buffer” .....	41
Tanque final: .....	42
4.2.5. Sistemas de Dosagem e Circulação de Soluções .....	43
Bombas Peristálticas .....	43
Motobomba de cavidade progressiva .....	44
4.2.6. Controle e Automação .....	45
4.2.7. Plataforma de Base .....	47
4.2.8. Instrumentos de Medição do Biogás Gerado .....	48
<b>4.3. Metodologia da Amostragem dos Resíduos Utilizados na Pesquisa .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4. Testes em Laboratório Realizados.....</b>	<b>56</b>
4.4.1. Protocolo de Operação dos Testes .....	58
4.4.2. Configurações do Teste 1 .....	60
4.4.3. Configurações do Teste 2.....	61
4.4.4. Configurações do Teste 3.....	62
4.4.5. Configurações do Teste 4.....	63
4.4.6. Resumo das Configurações dos Testes .....	64
<b>4.5. Cálculo da Produção de Energia .....</b>	<b>64</b>
<b>4.6. Emissões de Carbono Evitadas – Créditos de Carbono .....</b>	<b>67</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1. Medições de pH e DQO .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2. Medições de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3. Produção de Biogás e Energia .....</b>	<b>74</b>
<b>5.4. Créditos de Carbono.....</b>	<b>77</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>84</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>90</b>
<b>9.1. ANEXO I – COMPOSIÇÃO DAS SOBRAS RECEBIDAS PELO PRODAL EM 2009, COM SUA RESPECTIVA MASSA E MASSA EM SV .....</b>	<b>91</b>
<b>9.2. ANEXO II – RESULTADOS DOS TESTES.....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a.C.	Antes de Cristo;
AMS-I-C	Metodologia de pequena escala aprovada pela UNFCCC do tipo I – Projetos de Energia Renovável e ordem C – Produção de Energia Térmica com ou sem Eletricidade. ( <i>Thermal Energy Production with or without Electricity</i> );
AMS-III-AO	Metodologia de pequena escala aprovada pela UNFCCC do tipo III – Outras Metodologias e ordem AO – Recuperação de Metano Através de Digestão Anaeróbia Controlada. ( <i>Methane Recovery Through Controlled Anaerobic Digestion</i> );
CEASAs	Centrais de Abastecimento;
CEASAMINAS	Centrais de Abastecimento de Minas Gerais S/A;
CERs	Certificado de Emissões Reduzidas ( <i>Certified Emissions Reductions</i> );
CHP	Energia e calor combinados ( <i>Combined Heat Power</i> );
CH <sub>3</sub> COOH	Ácido acético;
CO <sub>2</sub> e	Dióxido de Carbono equivalente;
DQO	Demanda Química de Oxigênio;
FOB	Fração Orgânica Biodegradável
GEE	Gases de Efeito Estufa;
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento;
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;

MLP	Mercado livre do produtor;
PRODAL	Programa de distribuição de alimentos da CEASAMINAS
PVC	Policloreto de Vinila
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte;
SINAC	Sistema Nacional de Abastecimento;
SV	Sólidos Voláteis
SWDS	Aterros de resíduos sólidos ( <i>Solid Waste Disposal Sites</i> );
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas ( <i>United Nations Framework for Climate Change</i> );

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3.1 – Representação em planta da CEASAMINAS com destaque para o MLP.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3.2 – Quantidade de produtos recebida pelo PRODAL mensalmente em 2009.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.3 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia ..</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.4 – Etapas do processo de digestão anaeróbia agrupados em dois estágios.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.5 – Desenho esquemático da digestão anaeróbia de duplo estágio.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.6 - Aquecimento Global no Séc. XX. A linha negra é a temperatura observada ao longo do tempo. As demais são os resultados de modelos. As faixas representam as incertezas.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4.1 – Aparato experimental de digestão anaeróbia em processo de duplo estágio... </i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.2 – Sistema de hidrólise do aparato experimental – Primeiro Estágio.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.3 – Serpentinhas de cobre instaladas no reator de metanogênese.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.4 – Material de preenchimento do reator de metanogênese.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.5 – Aspecto final do reator de metanogênese.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.6 – Motobomba utilizada no sistema de aquecimento.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.7 – Aspecto geral do sistema de aquecimento: Reservatório intermediário de 20 L e motobomba.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.8 – Bomba peristáltica instalada no sistema (bomba 2).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.9 – Motobomba de cavidade progressiva.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.10 – Aspecto final do painel de controle e automação do aparato experimental..</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.11 – Disposição dos diversos módulos sobre a plataforma base durante a montagem final.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.12 – Medidor mássico de vazão digital e seu respectivo totalizador de gás acoplado à saída de gás do reator de metanogênese.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.13 – Analisador de gases utilizado na pesquisa.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.14 – Fluxo de descarte das sobras da CEASAMINAS.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.15 – Aparato experimental de digestão anaeróbia e esquema de funcionamento.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.16 – Batatas trituradas visando partículas com tamanho médio de 20 - 40 mm... </i>	<i>58</i>

<i>Figura 4.17 – Resíduos triturados e misturados inseridos no tanque de hidrólise.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.1 – Evolução do pH no tanque intermediário “buffer”.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.2 – Evolução da DQO no tanque intermediário “buffer”.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.3 – Evolução do pH no tanque final.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.4 – Evolução da DQO no tanque final.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.5 – Evolução do percentual de CO<sub>2</sub> no biogás.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.6 – Evolução do percentual de CH<sub>4</sub> no biogás.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.7 – Evolução do volume acumulado de CH<sub>4</sub> por kg de SV.....</i>	<i>75</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 – Volume total comercializado de produtos hortigranjeiros nas CEASAs do Brasil em 2007 .....</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 3.2 – Quantidade ofertada por produto na CEASAMINAS em 2009 .....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 3.3 – Composição gravimétrica dos resíduos gerados na CEASAMINAS .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 4.1 – Comparativo entre a massa de resíduos enviada ao aterro de Contagem-MG pela CEASAMINAS e as sobras recebidas pelo PRODAL em 2009 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 4.2 – Quantidade de sobras recebidas mensalmente pelo PRODAL em 2009 e sua respectiva massa em SV.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 4.4 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado de Agosto de 2009.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 4.5 – Quantidade e tipo das sobras recebidas pelo PRODAL em Dezembro/2009 e sua respectiva massa em SV.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 4.6 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado de Dezembro de 2009 ....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 4.7 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 1.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 4.8 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 4.9 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 3.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 4.10 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 4.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.11 – Principais configurações dos testes realizados .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 5.1 – Eficiência de tratamento do efluente pelo sistema.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 5.2 – Resultados dos testes 1 a 4 para produção de energia na forma de biogás .....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 5.3 – Parâmetros adotados para a Eq. 3.4.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 5.4 – Linha de base em emissões evitadas de metano para cada ano do projeto.....</i>	<i>79</i>

# 1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna caracteriza-se por uma dependência crescente do uso de energia, seja na forma de eletricidade ou de combustível, viabilizando a produção e a distribuição da produção econômica, além da circulação de mercadorias e pessoas. Dentro de certo limite, os indicadores de desenvolvimento social e econômico estão diretamente relacionados a elevados níveis de consumo de energia per capita.

Até o século XVIII, recursos renováveis como a água, o vento e a madeira eram as principais fontes de energia utilizadas no mundo. A partir de então, essas fontes foram gradualmente substituídas por recursos não renováveis, como o carvão mineral, o petróleo e o gás natural.

Desde o início do século XXI, a produção de energia a partir da biomassa vem emergindo como uma alternativa para o enfrentamento das questões associadas ao aumento da demanda, em bases sustentáveis, e à redução dos impactos ambientais gerados pelo modelo energético prevalente no planeta (MINAS GERAIS, 2009).

No caso do Brasil, a participação das fontes renováveis na matriz energética responde por 85% da eletricidade consumida, o que leva o país a desempenhar um papel de destaque no campo da utilização de energia renovável em nível mundial. Contudo, o emprego da bioenergia advinda da biomassa ainda é muito pequena, representando apenas 5,4% de toda a eletricidade consumida no país em 2009 (BRASIL, 2010).

Nesse sentido, esforços para o desenvolvimento de tecnologias visando ao aproveitamento de novas fontes energéticas devem ser uma preocupação brasileira, uma vez que o país possui um enorme potencial no campo das energias renováveis devido à sua extensão territorial, ao clima favorável e especialmente à grande produção de resíduos sólidos orgânicos.

Os mercados ou entrepostos atacadistas de hortigranjeiros são hoje um dos maiores geradores de resíduos sólidos orgânicos do Brasil, desperdiçando anualmente grandes quantidades de bioenergia que poderiam ser aproveitadas através da biodigestão anaeróbia desses resíduos.

Dessa forma, a CEASAMINAS, como o terceiro maior entreposto de hortigranjeiros do Brasil (CONAB, 2008a), concentra grande parte dessa bioenergia desperdiçada que poderia ser reaproveitada.

A CEASAMINAS possui alguns entrepostos integrantes do sistema de CEASAs do Brasil, sendo uma empresa de economia mista do Governo Federal sob a supervisão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Ela faz parte de um sistema de CEASAs que, em 2005, contava com 53 entrepostos em 21 estados brasileiros, comercializando uma quantidade estimada em 13,85 milhões de toneladas de frutas, legumes e vegetais anuais (CUNHA E CAMPOS, 2008).

Conforme já exposto, o entreposto de Contagem da CEASAMINAS está em terceiro lugar entre as CEASAs do Brasil (CONAB, 2008a), contando com 525 empresas instaladas e uma população flutuante média de 40.000 pessoas/dia (CEASAMINAS, 2009).

Com tamanho porte, ela concentra hoje cerca de 98% do comércio de hortigranjeiros da Região Metropolitana de Belo Horizonte e sua diversificação no setor de serviços coloca a CEASAMINAS como uma das CEASAs que oferece maior variedade de produtos no Brasil (CEASAMINAS, 2009). Registros internos da CEASAMINAS mostram que, em 2009, o entreposto de Contagem comercializou quase 2.400.000 toneladas de produtos (CEASAMINAS, 2010b).

É inequívoco inferir que, ao movimentar um enorme volume de produtos, a CEASAMINAS gera também uma grande quantidade de resíduos. Para se ter uma ideia do problema, em 2009 a CEASAMINAS destinou ao aterro de Contagem-MG cerca de 11.608 toneladas de resíduos (CEASAMINAS, 2010a) que, de acordo com UFV (1998), têm em sua composição gravimétrica 70,6% de matéria orgânica biodegradável.

Tal composição tão rica em matéria orgânica biodegradável torna os resíduos da CEASAMINAS problemáticos para aterros sanitários, porém, excelentes para o tratamento anaeróbio, uma vez que são de degradação rápida com abundante produção de biogás.

A utilização de aterros sanitários regularizados como o de Contagem-MG para destinação de resíduos sólidos orgânicos biodegradáveis é uma solução técnica aceita pela legislação e órgãos ambientais brasileiros, não sendo, porém, a que produz os melhores resultados ambientais.

Inequivocamente, uma das abordagens ambientais mais eficientes que o aterramento para o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos biodegradáveis é o tratamento biológico anaeróbio com produção de biogás.

O tratamento biológico anaeróbio pode ser uma alternativa aceitável atualmente para a estratégia de disposição, reduzindo o volume dos resíduos e podendo melhorar o condicionamento para o destino final adequado. Além disso, proporciona a recuperação do biogás produzido sem a presença de metano ( $\text{CH}_4$ ) e pode ainda ser utilizado como fonte de energia (STROOT *et al.*, 2001).

O biogás é um importante combustível alternativo ao gás natural e aos combustíveis fósseis, pois causa nenhum ou pequenos efeitos ambientais colaterais na sua produção e apresenta-se, conforme já comentado, como uma solução para a disposição adequada e mais eficiente dos resíduos sólidos orgânicos biodegradáveis.

Ademais, o biogás tem um poder calorífico que justifica a sua exploração como fonte alternativa de energia. O poder calorífico depende do percentual de metano, sendo de 11,17 kWh.Nm<sup>-3</sup> (ATKINS, 1987) no caso do metano puro.

Mais um fator favorável ao aproveitamento energético do biogás é a possibilidade de geração de créditos de carbono, sendo um crédito de carbono equivalente à redução de uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitido (tCO<sub>2</sub>e).

Com o emprego da digestão anaeróbia dos resíduos, é possível acelerar o processo que ocorreria naturalmente dentro dos aterros sanitários com a liberação de gases de efeito estufa como o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{CO}_2$ .

A diferença está no fato de que, com o processo de digestão controlado, a grande maioria dos GEE são captados e utilizados enquanto que os aterros liberam grande parte dos GEE para a atmosfera.

O aumento da concentração dos GEE como o  $\text{CO}_2$  na atmosfera fez com que a temperatura média nos registros meteorológicos subisse 0,6 °C no último século. Além disso, os 10 anos mais quentes do século XX ocorreram nos últimos 15 anos. Estudos indicam que a temperatura global continuará crescendo, causando ainda mais distúrbios climáticos. A única

maneira de contornar essa situação é a estabilização da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera (DEFRA, 2005).

Como o metano tem um potencial de aquecimento do clima 21 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, a perspectiva de não emissão de carbono pela não emissão de metano é bastante significativa, uma vez que, em tCO<sub>2</sub>e, cada tonelada de metano não emitido é multiplicada por 21.

Devido à grande quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos da CEASAMINAS, neste trabalho foi verificada a possibilidade de tratamento dos mesmos através de um inovador reator anaeróbico de duplo estágio. Essa prática permite a produção de biogás, a utilização deste gás para fins energéticos e o cálculo do carbono não emitido para a atmosfera.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1 Objetivo geral***

Avaliar, em planta piloto, a eficiência e aplicabilidade de um sistema anaeróbio de duplo estágio no tratamento da fração orgânica biodegradável dos resíduos sólidos produzidos pela CEASAMINAS.

### ***2.2 Objetivos específicos***

- Avaliar a quantidade e qualidade do biogás produzido por unidade de massa de matéria orgânica seca;
- Verificar o potencial de aproveitamento energético do biogás produzido através da possível utilização de motores CHP (Combined Heat Power);
- Verificar o potencial de geração de créditos de carbono pelo processo, tanto pela emissão evitada de CH<sub>4</sub> quanto pela substituição energética.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1. As Centrais de Abastecimento Brasileiras**

O conjunto das CEASAs brasileiras pode ser analisado como uma rede descentralizada, com cerca de 40 unidades administrativas, 53 unidades comerciais principais e outras tantas de menor porte e é a principal responsável por parcela expressiva do abastecimento alimentar da população urbana brasileira.

Segundo CONAB (2008a), o sistema de CEASAs movimentou, em 2007, cerca de 15,5 milhões de toneladas de produtos hortigranjeiros atingindo movimentação financeira que superou a casa dos US\$ 10 bilhões anuais. Tal valor, considerados os demais produtos e serviços comercializados, é superior ao das vendas das duas principais redes varejistas brasileiras somadas (CUNHA E CAMPOS, 2008).

O sistema é ainda responsável pela qualidade e, sobretudo, pelo processo de formação de preços no mercado hortigranjeiro.

##### **3.1.1. Histórico - A criação das CEASAs no Brasil**

No início da década de 1970, os mecanismos de comercialização de hortigranjeiros no Brasil passavam por um processo de estrangulamento por conta, sobretudo, da precariedade dos equipamentos disponíveis e da falta de regulamentação para o setor. Tratava-se de uma atividade praticamente marginal, tão marginal que a comercialização se dava na rua, ocasionando perdas enormes pelo fato de os produtos ficarem ao relento (CONAB, 2008b).

Para a solução do problema, foi implementado a partir da década de 1970 o modelo institucional das Centrais de Abastecimento brasileiras, desenvolvido em uma perspectiva sistêmica, com a constituição do Sistema Nacional de Abastecimento (SINAC).

Inspirado e assessorado pelo modelo espanhol (Mercasa), o SINAC tinha como proposta inicial o estabelecimento de uma rede de informações técnicas entre todas as unidades atacadistas regionais para servir como ponto de referência aos negócios entre produtores e distribuidores, propiciando o melhor ponto de equilíbrio da oferta e dos preços (CUNHA, 2006).

Em articulação com os estados e municípios, foram implantados no âmbito do SINAC 21 empresas denominadas de Centrais de Abastecimento, as CEASAs, incluindo 34 Mercados Atacadistas Urbanos, 32 Mercados Atacadistas Rurais e diversos mercados varejistas de portes variados, em centros urbanos de médio e grande porte.

De acordo com Cunha e Campos (2008), em 2005 o conjunto de CEASAs originárias do SINAC contava com 53 entrepostos em 21 estados brasileiros, comercializando uma quantidade estimada em 13,85 milhões de toneladas de frutas, legumes e vegetais anuais. Tal cifra, apenas para efeito de comparação, é expressivamente superior à verificada em países como França (5 milhões de toneladas) e Espanha (5,5 milhões de toneladas).

Trata-se de um volume extremamente significativo, que em 2007 já havia aumentado para 15,47 milhões de toneladas de produtos comercializados conforme exposto na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Volume total comercializado de produtos hortigranjeiros nas CEASAs do Brasil em 2007

Ordem	UF	Unidade	Quantidade (t)	Participação	Acumulado
1	<b>SP</b>	São Paulo	2.957,10	20,5%	20,5%
2	<b>RJ</b>	Rio de Janeiro	1.599,40	11,3%	31,8%
3	<b>MG</b>	Contagem	1.369,30	9,4%	41,2%
4	<b>BA</b>	Juazeiro	859,70	5,5%	46,7%
5	<b>PE</b>	Recife	840,00	5,2%	51,9%
<b>Outros</b>			<b>7.851,60</b>	<b>48,1%</b>	<b>48,1%</b>
<b>Total</b>			<b>15477,10</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: CONAB (2008a)

### **3.2. Centrais de Abastecimento de Minas Gerais S/A - CEASAMINAS**

A CEASAMINAS é uma empresa de economia mista do Governo Federal, sob a supervisão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Constituída por meio da Lei nº 5.577, de 20 de outubro de 1970, a empresa entrou em operação em 28/02/1974 (CEASAMINAS, 2011).

Ainda em 1974, foi publicado o Decreto Estadual 16.584/74 de proteção do perímetro, que definia, entre outros, que o comércio atacadista de hortigranjeiros da Região Metropolitana de

Belo Horizonte (RMBH) apenas poderia acontecer dentro das dependências do entreposto de Contagem-MG da CEASAMINAS (CEASAMINAS, 2007).

Não obstante a assinatura do Decreto e as facilidades oferecidas, entre elas lojas de bom tamanho, espaço de movimentação de carga e tarifas de custo razoável, as empresas maiores da época que possuíam instalações próprias nos mercados da capital começaram a exercer uma forte resistência a se transferir para o entreposto.

No final de 1975, por influência e com a intermediação do judiciário, a direção da CEASAMINAS chega a uma solução consensual com as empresas ainda resistentes à mudança. Em abril de 1976, todas as empresas atacadistas de hortigranjeiros passam a operar dentro das dependências do entreposto de Contagem-MG (CEASAMINAS, 2007).

A partir de 1980, teve início o processo de transferência, de Belo Horizonte para o entreposto, do comércio atacadista de cereais e produtos alimentícios e não alimentícios industrializados como rações, concentrados, fertilizantes, defensivos, implementos agrícolas, embalagens, produtos de higiene e limpeza.

Hoje, a CEASAMINAS possui e administra diretamente o entreposto da Grande Belo Horizonte, localizado no município de Contagem-MG, além de outros cinco instalados nos municípios de Uberlândia, Juiz de Fora, Barbacena, Governador Valadares e Caratinga (CEASAMINAS, 2011).

O mercado atacadista de gêneros alimentícios de Minas Gerais é um dos principais do país e grande parte está concentrada nas dependências da Unidade Grande BH da CEASAMINAS. Esse entreposto reuniu, inicialmente, o comércio atacadista de hortigranjeiros da Grande BH e promoveu significativa melhoria no comércio e abastecimento destes produtos.

De acordo com CEASAMINAS (2009), atualmente, o entreposto de Contagem-MG possui área total de 2.286.000 m<sup>2</sup>, sendo 1.163.006 m<sup>2</sup> de área urbanizada de 257.737 m<sup>2</sup> de área construída. Conta com 525 empresas instaladas e possui uma população flutuante média de 40.000 pessoas/dia.

Com tamanho porte, concentra hoje cerca de 98% do comércio de hortigranjeiros da Região Metropolitana de Belo Horizonte e sua diversificação no setor de serviços transformou a CEASAMINAS em uma das mais diversificadas do mundo (CEASAMINAS, 2009).

Visando facilitar a procura por produtos, a CEASAMINAS é dividida em seis setores, destacando-se o MLP (Mercado Livre do Produtor), conforme mostrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1** – Representação em planta da CEASAMINAS com destaque para o MLP

**Fonte:** CEASAMINAS (2010c)

No pavilhão do MLP circulado em vermelho na Figura 3.1, com uma área de 20 mil metros quadrados, mais de 10 mil agricultores se revezam por ano em média de acordo com a safra dos seus produtos, comercializando hortigranjeiros diretamente aos varejistas. O MLP, portanto, constitui o principal pavilhão da CEASAMINAS (CEASAMINAS, 2009).

Tal entreposto é hoje o terceiro maior do Brasil em volume de produtos comercializados (CONAB, 2008a), tendo um papel determinante no abastecimento regional de Minas Gerais, em especial da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

A fim de acompanhar a comercialização diária de produtos, a CEASAMINAS mantém o registro de toda mercadoria que adentra os seus portões, realizando um acompanhamento da quantidade ofertada por item.

Conforme se verifica na Tabela 3.2, em 2009 a CEASAMINAS comercializou quase 2.400.000 toneladas de produtos, posicionando-se em terceiro lugar entre as CEASAs do Brasil.

**Tabela 3.2** – Quantidade ofertada por produto na CEASAMINAS em 2009

<b>Produto</b>		<b>Quantidade Comercializada (t)</b>
Hortaliças	Folha, Flor e Haste	51.540
	Frutos	276.344
	Raiz, Bulbos, Tubérculos e Rizomas	394.474
Frutas	Brasileiras	609.685
	Importadas	19.759
Granjeiros	Aves	2
	Ovos	64.266
Produtos Diversos	Cereais	103.521
	Alimentícios	682.880
	Não Alimentícios Especiais	553
	Não Alimentícios	145.573
	Combustíveis	7.775
<b>TOTAL COMERCIALIZADO</b>		<b>2.356.372</b>

**Fonte:** Adaptado de CEASAMINAS (2010b)

Com uma movimentação de produtos tão expressiva, a CEASAMINAS gera uma grande quantidade de resíduos advindos de sua operação, que são caracterizados no próximo item deste trabalho.

### **3.2.1. A geração de resíduos sólidos na CEASAMINAS**

Na atualidade, um dos principais problemas que causa grande degradação ambiental é a disposição inadequada dos resíduos sólidos, ou lixo. No Brasil, poucas cidades dispõem de aterros sanitários apropriados e raríssimas são as que possuem usinas de tratamento.

Para se tomar o exemplo de Minas Gerais, de acordo com dados estatísticos do Programa Minas Sem Lixões da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), em 2010 o Estado

ainda contava com 312 lixões e apenas 60 aterros sanitários regularizados para um total de 853 municípios (FEAM, 2011).

É um problema complexo que deve ser abordado de forma objetiva, iniciando-se, preferencialmente, com o reaproveitamento dos resíduos gerados antes dos mesmos serem enviados aos aterros ou lixões.

Conforme já abordado no item anterior, a CEASAMINAS movimenta um enorme volume de produtos que geram grande quantidade de resíduos compostos, em sua maioria, por resíduos sólidos orgânicos biodegradáveis.

Em 1998, em conjunto com a Universidade Federal de Viçosa, foi realizado estudo para verificação da composição gravimétrica dos resíduos da CEASAMINAS. A Tabela 3.3 mostra que 70,6% dos resíduos gerados no entreposto eram compostos de matéria orgânica biodegradável.

**Tabela 3.3** – Composição gravimétrica dos resíduos gerados na CEASAMINAS

<b>Composição</b>	<b>% em Peso</b>
Matéria Orgânica Biodegradável	70,6
Madeira	10,7
Papelão	9,9
Plástico	4,0
Entulho	2,3
Vidro	0,7
Metais	0,5
Materiais Não Classificáveis	0,8
Outros Materiais	0,5

**Fonte:** UFV (1998)

Conforme CEASAMINAS (2010a), em 2009 foram enviados ao aterro sanitário do município de Contagem-MG 11.608 toneladas de resíduos. O envio de resíduos aos aterros sanitários é uma solução aceita pela legislação e órgãos ambientais brasileiros, não sendo, porém, a que produz os melhores resultados ambientais.

Como se trata principalmente de resíduo sólido orgânico biodegradável, o tratamento dos resíduos da CEASAMINAS através do tratamento biológico anaeróbio para a produção de

biogás pode constituir-se em uma ótima alternativa para diminuir impactos ambientais e gerar ganhos econômicos.

### **3.2.2. O Programa de distribuição de alimentos da CEASAMINAS - PRODAL**

O PRODAL é um programa de reaproveitamento de alimentos que recebe produtos sem valor comercial oriundos de doações advindas dos produtores e as distribui a instituições filantrópicas cadastradas, mantendo controle diário detalhado da quantidade e tipo de produtos que recebe.

Tem por objetivo reduzir o desperdício de alimentos na CEASAMINAS, mediante a doação de excedentes de alimentos não comercializados no entreposto. O PRODAL tem uma importante função, pois permite que os produtores e comerciantes racionalizem seu estoque e fluxo logístico.

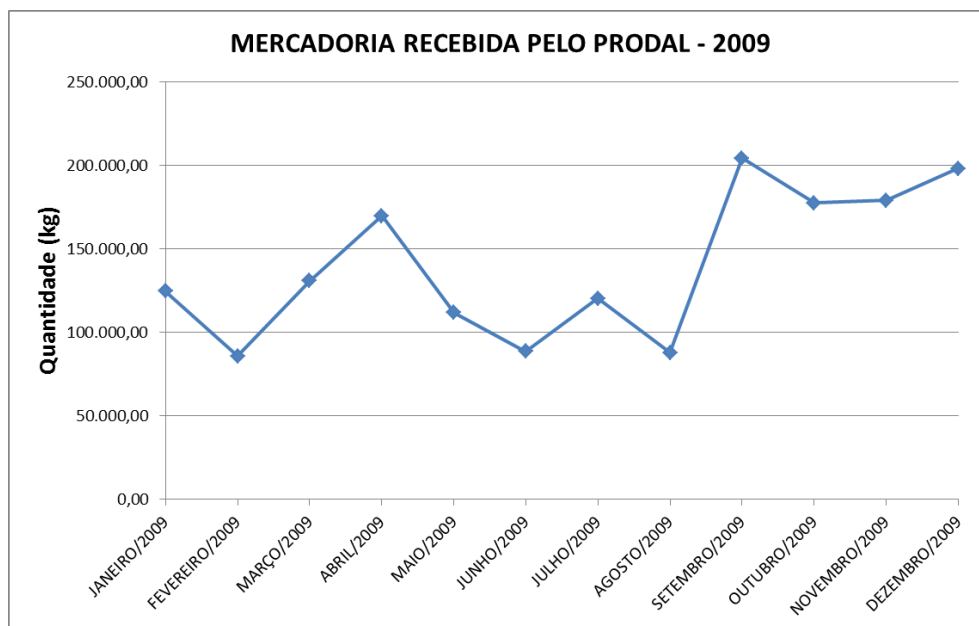
Ao destinar para o PRODAL produtos que tenham condições de consumo, mas que já não tenham tanto valor comercial, os comerciantes e produtores giram seus estoques, evitam perdas e desperdícios e diminuem gastos de estocagem. O programa funciona como uma central de recepção do excedente de alimentos não comercializados, fazendo o repasse para os bancos de alimentos, que se encarregam de buscar os alimentos e distribuí-los para as instituições sociais.

O PRODAL mantém controle diário detalhado da quantidade e tipo de produtos que recebe, servindo de excelente fonte de dados a pesquisa em tela. A Figura 3.2 mostra a quantidade de produtos recebidos mensalmente, em massa, pelo PRODAL durante o ano de 2009.

Verifica-se, portanto, uma grande variação da quantidade de produtos recebidos pelo PRODAL ao longo do ano. Tal situação se dá pelo fato de os produtos comercializados na CEASAMINAS serem majoritariamente perecíveis, com oferta variável conforme a época do ano. Determinados tipos de produtos, característicos de algumas épocas do ano, são mais suscetíveis a perdas causando as variações verificadas na Figura 3.2.

Os dados de entrada de mercadorias no PRODAL são valiosos uma vez que se pode, com razoável margem de acerto, prever a composição do resíduo orgânico biodegradável que é

descartado no aterro de Contagem-MG pela CEASAMINAS através da composição dos produtos que são recebidos pelo programa.



**Figura 3.2** – Quantidade de produtos recebida pelo PRODAL mensalmente em 2009

**Fonte:** CEASAMINAS (2010d)

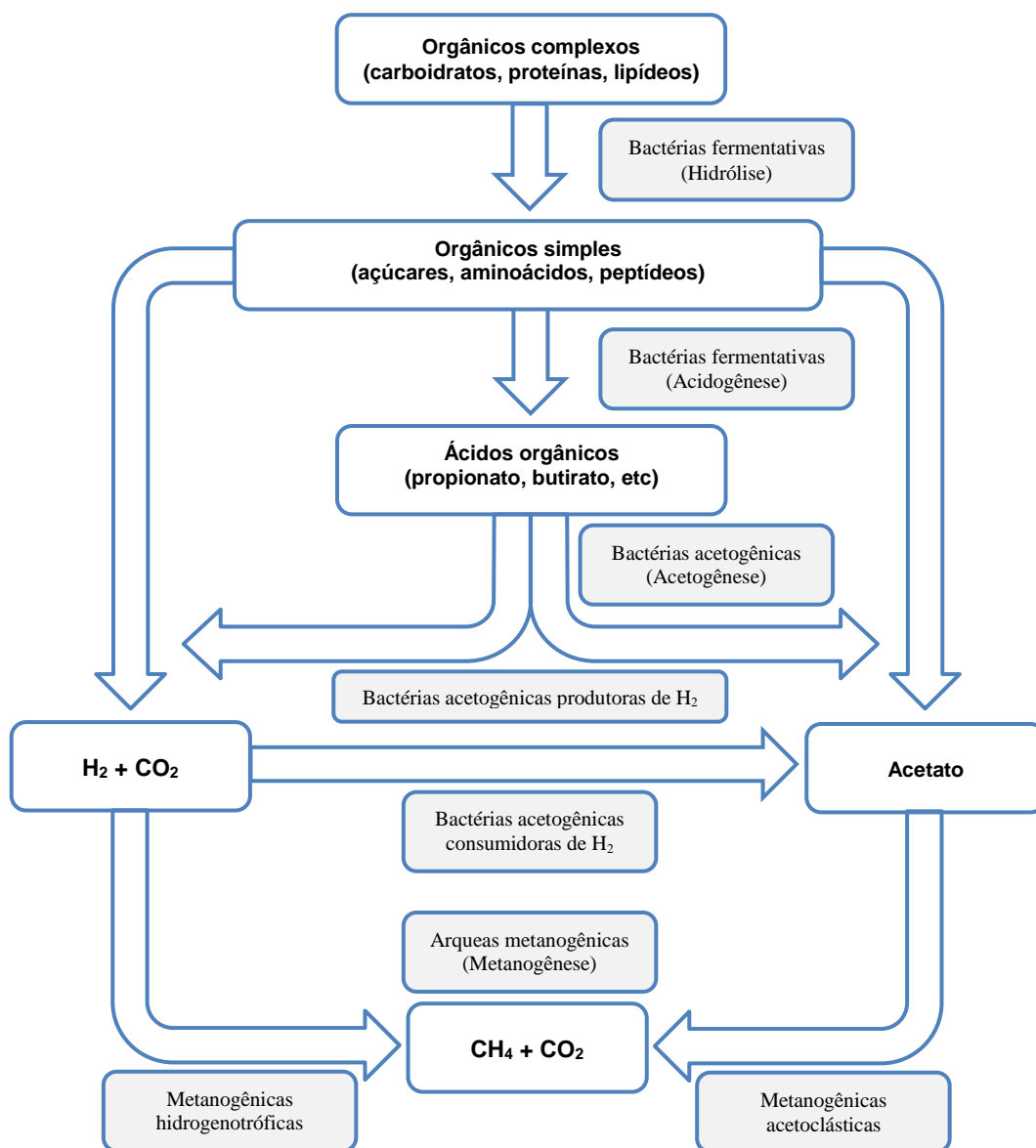
### **3.3. Fundamentos da Digestão Anaeróbia**

Ainda há muito que ser feito, mas o desenvolvimento do conhecimento sobre a digestão anaeróbia é um dos mais promissores no campo da biotecnologia, uma vez que é fundamental para promover, com grande eficiência, a degradação dos resíduos orgânicos que são gerados em grandes quantidades nas modernas atividades rurais e industriais.

A biodigestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio molecular livre, no qual diversas espécies de microrganismos interagem para converter compostos orgânicos complexos em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

Tal processo protagoniza importante papel, pois, além de permitir a redução significativa do potencial poluidor, é possível com ele a recuperação de energia na forma de biogás e o tratamento do efluente gerado (FISCHER *et al.*, 1979; LUCAS JÚNIOR, 1998).

O processo de digestão anaeróbia pode ser subdividido em várias rotas metabólicas, com a participação de diversos grupos microbianos, cada um com um comportamento fisiológico diferente (CHERNICHARO, 1997), conforme ilustrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia

**Fonte:** CHERNICHARO (1997)

Conforme Gomes (2006), algumas etapas do processo são bem caracterizadas, sobretudo com relação aos grupos de microrganismos responsáveis por realizá-las. São três os principais grupos de microrganismos que participam da digestão anaeróbia:

- Bactérias fermentativas: transformam, por hidrólise, os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos, como a glicose;
- Bactérias acetogênicas: produtoras de hidrogênio, as quais convertem os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Arqueas metanogênicas: são divididas em dois diferentes grupos. Um grupo utiliza o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono, enquanto o outro produz metano através da redução de dióxido de carbono.

O processo de digestão anaeróbia pode ser simplificado considerado como de quatro etapas, que são: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

### 3.3.1. Hidrólise

Na fase de hidrólise, os compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídeos particulados necessitam ser convertidos em materiais dissolvidos mais simples, a fim de possibilitar a penetração das paredes celulares das bactérias fermentativas.

Essa conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é realizada através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (CHERNICHARO, 1997), sendo o passo limitante do processo quando o substrato está na forma particulada (BERNARD, 2006).

Dentre os gêneros de bactérias com capacidade hidrolítica no processo de digestão anaeróbia destacam-se (CHERNICHARO, 1997):

- *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus*, que são gêneros produtores de lipases, para degradação de lipídeos a ácidos graxos;
- *Bacteroides*, *Butyvirio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Proteus*, *Peptococcus* e *Bacillus*, que são gêneros produtores de proteases, para degradação de proteínas e aminoácidos;
- *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Acetivirio*, *Eubacterium*, que são gêneros produtores de amilases, para degradação de polissacarídeos a açúcares menores.

A velocidade da hidrólise se dá em função de fatores como o pH, temperatura, composição e tamanho das partículas do substrato bem como as concentrações dos produtos intermediários do processo (BOUALLAGUI *et al*, 2004).

### **3.3.2. Acidogênese**

É o estágio denominado de fase ácida, devido à grande quantidade de ácidos formados além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas (GOMES, 2006).

Substâncias solúveis, incluindo as produzidas na fase de hidrólise, são convertidas em ácidos orgânicos, álcoois, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio além de novas células bacterianas na fase acidogênica.

Esses organismos compreendem uma grande variedade de gêneros bacterianos contendo entre eles: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia* (CHERNICHARO, 1997).

Tal variedade de gêneros bacterianos é formada tanto por bactérias anaeróbias obrigatórias quanto facultativas, sendo a acidogênese quase sempre o passo mais rápido da conversão anaeróbia de matéria orgânica complexa (BERNARD, 2006).

Os organismos acidogênicos preferem um ambiente levemente ácido (pH 4.5 - 5.5) e são menos sensíveis a mudanças repentinas no substrato (OSTREM, 2004).

### **3.3.3. Acetogênese**

Os produtos da fase acidogênica servem de substrato para as bactérias da fase acetogênica. Os produtos da fase acetogênicas variam com o tipo de bactéria e condições do meio, como o pH e temperatura (BERNARD, 2006).

Em uma digestão anaeróbia estável, as bactérias produtoras de acetato e hidrogênio transformam os produtos da acidogênese em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (BERNARD, 2006). Tais bactérias são chamadas de bactérias sintróficas acetogênicas, e são

assim denominadas porque a sua existência depende da atividade de organismos consumidores de hidrogênio (CHERNICHARO, 1997).

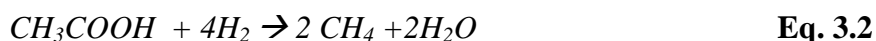
Tal situação se deve ao fato de as bactérias acetogênicas serem produtoras obrigatórias de hidrogênio. A formação de acetato pela oxidação de ácidos orgânicos (ex: propionato e butirato) não ocorre naturalmente, sendo apenas possível termodinamicamente com uma baixa concentração de hidrogênio dissolvido e acetato.

As bactérias acetogênicas e metanogênicas, portanto, vivem em simbiose. As arqueas metanogênicas apenas sobrevivem com concentrações mais altas de hidrogênio dissolvido e acetato disponível. Elas constantemente removem os produtos do metabolismo das bactérias acetogênicas mantendo a concentração de hidrogênio dissolvido em níveis baixos, favoráveis às bactérias acetogênicas (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

### 3.3.4. Metanogênese

Na metanogênese, a formação de metano se dá em condições anaeróbias estritas (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008), atuando microrganismos denominados microrganismos metanogênicos, classificados como dentro do domínio *archaea*, um grupo verdadeiramente reconhecido como distinto das bactérias típicas (CHERNICHARO, 1997).

A produção de metano através do acetato ou pela redução do dióxido de carbono pelas arqueas metanogênicas acetoclásticas ou hidrogenotróficas se dá de acordo com as seguintes reações (PENA-VARO, 2002):



#### 3.3.4.1. Metanogênicas acetoclásticas

Embora poucas espécies de metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato, as metanogênicas acetoclásticas são responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano (CHERNICHARO, 1997).

Os organismos metanogênicos acetoclásticos mais comuns encontrados na digestão anaeróbia são do gênero *methanosarcina* e *methanosaeta*. O gênero *methanosaeta* possui forma de filamentos, caracterizando-se por utilizar exclusivamente o acetato (CHERNICHARO, 1997). As *methanosarcina* se desenvolvem na forma de cocos, sendo os organismos dominantes da metanogênese (BERNARD, 2006).

#### 3.3.4.1. Metanogênicas hidrogenotróficas

Ao contrário das acetoclásticas, praticamente todas as espécies conhecidas de arqueas metanogênicas são capazes de produzir metano a partir do hidrogênio e gás carbônico, resultando em uma maior liberação de energia. Os gêneros mais frequentemente isolados em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter*, *Methanoculleus* e *Methanocorpusculum* (CHERNICHARO, 1997).

As metanogênicas utilizadoras de hidrogênio ajudam a manter baixas concentrações de hidrogênio, necessárias à conversão dos ácidos orgânicos e álcoois a acetato pelas bactérias acetogênicas.

Há uma relação sinérgica entre produtores e utilizadores de hidrogênio com uma pequena variação na concentração de hidrogênio, podendo acarretar mudanças nos produtos formados na fase ácida. À medida que a concentração de H<sub>2</sub> aumenta, a oxidação de H<sub>2</sub> se torna termodinamicamente mais favorável que a degradação do acetato, ocorrendo um aumento na concentração do mesmo (BERNARD, 2006).

### **3.4. Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos Biodegradáveis através da Digestão Anaeróbia com Produção de Biogás**

#### **3.4.1. – Breve Histórico**

O emprego dos processos anaeróbios remonta a épocas anteriores ao Império Romano e, desde então, tem-se utilizado disso para diversos fins, principalmente para tratar resíduos que apresentam elevada carga orgânica.

Registros históricos demonstram que por volta de 3.000 a.C., os Sumérios já praticavam a digestão anaeróbia visando a tratar seus esgotos. Em 1776, Alessandro Volta coletou pessoalmente gás do lago Como, na Itália, para exame. Suas experiências mostraram que a

formação do gás dependia de um processo de fermentação (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Na segunda metade do século XIX, pesquisas realmente científicas e profundas foram iniciadas na França para a melhor compreensão do processo de fermentação anaeróbia.

Louis Pasteur tentou, em 1884, produzir biogás utilizando estrume de cavalos e conseguiu produzir cerca de 100 L de metano através da fermentação de 1 m<sup>3</sup> deste material a 35° C. Pasteur argumentou que essa taxa de produção seria suficiente para cobrir a demanda energética de iluminação das ruas de Paris (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Tal iniciativa inaugurou a utilização do biogás produzido através da digestão anaeróbia como fonte alternativa de energia para diversos fins.

### **3.4.2. – Tipos de Digestores**

Os sistemas de digestão anaeróbia podem ser configurados basicamente com diferentes níveis de complexidade: de estágio único ou de duplo estágio.

No sistema de estágio único, todas as reações biológicas ocorrem em um único reator. A utilização de reatores de um estágio reduz o custo de construção, porém, restringe o nível de controle das reações que ocorrem no sistema. As bactérias acidogênicas, através da produção de ácidos, reduzem o pH do reator. As bactérias metanogênicas, como já mencionado, operam em uma faixa de pH bem limitada. Portanto, as reações biológicas advindas de diferentes espécies em um reator de estágio único podem estar em competição direta, uma vez que os valores ótimos de pH são diferentes.

O processo de estágio único ainda é sensível à superprodução de ácidos orgânicos, deixando a capacidade do mesmo, neste caso, abaixo do máximo em termos de geração de gás por causa de uma possível acidificação.

Conforme Busch *et al.* (2008), em um sistema de digestão de duplo estágio o processo de digestão é dividido em dois passos para se obter um maior controle das comunidades de bactérias presentes nos digestores. As bactérias acidogênicas produzem ácidos orgânicos e crescem mais rapidamente do que as bactérias metanogênicas que, por outro lado, requerem temperatura e pH estáveis para otimização da performance do sistema.

Em reatores desse tipo, a hidrólise e a acidogênese ocorrem no primeiro estágio da digestão com a acetogênese e a metanogênese ocorrendo no segundo.

### **3.4.3. - Aplicações**

Resíduos de frutas e vegetais são produzidos em grandes quantidades no mundo, e constituem uma fonte de problemas aos aterros sanitários por causa de sua alta degradabilidade e produção de biogás.

Devido à alta degradabilidade, a digestão anaeróbia é uma excelente forma de tratar este tipo de resíduos com a digestão da matéria orgânica. A principal vantagem desse processo é a produção do biogás, que pode ser utilizado para a produção de energia.

Além disso, os rejeitos do processo de digestão anaeróbia (lodo e efluente líquido) podem se tornar valiosos, na medida em que podem ser utilizados como excelentes condicionadores de solo para agricultura após tratamentos simplificados (BOUALLAGUI *et al*, 2004).

Em princípio, todo o resíduo sólido orgânico quer seja de origem animal ou vegetal, pode ser bioestabilizado anaerobiamente. Até então, no Brasil o processo anaeróbio tem sido utilizado para bioestabilizar lodo de esgoto sanitário e efluentes líquidos com elevada demanda bioquímica de oxigênio e, em alguns casos específicos, resíduos sólidos de origem rural (LEITE *et al*, 2003).

No entanto, já existem no mundo várias plantas que objetivam o tratamento anaeróbio de resíduos sólidos biodegradáveis em geral, com o aproveitamento energético do biogás produzido.

Conforme Deublein & Steinhauser (2008), em 2006 existiam na Alemanha cerca de 3500 plantas que produziam biogás e eletricidade a partir da biodigestão anaeróbia de biomassa, com uma potência instalada de 900 MW.

O exemplo alemão sugere que o reaproveitamento energético do biogás produzido através da biodigestão anaeróbia é possível e sua utilização deve ser incentivada em países como o Brasil, que é rico em biomassa.

### 3.5. O processo de digestão anaeróbia de duplo estágio

Conforme já visto, a digestão anaeróbia é um processo complexo, que pode ser dividido em quatro etapas de degradação chamadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Cada etapa mencionada ocorre pela ação de diversos grupos de microrganismos, que trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com Busch *et al.* (2008), cada etapa da digestão anaeróbia possui parâmetros ótimos de funcionamento, sendo interessante agrupar os passos com parâmetros similares em um estágio particular do processo. As etapas de hidrólise e acidogênese funcionam melhor em condições ácidas e combinadas formam o primeiro estágio. A acetogênese e metanogênese funcionam melhor em um ambiente neutro e formam o segundo estágio. A Figura 3.4 demonstra a situação citada.

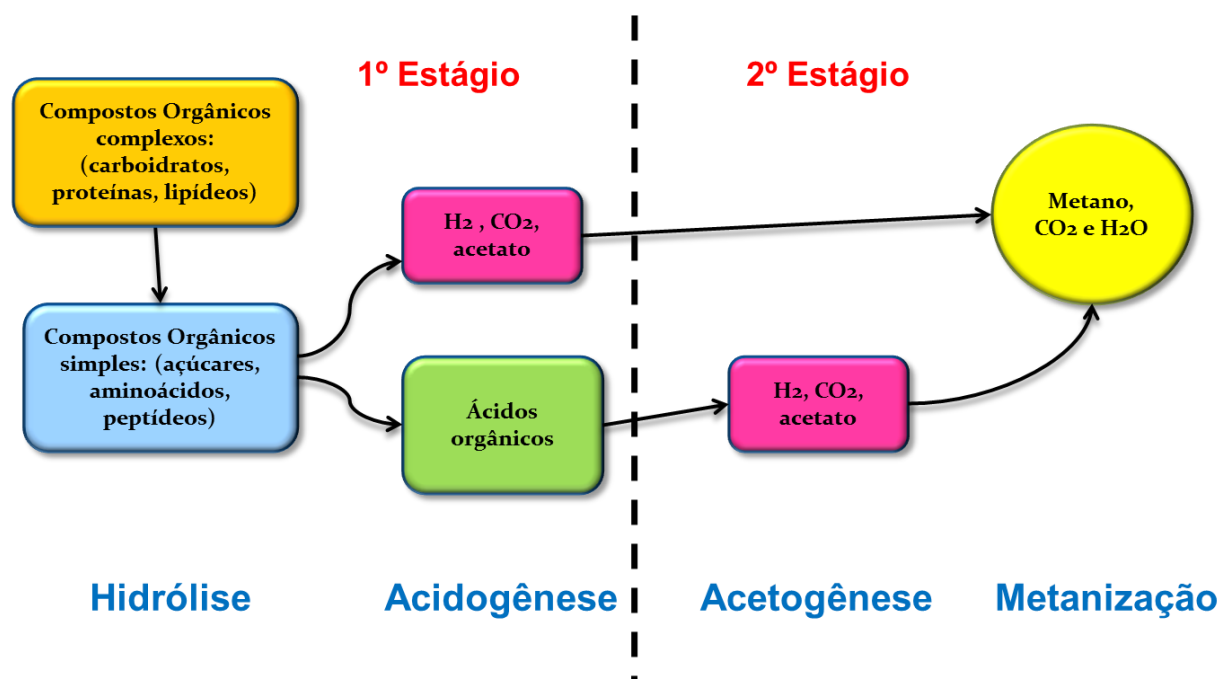


Figura 3.4 – Etapas do processo de digestão anaeróbia agrupados em dois estágios

Fonte: Adaptado de Bernard (2006)

A utilização do processo anaeróbio em dois estágios pode propiciar melhor desempenho na remoção de sólidos suspensos orgânicos, incrementando a hidrólise no primeiro reator, e

conferindo maior estabilidade ao sistema de tratamento, alcançando altas eficiências de remoção de matéria orgânica e de produção de metano (SANTANA, 2007).

Dada a informação acima, o processo de biodigestão anaeróbia em questão é dividido em dois estágios, um em leito seco e outro em leito úmido, que fazem com que a digestão funcione mais eficientemente. A Figura 3.5 mostra um desenho esquemático do processo. É um sistema baseado em uma técnica simples de decomposição de substrato orgânico biodegradável em bateladas, que permite o controle do fluxo de DQO do primeiro para o segundo estágio, visando à produção de biogás de acordo com a demanda (BTU, 2006).

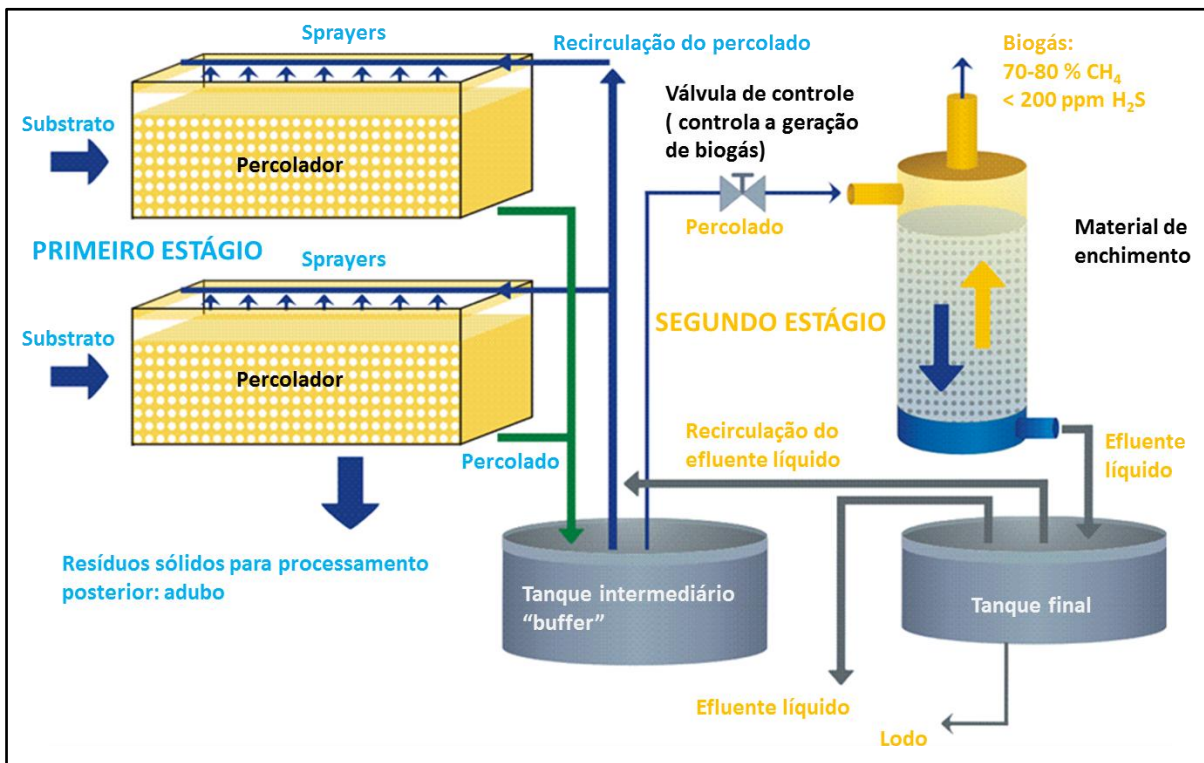
No primeiro estágio (hidrólise e acidogênese), ocorre a reação enzimática e microbiológica para a conversão do substrato constituído de materiais sólidos biológicos para uma variedade de substâncias orgânicas solúveis em água e resíduos sólidos utilizáveis como adubo. No segundo estágio (acetogênese e metanogênese), as substâncias orgânicas produzidas no primeiro estágio são convertidas em biogás e biomassa, esta última também utilizável como adubo após o descarte periódico.

Para a hidrólise do substrato sólido (leito fixo) inserido no primeiro estágio, um sistema de percolação em ciclo fechado é utilizado. O líquido (percolado ou hidrolisado) percola o leito fixo em recirculação, a uma temperatura de cerca de 30° C, até a mais completa exaustão possível da matéria orgânica presente.

A operação em recirculação permite o aumento do tempo de contato entre o substrato e as bactérias fermentativas, agilizando o estágio ácido do processo (hidrólise + acidogênese).

Após a recirculação do percolado pelo substrato, obtém-se um efluente hidrolisado, presente no tanque pulmão “buffer” de hidrolisados. O hidrolisado produzido no primeiro estágio, praticamente livre de matéria sólida, é aplicado aos poucos em taxa constante à etapa de metanogênese (segundo estágio), onde a matéria orgânica hidrolisada é convertida em biogás.

Visando aumentar a área de contato do hidrolisado com as bactérias, no reator de metanogênese as mesmas são cultivadas em um biofilme ao redor de peças de plástico. Nenhum processo de agitação é necessário e a maior parte do líquido descartado do reator de metanogênese é reciclado como água de processo, mantendo os nutrientes e melhorando a performance do sistema.



**Figura 3.5** – Desenho esquemático da digestão anaeróbia de duplo estágio

**Fonte:** Adaptado de Busch et al. (2008).

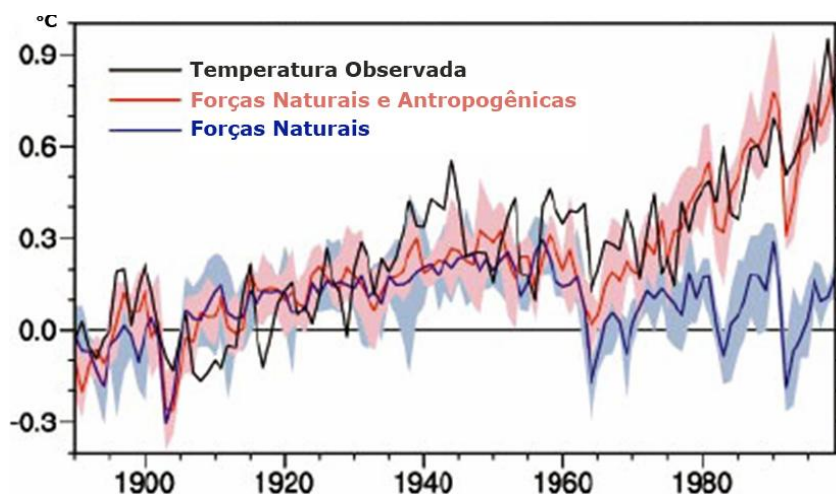
O efluente líquido excedente e o lodo extraído do tanque final são efluentes e resíduos finais a serem destinados adequadamente.

### **3.6. O Protocolo de Quioto e o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo)**

O efeito estufa é o processo que torna a temperatura da Terra superior ao que seria na ausência de gases de efeito estufa. Sem ele, a temperatura média da Terra deixaria de ser +15°C e seria em torno de -18°C, tornando a vida como conhecemos hoje ameaçada. Diversos gases causam o efeito estufa, porém, os principais GEE são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (IPCC, 2006).

Conforme mostrado na Figura 3.6, o aumento da concentração dos GEE na atmosfera fez com que a temperatura média nos registros meteorológicos subisse 0,6 °C no último século. Além disso, os 10 anos mais quentes do século XX ocorreram nos últimos 15 anos. Estudos indicam que a temperatura global continuará crescendo, causando ainda mais distúrbios climáticos. A

única maneira de contornar essa situação é através da estabilização da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera (DEFRA, 2005).



**Figura 3.6** - Aquecimento Global no Séc. XX. A linha negra é a temperatura observada ao longo do tempo. As demais são os resultados de modelos. As faixas representam as incertezas.

**Fonte:** (MEEHL *et al.*, 2004)

Atualmente se discute muito sobre o agravamento do efeito estufa e o consequente aquecimento global. Existe um consenso em torno da influência negativa das atividades antropogênicas a esse respeito. O estado da arte em termos de conhecimento em torno das mudanças climáticas indica ser muito alto o nível de confiança (chance de 9 entre 10 de ser verdade) que a média global líquida dos efeitos das atividades humanas desde 1750 é de aquecimento para a atmosfera (IPCC, 2007).

Existem, porém, correntes contrárias, que defendem que o aquecimento global é fruto da ação do tempo geológico e parte da dinâmica natural da Terra. De modo conservador, o mais sensato é, segundo Eerola (2003), tomar atitudes que possam reduzir a possibilidade de efeitos antropogênicos ao clima, em vez de simplesmente continuar emitindo gases de efeito estufa sem restrições e esperar pelos resultados.

Nesse sentido, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (United Nations Framework for Climate Change - UNFCCC), adotada durante a Conferência Rio-92, foi um passo importante dado pela comunidade internacional para atingir o objetivo de estabilizar as concentrações de GEEs (Gases de Efeito Estufa) na atmosfera em um nível que

impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Essa Convenção não determina como atingir esse objetivo, mas estabelece mecanismos que possibilitam negociações em torno dos instrumentos necessários para que ele seja alcançado (MOREIRA E GIOMETTI, 2008).

Assim, em 1997, 165 nações assinaram o Protocolo de Quioto, que prevê a redução das emissões de GEE em pelo menos 5,2% dos níveis de 1990 para o período compreendido entre 2008 e 2012. Os países foram divididos em duas listas: o Anexo I (países desenvolvidos e em transição que possuem metas de redução) e o não-Anexo I (países em desenvolvimento sem metas de redução).

Para que o Protocolo entrasse em vigor era necessário um número mínimo de signatários que, somados, garantissem uma porcentagem de emissões de GEE pré-estabelecida, o que só aconteceu em 16 de fevereiro de 2005 (BITTENCOURT, 2007).

Um dos mecanismos de redução de emissões propostos é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o único que permite a participação de países não-Anexo I em cooperação com países Anexo I. O objetivo da redução das emissões pode ser atingido, assim, por meio da implementação de atividades de projetos nos países não-Anexo I que resultem na redução das emissões de GEEs ou no aumento da remoção de CO<sub>2</sub>, mediante investimentos em tecnologias mais eficientes, substituição de fontes de energia fósseis por renováveis, racionalização do uso da energia, florestamento e reflorestamento, entre outros (LOPES, 2002).

Tais atividades implementadas possibilitam a emissão dos Certificados de Redução de Emissões (CERs – *Certified Emission Reductions*), que podem então ser comercializados nos países pertencentes ao Anexo I do protocolo.

Com o MDL espera-se também a geração de investimentos nos países em desenvolvimento, bem como transferência de tecnologia e desenvolvimento sustentável (BITTENCOURT, 2007)

Para o Brasil em especial, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo pode ser muito interessante, já que aproveita um grande potencial brasileiro para a produção de energia limpa e possibilita que o país desempenhe papel importante no contexto ambiental internacional (VIDAL, 2003).

Para o cálculo dos CERs, é necessária a utilização de metodologias e ferramentas aprovadas pela UNFCCC, que no caso deste trabalho se referem às emissões evitadas de aterros pela não disposição de resíduos nos mesmos e pela adição de energia renovável à rede nacional interligada.

O projeto pode ser registrado na UNFCCC e gerar CER's por um período que pode ser dividido em 3 períodos de 7 anos, totalizando 21 anos ou um único período de 10 anos (UNFCCC, 2001).

### 3.6.1. Ferramenta para o cálculo das emissões de metano evitadas pela não disposição de resíduos em aterros

Esta ferramenta calcula a linha de base de emissões de metano (CH<sub>4</sub>) de resíduos que, na ausência do projeto, seriam dispostos em aterros (SWDS – Solid Waste Disposal Sites). Ela é baseada em um modelo de decaimento de primeira ordem, que diferencia entre diferentes tipos de resíduos com diferentes taxas de decaimento e diferentes frações respectivas de carbono orgânico degradável.

O modelo calcula a geração de CH<sub>4</sub> baseado em fluxos de resíduos reais, dispostos a cada ano, começando com o primeiro ano após o início do projeto até o fim do último ano para qual as emissões de base são calculadas (UNFCCC, 2010a).

Conforme UNFCCC (2010a), os cálculos de metano evitado devem ser realizados conforme a equação a seguir:

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \phi \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j \cdot (y-x)} \cdot (1 - e^{-k_j}) \quad \text{Eq. 3.4}$$

Na qual:

$BE_{CH_4,SWDS,y}$  Emissões de metano evitadas durante o ano y ao prevenir a disposição em aterro (SWDS) durante o período desde o início da atividade do projeto (x=1) ao final do ano y (tCO<sub>2</sub>e);

$\phi$  Fator de correção do modelo para considerar incertezas;

f	Fração de metano que seria capturada no aterro em questão, para ser queimado ou usado de outra maneira;
$GWP_{CH_4}$	Potencial de aquecimento global (GWP) do metano (Valor = 21);
OX	Fator de oxidação, refletindo a proporção do metano formado no aterro que é oxidada na superfície ou em outro tipo de material que cobre os resíduos. Esse fator considera o efeito das bactérias oxidadoras do metano, chamadas metanotróficas, que se desenvolvem na camada superficial dos aterros;
F	Proporção de metano no gás advindo do aterro;
$DOC_f$	Proporção do carbono orgânico degradável (DOC) que é decomposto no aterro sanitário. Esse fator considera que parte do carbono degradável acaba não sendo convertido e é retido no aterro;
MCF	Fator de correção do metano. Esse fator considera em que proporção a atividade de decaimento biológico é anaeróbia ou aeróbia;
$DOC_j$	Fração de carbono orgânico degradável (por peso, em t) presente no resíduo tipo <i>j</i> ;
$K_j$	Taxa de decaimento para o resíduo tipo <i>j</i> . Indica se o resíduo é degradado com maior ou menor velocidade;
$W_{jx}$	Massa anual de resíduos (t) do tipo <i>j</i> que é destinado ao aterro;
<i>j</i>	Categoria do resíduo;
<i>x</i>	Ano durante o período de projeto;
<i>y</i>	Ano para o qual as emissões de metano são calculadas;

Utilizando a Eq. 3.4, é possível então calcular todo o metano que seria emitido para a atmosfera por uma quantidade determinada de um resíduo que deixou de ser depositado em um aterro, levando-se em conta a sua composição, as condições do aterro, as condições

climáticas na quais o aterro se encontra e a quantidade de resíduos que seria depositada ao longo do tempo.

### 3.6.2. Metodologia AMS-III-AO

A metodologia AMS-III-AO (UNFCCC, 2010b) compreende, dentre outras, medidas para evitar emissões de metano para a atmosfera de biomassa ou outro tipo de matéria orgânica que, de outra maneira, seria destinada a aterros e degradada anaerobiamente.

A metodologia em questão prevê a utilização de um sistema controlado de digestão anaeróbia de biomassa, equipado com um sistema de recuperação do biogás gerado, bem como sua combustão (UNFCCC, 2010b).

Conforme (UNFCCC, 2010b), a linha de base de projeto deve ser calculada conforme a equação a seguir:

$$BE_y = BE_{SWDS,y} + BE_{ww,y} + BE_{manure,y} - MD_{reg,y} * GWP_{CH_4} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Na qual:

- $BE_y$  Emissões da linha de base no ano y, (tCO<sub>2</sub>e);
- $BE_{SWDS,y}$  Potencial de geração anual de metano da digestão anaeróbia de resíduos sólidos pela atividade do projeto durante o ano x, desde o início da atividade de projeto (x = 1) até o ano y estimados de acordo com a versão mais recente “*Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site*”(tCO<sub>2</sub>e), descrita no item anterior;
- $BE_{manure,y}$  Emissões de linha de base (baseline) de esterco utilizado como co-substrato pelas atividades de projeto, calculadas conforme metodologia AMS-III-D (UNFCCC, 2010d). Aplica-se quando o projeto faz tratamento conjunto de resíduos sólidos e esterco animal;
- $BE_{ww,y}$  Emissões de linha de base (baseline) de efluentes utilizados como co-substrato pelas atividades de projeto, calculadas conforme metodologia

AMS-III-H (UNFCCC, 2010e). Aplica-se quando o projeto faz tratamento conjunto de resíduos sólidos e efluentes líquidos;

$MD_{reg,y}$  Quantidade de metano gerada no aterro que teria sido capturada e queimada até o ano y para atingir requisitos legais;

$GWP_{CH_4}$  Potencial de aquecimento global (GWP) do metano (21).

A diferença entre essa linha de base e a calculada pela Eq. 3.4 é que esta é mais abrangente, e considera ainda outros tipos de possíveis substratos que se somam à linha de base calculada no item anterior. Isso se dá porque se trata de uma linha de base de projeto, que pode abranger mais de um tipo de substrato, por exemplo, dejetos animais e efluentes líquidos.

### 3.6.3. Metodologia AMS-I-C

A metodologia AMS-I-C (UNFCCC,2010c), permite calcular emissões de GEE reduzidas em sistemas de geração de energia baseados em biomassa, que geram energia térmica e/ou elétrica em um mesmo processo. Se tanto a energia elétrica quanto a térmica utilizadas previamente ao projeto tiverem, de maneira comprovada, sua origem advinda da rede nacional interligada, uma simplificação da metodologia pode ser aplicada, permitindo o cálculo da linha de base análogo ao da metodologia AMS-I-D (UNFCCC, 2010f).

A metodologia AMS-I-D, por sua vez, permite calcular reduções de emissões de CO<sub>2</sub> ao adicionar-se energia advinda de biomassa ou de outras fontes renováveis a uma rede elétrica interligada abastecida por energia de origem menos limpa, na qual pelo menos uma unidade de geração de eletricidade é baseada em combustíveis fósseis. A equação a seguir descreve a metodologia de cálculo da linha de base:

$$BE_y = EG_{BL,y} * EF_{CO_2} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Na qual:

$BE_y$  Emissões da linha de base no ano y, ( $tCO_2e$ );

$EG_{BL,y}$  Quantidade de energia da linha de base no ano y, ( $kWh$ );

$EF_{CO_2}$  Fator de emissão para geração de eletricidade na rede nacional interligada no ano  $y$ , ( $tCO_2e/kWh$ ).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### ***4.1. Resumo da Metodologia Adotada no Trabalho***

Para a realização da pesquisa, foi montado aparato experimental dentro das dependências da Escola de Engenharia da UFMG. Para composição do substrato para os testes realizados, foram utilizados dados referentes à composição da fração orgânica biodegradável (FOB) dos resíduos da CEASAMINAS no ano de 2009. Tais dados apontaram a melhor forma de se simular a composição da FOB em laboratório, visando a averiguar a produção de biogás por unidade de massa.

A composição da FOB dos resíduos da CEASAMINAS durante o ano de 2009 foi estimada utilizando-se os dados do PRODAL, programa da CEASAMINAS mencionado no item 3.2.2, sendo possível então a realização de resíduos simulados utilizados como substrato nos testes realizados.

A composição da FOB estimada com os dados do PRODAL foi então multiplicada pela composição de sólidos voláteis (SV) obtida através da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (UNICAMP, 2006), de cada tipo de fruta, legume e vegetal, sendo então encontrada massa em SV.

Adotando-se tal procedimento, determinou-se a quantidade total de SV produzidos nos resíduos da CEASAMINAS em cada mês, sendo possível encontrar o mês de maior e menor potencial de produção de biogás. Foi então simulado um resíduo cuja composição respeitou àquela recebida pelo PRODAL nos meses identificados como de maior e de menor potencial de produção de biogás.

Utilizando-se o referido aparato, foram realizados 4 testes em laboratório com a duração de 14 dias cada, num período total de 56 dias. Os testes 1 e 2 foram feitos simulando os resíduos do mês de Agosto/09, considerado o de menor potencial de produção de gás, e os testes 3 e 4 simularam os resíduos de Dezembro/09, considerado o de maior potencial.

Dessa forma, utilizando-se a média entre os meses de máximo e mínimo, pôde-se estimar a taxa de geração média de biogás por kgSV para as condições reais, sendo ainda possível o cálculo da quantidade de créditos de carbono possíveis de serem obtidos com essa prática.

## **4.2. Aparato Experimental Utilizado**

O processo de digestão anaeróbia utilizado foi o de duplo estágio, descrito por Busch *et al.* (2008) e já mencionado no item 3.5 deste trabalho.

Para a montagem do aparato, os desafios iniciais estiveram ligados à infraestrutura do projeto. Eles se fizeram presentes desde o dimensionamento físico do aparelho, até as soluções de controle e automação que foram necessárias para atender as demandas do processo. Procuraram-se as melhores soluções de construção e funcionalidade, objetivando-se segurança pessoal, material e baixo investimento financeiro.

Alguns desafios iniciais foram os abaixo descritos:

- Dimensionamento dos reatores e tanques;
- Estabelecimento dos melhores métodos para a construção física dos reatores de metanogênese e hidrólise, de operação aparentemente simples, porém desafiadora;
- Encontrar uma plataforma adequada para a construção física do aparato;
- Estabelecimento de uma metodologia de construção modular, objetivando facilitar o transporte, a montagem final e manutenções periódicas;
- Encontrar as soluções mais adequadas para a manutenção das temperaturas ideais nos reatores de hidrólise e metanogênese;
- Dimensionamento e escolha de bombas hidráulicas adequadas ao processo de circulação de soluções entre os reatores;
- Desenvolvimento de todos os circuitos elétricos e eletrônicos do painel de controle e automação;
- Adequação do espaço físico e instalações elétricas do laboratório durante a montagem do aparato;
- Com a instalação do aparato, encontrar as melhores posições para instalação de todos os equipamentos, tubulações e conexões hidráulicas e de gás e equipamentos de aferição.

O equipamento é completamente automatizado e apresentou funcionamento estável, permitindo mínimas intervenções humanas em sua operação. Além disso, alcançou todas as expectativas iniciais inerentes a sua concepção e viabilizou a linha de pesquisa aqui descrita,

conforme Busch *et. al.* (2008). A Figura 4.1 mostra o aspecto final do aparato experimental utilizado nos testes.



**Figura 4.1** – Aparato experimental de digestão anaeróbia em processo de duplo estágio

Em resumo, o aparato foi construído utilizando-se basicamente os seguintes itens:

- Três tanques cilíndricos de 120 L em material plástico: dois trabalhando como primeiro estágio (hidrólise) e um como segundo estágio (metanogênese);
- Tanque fabricado em plástico de seção retangular e capacidade de 240 L, para servir de tanque intermediário "buffer" e outro com mesma geometria e material, porém, com um volume útil de 130 L, como tanque final do processo;
- Uma bomba de cavidade progressiva para recirculação do percolado entre a hidrólise (primeiro estágio) e o tanque intermediário "buffer";
- Uma bomba centrífuga para circular água quente visando a manter a temperatura do sistema (37°C);

- Duas bombas peristálticas, para circular o percolado do tanque intermediário ao tanque de metanogênese (segundo estágio);
- Material de enchimento para maximizar a área de contato das bactérias e formação de biofilme dentro do tanque de metanogênese;
- Um analisador de gases e um medidor mássico de vazão de biogás.

#### **4.2.1. Sistema de Hidrólise – Primeiro Estágio**

Foi instalado sobre uma plataforma de madeira confeccionada a partir de antigos armários sucateados pela Escola de Engenharia da UFMG e posicionada na extremidade esquerda da plataforma principal. Basicamente, o sistema é constituído por:

- Motobomba de cavidade progressiva. A rotação do motor e a consequente vazão da bomba é controlada por um inversor de frequência conjugado ao circuito trifásico. O acionamento do circuito é realizado por um temporizador digital programável. A taxa de vazão é mantida fixa (programação dos parâmetros do inversor) e os tempos de vazão por cada ciclo pré-estabelecido, são programados no temporizador de acordo com as necessidades e características de cada material a ser processado em seus respectivos ciclos de experimentos;
- Tanque “buffer” fabricado em plástico com formato retangular e 240 L de capacidade;
- Dois tanques cilíndricos de 120 L.

A motobomba de cavidade progressiva possui potencia nominal de 2cv. Optou-se por este tipo de bomba em virtude de sua alta vazão e baixa pressão, características ideais ao processo de lixiviação e não nocivas às bactérias uma vez que sob altas pressões, as mesmas sofreriam por esmagamento. A operação da bomba é “afogada” e conectada ao tanque “buffer”, conforme Figura 4.1.

O tanque “buffer”, de geometria retangular, foi confeccionado a partir de um recipiente plástico de 240 L de volume útil. Esse tanque é isolado termicamente por placas de isopor e recoberto por uma manta plástica “prateada”.

Os dois tanques de hidrólise (hidrólise 1 e 2) foram construídos a partir de recipientes cilíndricos, “bombonas”, de 120 L de volume útil cada e alimentados pelo topo por tubulações em PVC, mangueiras e conexões de 2” de diâmetro. Cabe destacar que foram instalados

internamente, no topo dos reatores, anteparos perfurados para impacto do percolado e melhor distribuição do mesmo no leito fixo do material a ser lixiviado. Tal medida possibilita uma otimização do processo, evitando-se a formação de canais preferenciais no leito e uma melhor distribuição do percolado no mesmo. Não apresentam revestimento térmico, pois o processo se dá a temperatura ambiente. A Figura 4.2 mostra o aspecto final do sistema de hidrólise do aparato experimental.



**Figura 4.2** – Sistema de hidrólise do aparato experimental – Primeiro Estágio

#### **4.2.2. Reator de Metanogênese – Segundo Estágio**

Objetivando-se atender às demandas do processo, optou-se por utilizar como base de construção para o reator um tanque cilíndrico de material plástico com um volume interno de 120 L (conhecidos no mercado por “bombonas”).

Com o objetivo de manter a temperatura interna média em 37° C, instalaram-se duas serpentinas de cobre de oito metros de comprimento cada e ½” de diâmetro, em espiral, na parte externa do reator, onde circula água quente.

As serpentinas de cobre foram instaladas externamente ao reator porque o cobre (assim como alguns outros metais) é nocivo às bactérias presentes no reator. Outro motivo para a instalação externa é o choque térmico da serpentina aquecida em contato direto com o filme biológico, que poderia ser prejudicial aos microrganismos.

A Figura 4.3 mostra as serpentinas instaladas ao redor do reator de metanogênese.

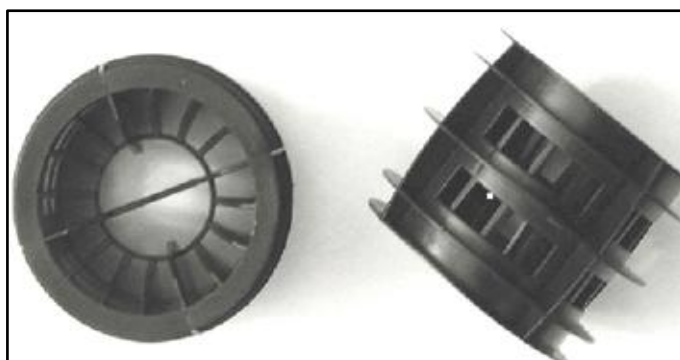


**Figura 4.3** – Serpentinhas de cobre instaladas no reator de metanogênese

Como se optou pela instalação externa das serpentinas, as perdas térmicas são muito significativas, havendo a necessidade da instalação de um bom isolamento térmico. O isolamento térmico instalado é composto de lã de rocha recoberta com uma delgada chapa de alumínio corrugado.

Na base do reator foram instaladas telas perfuradas de aço inox em forma de discos com as seguintes especificações: 47 cm de diâmetro, furos de 10 mm, instaladas sobre bases cilíndricas de nylon de 20 cm de altura com relação à base, com a função de reter o material sólido no interior dos reatores.

No interior do reator foram colocadas peças plásticas com área de contato maximizada da marca Rauschert, tipo Bioflow, servindo de material de preenchimento e leito para fixação das bactérias. A Figura 4.4 mostra o aspecto das peças plásticas.



**Figura 4.4** – Material de preenchimento do reator de metanogênese

Em resumo, os materiais utilizados na construção do reator de metanogênese foram os seguintes:

- Base do reator: Um tanque cilíndrico “bombona” de 120 L com tampa autovedante;
- Duas serpentinas de cobre de oito metros de comprimento cada e ½” de diâmetro para circulação de água quente;
- Isolamentos térmicos constituídos por fitas termo retráteis ao redor das serpentinas, uma camada de “asfalto líquido”, revestimentos de manta asfáltica auto-adesiva, uma camada de “lã de rocha” disposta sobre a manta e uma chapa de alumínio corrugada como revestimento final e acabamento;
- Conexões hidráulicas diversas para circulação de líquidos e gases de ¾” e ½”, e um registro de saída de ¾”;
- Um sifão adaptado às plataformas para manutenção de cerca de 80% do volume útil do reator afogado;

- Uma tela inferior de contenção perfurada de aço inox de 47 cm de diâmetro, com orifícios de 10mm sobreposta a sete cilindros de nylon de 10 cm de comprimento;
- Material de preenchimento: Substratos de material plástico, que constituem um leito no interior do reator para fixação e proliferação das bactérias metanogênicas (filme biológico).

A Figura 4.5 mostra o aspecto final do reator de metanogênese.



**Figura 4.5** – Aspecto final do reator de metanogênese

#### **4.2.3. Sistema de Aquecimento e Manutenção de Temperatura do Reator de Metanogênese:**

Como se escolheu trabalhar com bactérias mesofílicas, a temperatura no interior do reator não podia sofrer oscilações muito bruscas e devia se situar próxima de 37°C, que é a temperatura de operação ótima para este tipo de bactérias (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008). Para tanto, foi construído um sistema visando a manter a temperatura interna do reator de metanogênese através da circulação de água quente nas serpentinas de cobre instaladas externamente ao mesmo.

O sistema é constituído dos seguintes materiais:

- Uma motobomba dotada de rotor de bronze e selos de vitón para suportar altas temperaturas, com potência nominal de ¼ cv, originalmente utilizada em saunas;
- Um reservatório térmico confeccionado a partir de uma “bombona” de 20 L, contendo revestimento térmico similar ao aplicado no reator de metanogênese (exceto lã de rocha e chapa corrugada de alumínio);
- Dois aquecedores de 2000 W cada adaptados na tampa do reservatório térmico;
- Dois termopares adaptados a tubos de PVC de ¾” de diâmetro (poços termométricos), tendo seus cabamentos elétricos isolados da água por “tampões” de borracha conectados aos respectivos termostatos digitais de controle;
- Um termopar instalado no ponto médio axial e radial do reator de metanogênese, de forma similar à descrita acima;
- Mangueiras e conexões diversas de ¾” e ½” de diâmetro.

O funcionamento se deu através do aquecimento de água no reservatório térmico intermediário de 20 L a uma temperatura média de cerca de 62°C, que foi então circulada na serpentina de cobre do reator de metanogênese utilizando-se uma motobomba (Figuras 4.6 e 4.7).

Para o aquecimento da água, optou-se pela utilização de dois aquecedores de 2000 W, conectados a sistemas de controle independentes. Verificou-se que apenas um já seria suficiente, mas como o funcionamento do sistema é contínuo e não permite quedas de temperatura, a possível pane de um aquecedor poderia prejudicar o bom andamento dos experimentos pelo conseqüente resfriamento do reator.



**Figura 4.6** – Motobomba utilizada no sistema de aquecimento



**Figura 4.7** – Aspecto geral do sistema de aquecimento: Reservatório intermediário de 20 L e motobomba.

A faixa de temperatura da água aquecida, em cerca de 62°C, foi definida de forma empírica durante os testes. Em temperaturas acima da faixa utilizada, há considerável “cavitação” da motobomba pela turbulência provocada pelo aquecimento da água, com a consequente perda de eficiência de circulação. Temperaturas abaixo dessa faixa não são suficientes para manter a temperatura do reator de metanogênese em 37°C em média em tempo hábil ao processo.

O controle da temperatura interna do reator de metanogênese foi realizado através de um termopar instalado internamente, que controla o acionamento da motobomba para a circulação de água quente nas serpentinas através de um sistema de controle e automação.

#### **4.2.4. Tanques**

Existem dois tanques no sistema, muito importantes para o bom funcionamento do mesmo. O primeiro, chamado de intermediário ou “buffer”, é diretamente conectado aos reatores de hidrólise do primeiro estágio. Funciona como um tanque pulmão de líquido percolado, e armazena a DQO gerada no primeiro estágio do processo. É de seção retangular e possui um volume aproximado de 240 L.

O segundo tanque, chamado de final, é diretamente ligado ao sifão presente no reator de metanogênese e possui volume aproximado de 130 L. Existe uma comunicação entre os tanques intermediário e final, visando a recircular o efluente tratado como água de processo, fechando-se assim o circuito de operação.

##### Tanque de intermediário ou “buffer”

Composto de uma caixa em material plástico dotada de conexões hidráulicas nas medidas ½”, ¾” e 2” para diversos fins. Um bom isolamento térmico foi necessário, sendo construído com placas de isopor aderidas às paredes externas.

Materiais utilizados:

- Caixa de seção retangular de aproximadamente 240 L;
- Duas conexões em PVC ¾” instaladas na tampa que suportam os poços dos dois aquecedores presentes;
- Uma conexão em PVC ¾” instalada na parte superior da lateral posterior que recebe uma mangueira ¾” conectada ao tanque final;

- Registro em PVC ¾” instalado na parte inferior da lateral posterior para coleta de amostras e esgotamento do tanque;
- Uma conexão em PVC ½” e uma de ¾” instaladas na parte superior da lateral direita para a instalação do pescador da bomba peristáltica e do poço termométrico, respectivamente;
- Uma conexão em PVC 2” instalada sob a base inferior para comunicação entre o tanque e a entrada da bomba de circulação;
- Material de revestimento térmico composto de placas de isopor coladas e manta plástica prateada de acabamento;
- Dois aquecedores de 250 W cada, utilizados originalmente em aquários, foram construídos em uma base cilíndrica de vidro sendo adaptados ao tanque através de tubos de PVC ¾” e joelhos de 1” também em PVC;

#### Tanque final:

Instalado após o reator de metanogênese, comunica-se com o mesmo através do sifão. Sua construção é muito similar à do tanque de intermediário ou “buffer”.

#### Materiais utilizados:

- Caixa de seção retangular de aproximadamente 130 L;
- Uma conexão de ¾” em PVC fixada à tampa para a comunicação com o sifão do reator de metanogênese;
- Uma conexão de ¾” em PVC fixada à parte superior da lateral esquerda para a instalação do poço termométrico;
- Uma conexão de ½” em PVC fixada à tampa para a instalação do pescador da bomba peristáltica;
- Três conexões ½” em PVC fixadas à tampa para a instalação das bases de dois aquecedores de suporte;
- Um registro ¾” em PVC instalado na parte inferior esquerda da base anterior para o esgotamento do tanque e comunicação com o tanque intermediário;
- Uma torneira ½” instalada na parte inferior direita da base anterior para coleta de amostras;

- Materiais de revestimento, similares aos anteriormente descritos para o tanque intermediário.

Em ambos os tanques, intermediário “buffer” e final, a manutenção das temperaturas internas é controlada por termostatos digitais, presentes no painel de controle, conectados aos aquecedores imersos aos respectivos tanques. Os termopares presentes nos tanques realizam a leitura das temperaturas internas dos mesmos e estão conectados aos seus respectivos termostatos presentes no painel de controle.

#### **4.2.5. Sistemas de Dosagem e Circulação de Soluções**

A circulação das soluções entre os reatores e os tanques é feita através de bombas hidráulicas, havendo uma demanda específica no que se refere à vazão para cada parte do sistema. Os sistemas biológicos em geral são muito sensíveis a choques térmicos, mecânicos e a altas pressões. Com isso, a escolha de bombas hidráulicas adequadas para cada finalidade tornou-se necessária.

##### Bombas Peristálticas

Da marca Provitec, são adequadas ao sistema de circulação de soluções biológicas sendo constituídas por um pequeno motor elétrico, uma membrana de silicone e um dosador digital de vazão. Existem duas presentes no sistema sendo uma conectada ao tanque intermediário (bomba 1) e outra ao tanque final (bomba 2). A figura 4.8 mostra o aspecto da bomba 2.

A bomba 2 é utilizada na comunicação entre os tanques final e intermediário, tendo a função de recircular o efluente tratado como água de processo para a próxima batelada de resíduos a serem tratados.

A bomba 1 é idêntica à bomba 2 e tem a função de comunicar o tanque intermediário com o reator de metanogênese. Sua presença é de vital importância ao sistema uma vez que é ela quem movimenta o hidrolisado armazenado no tanque intermediário, aplicando-o ao reator de metanogênese. Seu controle também é feito através do dosador e por meio de temporizadores digitais, que controlam o acionamento e corte das bombas, de acordo com as variáveis inerentes a cada teste (número de circulações durante cada dia de operação, assim como o tempo de circulação em cada acionamento das bombas, cuja vazão é mantida fixa).



**Figura 4.8** – Bomba peristáltica instalada no sistema (bomba 2)

#### Motobomba de cavidade progressiva

Da marca Netzsch, possui uma potência nominal de 2 cv e, em virtude da caixa de redução acoplada a um espiral interno, caracteriza-se por apresentar baixa rotação (cerca de 300 r.p.m), não sendo nociva às bactérias.

Devido ao seu porte apresenta grande vazão volumétrica, característica que possibilitou o seu emprego no sistema de lixiviação da hidrólise. A figura 4.9 mostra a motobomba de cavidade progressiva instalada.

A bomba tem a função de captar o percolado do tanque intermediário através de um pequeno tubo de PVC de 2” de diâmetro que a interliga com a base inferior daquele tanque. Sua saída é conectada a um joelho de PVC de 2” e este, por sua vez, é ligado a uma tubulação de PVC de mesmo diâmetro, sendo o fluxo ascendente.



**Figura 4.9 – Motobomba de cavidade progressiva**

#### **4.2.6. Controle e Automação**

Devido à complexidade da operação, percebeu-se a necessidade de um sistema de controle automático, baseado em termostatos e temporizadores digitais. Utilizando-se um tubo de PVC  $\frac{3}{4}$ ", foi construído um poço termométrico para o termopar, que foi adaptado ao ponto médio axial e radial do reator de metanogênese.

O termostato em questão controla o acionamento e o corte da motobomba de aquecimento de acordo com a temperatura interna do reator de metanogênese e faz a água quente circular pelas serpentinas de cobre quando a temperatura cai abaixo dos  $37^{\circ}\text{C}$ . Tal operação visou a manter a temperatura média do reator de metanogênese em  $37^{\circ}\text{C}$ , que é a temperatura ideal para as bactérias mesofílicas.

Houve ainda a necessidade de se controlar a temperatura do reservatório térmico, que esquentava a água a ser circulada nas serpentinas de cobre do reator de metanogênese. Termostatos foram também utilizados, um para cada aquecedor, e seus termopares foram instalados da mesma maneira descrita para o do reator de metanogênese.

Empiricamente, constatou-se que a temperatura ótima para o reservatório térmico é de 62° C, suficiente para manter o reator de metanogênese a 37°C sem comprometer a estrutura do reservatório, motobomba e mangueiras. Os termostatos foram programados para ligar os aquecedores aos 61,0° C e desligá-los aos 63,0° C.

Percebeu-se que manter o sistema de aquecimento acionado com a bomba desligada seria desnecessário e dispendioso sob todos os aspectos, principalmente no que se refere ao consumo de energia elétrica.

Para resolver o problema, conjugaram-se os dois termostatos dos aquecedores ao termostato da bomba. Quando a motobomba é acionada os termostatos dos aquecedores também são ligados. A água já mantida aquecida pelo isolamento térmico presente no reservatório rapidamente atinge os 62°C. Quando a motobomba é desligada, o sistema de aquecimento tem sua alimentação cortada.

A figura 4.10 mostra o aspecto final do painel de controle e automação do aparato experimental.



**Figura 4.10** – Aspecto final do painel de controle e automação do aparato experimental

Em resumo, os sistemas de controle e automação do aparato são compostos basicamente dos seguintes itens:

- Dois temporizadores digitais conectados em série, que controlam os acionamentos e cortes da motobomba de acordo com as necessidades e condições do sistema;
- Um relé diferencial tetrapolar de 25 A para proteção humana;
- Um disjuntor tripolar de 10 A para proteção da bomba com cavidade progressiva;
- Um relé de sobrecarga para proteção das bombas;
- Um relé de falta de fase para proteção das bombas;
- Uma contatora de 25 A para a conexão entre a bomba de cavidade progressiva e temporizadores;
- Dois termostatos digitais para controle dos aquecedores presentes nos tanques intermediário e final;
- Dois disjuntores monopolares de 6 A para proteção dos termostatos;
- Quatro fusíveis com capacidades entre 400 mA e 2,5A para proteção dos aquecedores e saídas dos termostatos;
- Dois termostatos digitais com seus respectivos disjuntores e contadoras, para acionamento e corte do sistema de aquecedores do reservatório térmico;
- Um termostato digital para controle do sistema de aquecimento do reator de metanogênese (motobomba e circuito de alimentação dos termostatos dos aquecedores) e seu disjuntor, contatora e relé diferencial para proteção humana.

#### **4.2.7. Plataforma de Base**

A complexidade e as dimensões físicas do aparato motivaram a construção de uma plataforma de base, visando a união de todos os componentes descritos até o momento. Construída integralmente em madeira (compensado) e em seguida pintada, tem o aspecto final conforme mostrado na Figura 4.11.

Com a plataforma concluída, foi possível instalar sobre a mesma todo o sistema hidráulico de aquecimento (inclusive a motobomba) e reunir em um único painel de controle todo o sistema de automação. Os cabos elétricos flexíveis de 2,5mm e 4,0mm de diâmetro foram ocultados por canaletas de PVC afixadas à plataforma.



**Figura 4.11** – Disposição dos diversos módulos sobre a plataforma base durante a montagem final.

Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Uma mesa de madeira;
- Uma “prancha” de madeira espessa de 3,8 m por 90 cm;
- Portas de antigos armários sucateados e beneficiadas para constituírem um móvel onde foram montados os sistemas de hidrólise/lixiviação, dispostos a esquerda da plataforma principal.

#### **4.2.8. Instrumentos de Medição do Biogás Gerado**

Visando a coletar os dados necessários à pesquisa, foram utilizados instrumentos para medir a composição e quantidade de biogás produzido (Figuras 4.12 e 4.13).

Para medir a quantidade de biogás produzido, foi utilizado medidor mássico de vazão digital (Figura 4.12) da marca Aalborg, modelo GFM 17, com um totalizador de volume de gás gerado com precisão centesimal, sendo conectado à saída de gás do reator de metanogênese através de mangueiras.



**Figura 4.12** – Medidor mássico de vazão digital e seu respectivo totalizador de gás acoplado à saída de gás do reator de metanogênese.



**Figura 4.13** – Analisador de gases utilizado na pesquisa

Para a análise da composição do gás produzido foi utilizado um analisador de gases portátil e digital (Figura 4.13) da marca Geotech, modelo Biogas CDM, sendo também conectado à saída de gás do reator de metanogênese. O analisador mede a fração de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e mostra o balanço dos demais gases em uma mesma medição.

Diferentemente do medidor mássico, que realiza leituras contínuas totalizando o volume de biogás produzido em tempo integral, o analisador de gases mostra uma leitura instantânea do biogás gerado, sendo necessários vários procedimentos de medição para compor uma curva de composição do biogás ao longo do tempo.

### ***4.3. Metodologia Amostragem dos Resíduos Utilizados na Pesquisa***

Com o objetivo de simular os resíduos produzidos pela CEASAMINAS foi escolhida a composição encontrada durante o ano de 2009, uma vez que era último ano com dados completos disponíveis quando foi iniciada esta pesquisa.

Visando a representar a composição dos resíduos descartados pela CEASAMINAS, foram utilizados dados do PRODAL, um programa instituído pelo entreposto de Contagem-MG com o objetivo de reduzir o desperdício de alimentos mediante a doação dos excedentes não comercializados.

O PRODAL mantém controle diário detalhado da quantidade e tipo de produtos que recebe, servindo de excelente fonte de dados para esta pesquisa. Tais dados são valiosos uma vez que se pode, com razoável margem de acerto, prever a composição do resíduo orgânico biodegradável que é descartado no aterro de Contagem-MG pela CEASAMINAS através da composição dos produtos recebidos pelo PRODAL.

Isso se dá pelo fato de os produtos do PRODAL terem a mesma origem dos resíduos orgânicos biodegradáveis da CEASAMINAS: o descarte dos produtores.

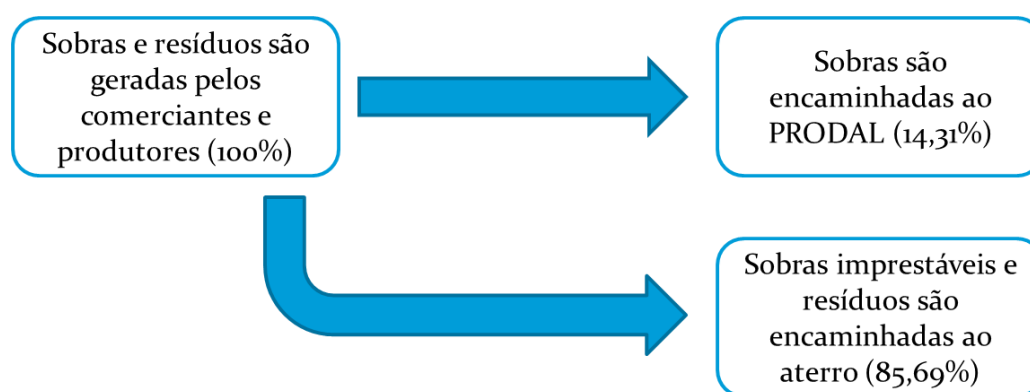
De acordo com CEASAMINAS (2010d), em 2009 o PRODAL recebeu 1.661 toneladas de alimentos que, comparadas às 11.608 toneladas destinadas ao aterro de Contagem pelo entreposto (CEASAMINAS, 2010a), representam uma amostragem dos resíduos de 14,31% em massa durante o ano de 2009, conforme mostrado na Tabela 4.1

**Tabela 4.1** – Comparativo entre a massa de resíduos enviada ao aterro de Contagem-MG pela CEASAMINAS e as sobras recebidas pelo PRODAL em 2009

MÊS	2009		
	ATERRO (t)	PRODAL (t)	RELAÇÃO
Janeiro	1.148,93	123,93	10,79%
Fevereiro	861,79	84,69	9,83%
Março	1.027,69	129,06	12,56%
Abril	903,31	168,75	18,68%
Mai	742,79	110,39	14,86%
Junho	726,22	87,63	12,07%
Julho	792,61	119,10	15,03%
Agosto	714,99	87,85	12,29%
Setembro	851,34	202,76	23,82%
Outubro	1.124,01	175,89	15,65%
Novembro	1.142,21	174,91	15,31%
Dezembro	1.571,63	195,66	12,45%
<b>TOTAL</b>	<b>11.608</b>	<b>1.661</b>	<b>14,31%</b>

Estatisticamente, tal percentual é bastante representativo, sendo então nessa pesquisa a composição de entrada do PRODAL extrapolada, visando a representar a composição do total de resíduos gerados na CEASAMINAS.

A figura 4.14 mostra o fluxo do processo de descarte das sobras da CEASAMINAS, até que efetivamente se transformem em resíduos e sejam encaminhadas ao aterro sanitário de Contagem-MG.



**Figura 4.14** – Fluxo de descarte das sobras da CEASAMINAS

Para representar a composição total de resíduos gerados na CEASAMINAS, os dados relativos de entrada das sobras no PRODAL foram multiplicados pelo percentual de sólidos voláteis (SV) obtida através da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (UNICAMP, 2006), de cada tipo de fruta, legume e vegetal, sendo então encontrada a massa equivalente em SV. Adotando-se tal procedimento, foi possível determinar a quantidade total de SV recebidos pelo PRODAL em cada mês, conforme Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Quantidade de sobras recebidas mensalmente pelo PRODAL em 2009 e sua respectiva massa em SV

<b>MÊS</b>	<b>Massa Total (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Janeiro	123.929	20.158,31
Fevereiro	84.689	13.891,28
Março	129.060	18.205,81
Abril	168.749	20.721,85
Mai	110.393	12.552,69
Junho	87.626	14.608,14
Julho	119.097	13.508,93
Agosto	87.852	8.365,20
Setembro	202.762	22.594,32
Outubro	175.889	20.750,12
Novembro	174.907	26.252,85
Dezembro	195.657	27.769,20
<b>TOTAIS</b>	<b>1.660.610</b>	<b>219.378,68</b>

No ANEXO I, encontra-se a composição das sobras recebidas pelo PRODAL de janeiro/2009 a dezembro/2009, mês a mês. Utilizando os dados do ANEXO I, a Tabela 4.2 mostra uma compilação da quantidade de alimentos recebidos pelo PRODAL em 2009, assim como sua respectiva massa em sólidos voláteis.

Diante da impossibilidade de replicar os resíduos conforme composição diária ou mesmo mensal, optou-se por simplificar a amostragem dos resíduos da CEASAMINAS do ano de 2009 através da média das situações de máximo e de mínimo de SV recebidos pelo PRODAL.

As situações de máximo e mínimo em questão são os meses de extremos, identificados como de maior e de menor produção de SV. Objetivando-se obter um resultado médio para todo o ano de 2009, foi então simulado um resíduo cuja composição seguiu aquela recebida pelo PRODAL nos meses de maior e menor potencial de produção de biogás.

A Tabela 4.2 mostra que, em 2009, ao transformar a massa das sobras em SV, o mês em que o PRODAL menos recebeu sólidos voláteis SV foi agosto e o que recebeu mais SV foi dezembro. A produção de biogás está diretamente ligada à quantidade de SV, portanto, pôde-se inferir com os dados que os meses de menor e maior potencial de produção de biogás foram agosto e dezembro de 2009 respectivamente.

A fim de realizar a simulação do resíduo do mês de agosto/2009, foram utilizadas as planilhas de controle de entrada de alimentos do PRODAL para esse mês, que mostram a quantidade de alimento recebida para cada tipo de fruta, legume e hortaliça. Verifica-se nas referidas planilhas que, durante o mês de agosto de 2009, o PRODAL recebeu 36 tipos diferentes de frutas, legumes e hortaliças CEASAMINAS (2010d) que, somadas, representaram uma massa total de 87.852 kg e 8.365,20 kg de SV, conforme Tabela 4.3.

No entanto, para a simulação do resíduo, a utilização de 36 tipos de alimentos se tornaria muito complicada, sendo então adotado um método para simplificar tal resíduo simulado. O método adotado foi a escolha das frutas, legumes e hortaliças que, somadas, representam no mínimo 50% do resíduo de agosto/2009 tanto em massa total quanto em total de SV.

Com os dados da Tabela 4.3, observa-se que apenas com os quatro primeiros tipos de alimentos já é possível atingir a meta citada no parágrafo anterior. Portanto, o resíduo simulado do mês de agosto/2009 teve em sua composição apenas laranja, repolho, tangerina e mamão, que representam 68,11% em massa total e 60,15% em total de sólidos voláteis dos resíduos desse mês.

Para fins de amostragem, foram desconsiderados todos os outros tipos de alimentos, exceto os citados no parágrafo anterior. Considerou-se então uma composição hipotética de apenas quatro tipos de resíduos para representar o mês de agosto/2009, conforme Tabela 4.4.

Portanto, para os testes em que a composição de agosto/2009 foi utilizada, foram utilizados em massa: 20,32% de laranja, 45,25% de repolho, 18,95% de tangerina e 15,47% de mamão.

Analogamente à situação anterior e visando à simulação do resíduo do mês de dezembro/2009, foram utilizadas as planilhas de controle de entrada de alimentos do PRODAL para esse mês. Verifica-se nas referidas planilhas que durante dezembro/2009 o PRODAL recebeu 37 tipos

diferentes de frutas, legumes e hortaliças CEASAMINAS (2010d) que, somadas, representaram uma massa total de 195.657 kg e 27.769,20 kg de SV, conforme Tabela 4.5.

**Tabela 4.3** – Quantidade e tipo das sobras recebidas pelo PRODAL em agosto/2009 e sua respectiva massa em SV

<b>Tipo</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>% MASSA ACUM.</b>	<b>SV Total (kg)</b>	<b>% SV ACUM.</b>
Laranja	12,40	12.161,00	13,84%	1.507,96	18,03%
Repolho	4,60	27.075,00	44,66%	1.245,45	32,92%
Tangerina	10,70	11.340,00	57,57%	1.213,38	47,42%
Mamão	11,50	9.258,00	68,11%	1.064,67	60,15%
Beterraba	13,10	4.554,00	73,29%	596,57	67,28%
Limão	12,60	4.482,00	78,39%	564,73	74,03%
Batata Doce	29,10	858,00	79,37%	249,68	77,01%
Cebola	10,60	2.218,00	81,89%	235,11	79,83%
Batata Baroa / Salsa	24,90	900,00	82,92%	224,10	82,50%
Batata Inglesa	16,40	1.300,00	84,40%	213,20	85,05%
Abacate	15,50	1.320,00	85,90%	204,60	87,50%
Couve-Flor	6,40	2.664,00	88,93%	170,50	89,54%
Jiló	7,40	1.744,00	90,92%	129,06	91,08%
Mandioca	37,40	226,00	91,18%	84,52	92,09%
Tomate	4,50	1.873,00	93,31%	84,29	93,10%
Maçã	16,25	486,00	93,86%	78,98	94,04%
Banana	27,42	270,00	94,17%	74,03	94,93%
Milho Verde	22,90	247,00	94,45%	56,56	95,60%
Abobrinha	7,10	774,00	95,33%	54,95	96,26%
Pimentão	6,57	834,00	96,28%	54,77	96,91%
Pêra	15,70	324,00	96,65%	50,87	97,52%
Alface	3,40	1.320,00	98,15%	44,88	98,06%
Abacaxi	13,60	288,00	98,48%	39,17	98,53%
Maracujá	16,20	240,00	98,75%	38,88	98,99%
Almeirão	5,00	425,00	99,24%	21,25	99,25%
Goiaba	13,50	106,00	99,36%	14,31	99,42%
Cenoura Vermelha	9,10	154,00	99,53%	14,01	99,58%
Manga	15,65	45,00	99,58%	7,04	99,67%
Vagem	7,50	78,00	99,67%	5,85	99,74%
Couve	7,70	67,00	99,75%	5,16	99,80%
Chuchu	4,70	102,00	99,86%	4,79	99,86%
Inhame	25,80	18,00	99,89%	4,64	99,91%
Brócolis	8,20	36,00	99,93%	2,95	99,95%
Abóbora	5,80	39,00	99,97%	2,26	99,98%
Morango	7,50	18,00	99,99%	1,35	99,99%
Melão	8,50	8,00	100,00%	0,68	100,00%
<b>TOTAL</b>		<b>87.852,00</b>	<b>100,00%</b>	<b>8.365,20</b>	<b>100,00%</b>

**Tabela 4.4** – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado de agosto/2009

<b>Tipo</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>% EM MASSA</b>
Laranja	12.161,00	20,32%
Repolho	27.075,00	45,25%
Tangerina	11.340,00	18,95%
Mamão	9.258,00	15,47%
<b>TOTAL</b>	<b>59.834,00</b>	<b>100,00%</b>

**Tabela 4.5** – Quantidade e tipo das sobras recebidas pelo PRODAL em dezembro/2009 e sua respectiva massa em SV

<b>Tipo</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>% MASSA ACUM.</b>	<b>SV Total (kg)</b>	<b>% SV ACUM.</b>
Banana	27,42	45.224,00	23,11%	12.398,91	44,65%
Mamão	11,50	25.554,00	36,17%	2.938,71	55,23%
Batata Inglesa	16,40	13.800,00	43,23%	2.263,20	63,38%
Cebola	10,60	17.404,00	52,12%	1.844,82	70,03%
Manga	15,65	8.127,00	56,28%	1.271,88	74,61%
Laranja	12,40	7.146,00	59,93%	886,10	77,80%
Repolho	4,60	16.300,00	68,26%	749,80	80,50%
Abobrinha	7,10	8.550,00	72,63%	607,05	82,68%
Tomate	4,50	11.726,00	78,62%	527,67	84,58%
Abóbora	5,80	7.771,00	82,59%	450,72	86,21%
Cenoura Vermelha	9,10	4.238,00	84,76%	385,66	87,60%
Limão	12,60	2.930,00	86,26%	369,18	88,92%
Abacate	15,50	2.160,00	87,36%	334,80	90,13%
Mandioca	37,40	866,00	87,80%	323,88	91,30%
Milho Verde	22,90	1.262,00	88,45%	289,00	92,34%
Abacaxi	13,60	1.810,00	89,37%	246,16	93,22%
Pimentão	6,57	3.604,00	91,22%	236,66	94,08%
Maracujá	16,20	1.260,00	91,86%	204,12	94,81%
Tangerina	10,70	1.476,00	92,62%	157,93	95,38%
Chuchu	4,70	3.290,00	94,30%	154,63	95,94%
Inhame	25,80	576,00	94,59%	148,61	96,47%
Caqui	19,50	690,00	94,94%	134,55	96,96%
Pêssego	10,50	1.116,00	95,51%	117,18	97,38%
Beterraba	13,10	860,00	95,95%	112,66	97,78%
Batata Baroa / Salsa	24,90	442,00	96,18%	110,06	98,18%
Couve-Flor	6,40	1.560,00	96,98%	99,84	98,54%
Jiló	7,40	992,00	97,48%	73,41	98,80%
Pepino	2,70	2.688,00	98,86%	72,58	99,07%
Melancia	8,70	770,00	99,25%	66,99	99,31%
Cará	25,10	221,00	99,36%	55,47	99,51%
Batata Doce	29,10	180,00	99,46%	52,38	99,70%
Berinjela	5,60	576,00	99,75%	32,26	99,81%
Maçã	16,25	144,00	99,82%	23,40	99,90%
Alface	3,40	224,00	99,94%	7,62	99,92%
Vagem	7,50	78,00	99,98%	5,85	99,94%
Lima	12,60	18,00	99,99%	2,27	99,95%
Coco-Verde	55,00	24,00	100,00%	13,20	100,00%
<b>TOTAL</b>		<b>195.657,00</b>	<b>100,00%</b>	<b>27.769,20</b>	<b>100,00%</b>

No entanto, a utilização de 37 tipos de alimentos se tornaria muito complexa para a simulação do resíduo, sendo então adotado um método para simplificar tal resíduo simulado. O método adotado é o mesmo do mês de agosto/2009, sendo a escolha das frutas, legumes e hortaliças que, somadas, representam no mínimo 50% do resíduo de dezembro/2009 tanto em massa total quanto em total de SV.

Com os dados da tabela 4.5, observa-se que analogamente ao caso de agosto/2009, apenas com os quatro primeiros tipos de alimentos já é possível atingir a meta citada no parágrafo anterior. Portanto, o resíduo simulado do mês de dezembro/2009 teve em sua composição apenas banana, mamão, batata inglesa e cebola, que representam 52,12% em massa total e 70,03% em total de sólidos voláteis dos resíduos deste mês.

Analogamente ao realizado para agosto/2009, para fins de amostragem, foram então desconsiderados todos os outros tipos de alimentos, exceto os citados no parágrafo anterior. Considerou-se então uma composição hipotética de apenas quatro tipos de resíduos para representar o mês de dezembro/2009, conforme Tabela 4.6.

Portanto, para os testes em que a composição de dezembro/2009 foi utilizada, foram utilizados em massa: 44,35% de banana, 25,06% de mamão, 13,53% de batata inglesa e 17,07% de cebola.

**Tabela 4.6** – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado de dezembro/2009

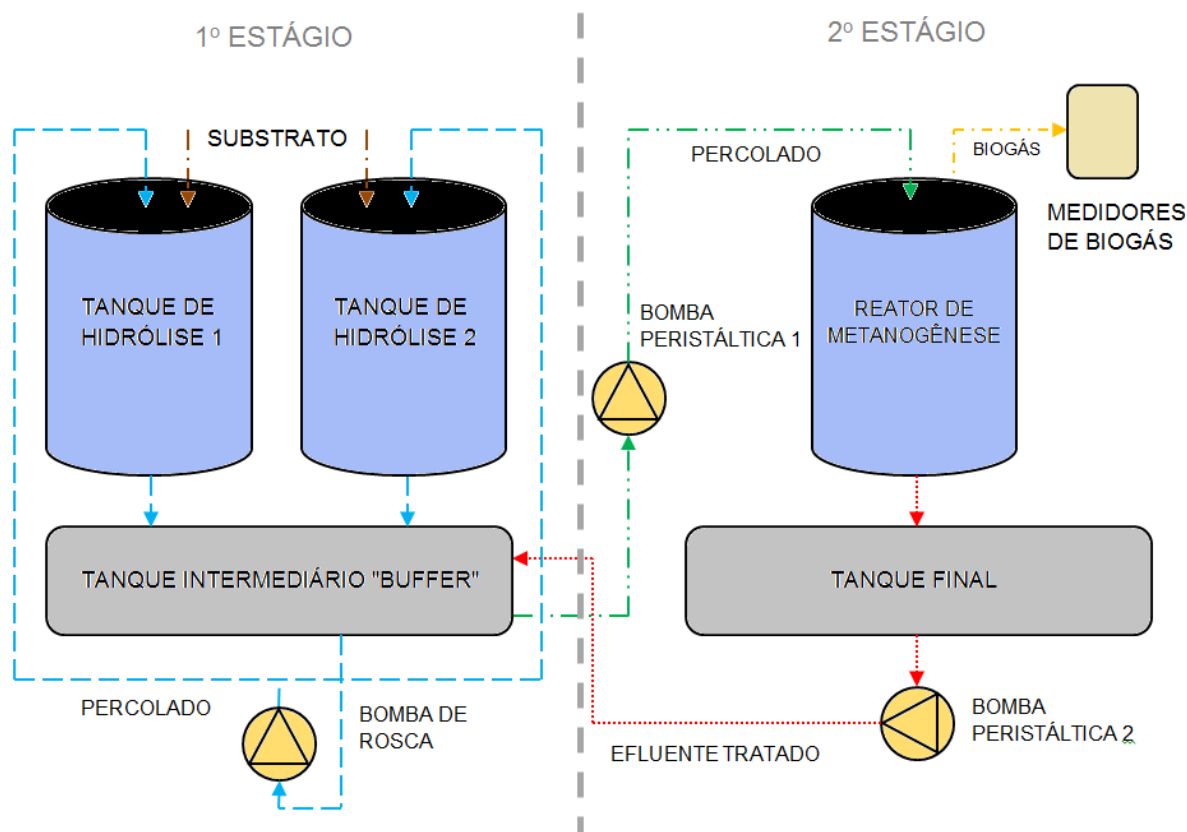
<b>Tipo</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>% EM MASSA</b>
Banana	45.224,00	44,35%
Mamão	25.554,00	25,06%
Batata Inglesa	13.800,00	13,53%
Cebola	17.404,00	17,07%
<b>TOTAL</b>	<b>101.982,00</b>	<b>100,00%</b>

#### **4.4. Testes em Laboratório Realizados**

A fim de averiguar o potencial de produção de biogás com os resíduos da CEASAMINAS, um programa de testes foi realizado. No total foram realizados 4 testes, nos quais 2 simulam a composição dos resíduos recebidos pelo PRODAL em agosto/2009 e os outros 2 a do mês de

dezembro/2009. Cada teste teve um prazo de 14 dias, totalizando um período total de pesquisa de 56 dias.

A Figura 4.15 representa o aparato experimental montado assim como o esquema de funcionamento genérico dos testes. Os Tanques de Hidrólise (1 e 2), assim como o tanque intermediário ou “buffer”, representam o primeiro estágio do processo; o reator de metanogênese e o tanque final representam o segundo.



LEGENDA:

- RECIRCULAÇÃO DO PERCOLADO NO PRIMEIRO ESTÁGIO
- CIRCULAÇÃO DO PERCOLADO ENTRE O PRIMEIRO E O SEGUNDO ESTÁGIO
- EFLUENTE TRATADO
- BIOGÁS
- SUBSTRATO - RESÍDUOS SÓLIDOS

**Figura 4.15** – Aparato experimental de digestão anaeróbia e esquema de funcionamento

Diariamente, em todos os testes, foram coletados os seguintes parâmetros relativos ao biogás produzido no reator de metanogênese: volume, percentuais de metano, dióxido de carbono e

oxigênio. Nos tanques intermediário "buffer" e final, foi medido diariamente o parâmetro de pH e, de cinco em cinco dias, o parâmetro DQO.

#### 4.4.1. Protocolo de Operação dos Testes

O primeiro passo para a realização dos testes foi a inoculação do reator de metanogênese com estrume bovino. Aproximadamente 5 kg de estrume foram misturados a 30 L de água de torneira e inseridos no tanque final, sendo circulados pelo reator de metanogênese em ciclo fechado por 30 dias. Tal procedimento visou à fixação das arqueas metanogênicas no material de preenchimento do reator de metanogênese.

O segundo passo foi a obtenção do substrato, na qual cada tipo de vegetal foi pesado com o objetivo de atingir a proporção em massa descrita nas Tabelas 4.4 e 4.6, dependendo do teste. Visando a aumentar a área de contato dos resíduos com as bactérias fermentativas, o próximo passo foi a trituração manual dos mesmos até que atingissem partículas com tamanho médio de 20 - 40mm (Figura 4.16).



**Figura 4.16** – Batatas trituradas visando partículas com tamanho médio de 20 - 40 mm

Após a trituração, os resíduos foram misturados e inseridos, igualmente, nos tanques de hidrólise 1 e 2, respectivamente, conforme Figura 4.17. Concluída a inserção dos resíduos nos tanques de hidrólise, foi então iniciado o processo de digestão com prazo de 14 dias em cada teste.



**Figura 4.17** – Resíduos triturados e misturados inseridos no tanque de hidrólise

No caso do primeiro teste, foi utilizada água de torneira no tanque intermediário para servir de água de processo. Esta foi então circulada do tanque intermediário aos tanques de hidrólise retornando finalmente ao tanque intermediário várias vezes.

Tal procedimento de recirculação objetivou a percolação dos resíduos presentes nos tanques de hidrólise, permitindo a reação enzimática e microbiológica (hidrólise) com a conversão do substrato (resíduos) em uma variedade de substâncias orgânicas solúveis em água. Ao fim do processo de circulação da água de processo, obteve-se um percolado com alto teor de DQO, a ser tratada no reator de metanogênese e transformada em biogás.

Concomitantemente à hidrólise do substrato presente nos tanques, o percolado do tanque intermediário foi aplicado ao reator de metanogênese a uma taxa variável, que depende do teste realizado.

O reator de metanogênese tratou o percolado através de processo anaeróbio metanogênico, reduzindo a sua DQO e produzindo biogás. O gás gerado foi medido tanto em quantidade produzida quanto em sua composição.

O efluente tratado no tanque final após o primeiro teste foi então recirculado ao tanque intermediário para ser utilizado como água de processo para o teste seguinte. Medições de DQO e pH foram realizadas diariamente nos tanques intermediário e final, a fim de medir a estabilidade do processo.

#### 4.4.2. Configurações do Teste 1

O teste foi realizado de 21/08/2010 a 03/09/2010 e nele procurou-se simular os resíduos de agosto/2009, seguindo-se, portanto, os legumes, frutas e hortaliças expostos na Tabela 4.4 com suas devidas proporções. A Tabela 4.7 mostra que a proporção obtida na pesagem não é 100% acurada conforme Tabela 4.4, contudo, o erro apresentado é aceitável, não sendo prejudicial aos resultados da pesquisa.

Utilizando a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (UNICAMP, 2006), foi possível identificar o percentual de sólidos voláteis (SV) de cada tipo de fruta e legume. O percentual foi então multiplicado pelo peso aferido no teste, sendo encontrado o peso em SV. A soma dos SV de cada componente do teste é o  $SV_{total}$ , que no caso do teste 1 foi de 1,676 kg, para uma massa total de 20,38 kg, conforme Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 1**

RESÍDUO	SV (%)	PROPORÇÃO (%)	PESO (kg)	SV (kg)
Laranja	12,40	20,26	4,130	0,512
Repolho	4,60	45,12	9,195	0,423
Tangerina	9,70	19,16	3,905	0,379
Mamão	11,50	15,46	3,150	0,362
<b>TOTAL</b>		100	20,380	1,676

A determinação do  $SV_{total}$  permitiu estabelecer as taxas de circulação do sistema: taxa fixa de  $100 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{total} \cdot \text{dia})^{-1}$  para recirculação do percolado no primeiro estágio (hidrólise) e taxa fixa de  $7 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{total} \cdot \text{dia})^{-1}$  para a taxa de circulação do primeiro para o segundo estágio

(metanogênese), adotadas conforme experimentos anteriormente realizados pela Universidade de Cottbus - Alemanha (BTU, 2008).

Multiplicando-se as taxas de circulação pelo  $SV_{total}$ , foi encontrado o volume diário de hidrolisado a ser circulado que foi de 167,60 L.dia<sup>-1</sup> na primeira etapa e 11,73 L.dia<sup>-1</sup> da primeira para a segunda etapa.

Visando a atingir a vazão de 167,60 L.dia<sup>-1</sup> de recirculação na primeira etapa, a bomba de cavidade progressiva trabalhou nos seguintes horários, totalizando 11 minutos por dia: 12:00 a 12:03, 18:00 a 18:03, 00:00 a 00:02 e 06:00 a 06:03.

Para atingir a vazão de 11,73 L.dia<sup>-1</sup>, a bomba peristáltica 1 trabalhou nos seguintes horários, totalizando 12 minutos por dia: 13:00 a 13:03, 19:00 a 19:03, 01:00 a 01:03 e 07:00 a 07:03.

Tal operação em tempo discreto das bombas teve o objetivo de simular a situação ideal do funcionamento contínuo durante o dia, impossível de se realizar com o aparato experimental utilizado, uma vez que a vazão mínima das bombas utilizadas era muito grande para tal tarefa.

#### 4.4.3. Configurações do Teste 2

O teste foi realizado de 04/09/2010 a 17/09/2010 e nele procurou-se simular os resíduos de agosto/2009, na mesma linha do teste 1. A Tabela 4.8 mostra que a proporção obtida na pesagem não é 100% acurada conforme Tabela 4.4, contudo, o erro apresentado é aceitável, não sendo prejudicial aos resultados da pesquisa.

Utilizando a mesma metodologia adotada no teste 1, foi identificado o percentual de SV de cada tipo de vegetal. A soma dos SV de cada componente do teste é o  $SV_{total}$ , que no caso do teste 2 foi de 1,665 kg, para uma massa total de 20,32 kg, conforme a Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 2

RESÍDUO	SV (%)	PROPORÇÃO (%)	PESO (kg)	SV (kg)
Laranja	12,40	20,60	4,185	0,519
Repolho	4,60	45,72	9,290	0,427
Tangerina	9,70	18,63	3,785	0,367
Mamão	11,50	15,06	3,060	0,352
<b>TOTAL</b>		100	20,320	1,665

As taxas de circulação do sistema foram as mesmas adotadas no teste 1. Multiplicando-se as taxas de circulação pelo  $SV_{total}$ , foi encontrado o volume diário de hidrolisado a ser circulado, que foi de 166,53 L.dia<sup>-1</sup> na primeira etapa e 11,66 L.dia<sup>-1</sup> da primeira para a segunda etapa.

Visando a atingir o volume de 166,53 L.dia<sup>-1</sup> de recirculação na primeira etapa, a bomba de cavidade progressiva trabalhou nos mesmos horários utilizados no teste 1. Para atingir o volume de 11,66 L.dia<sup>-1</sup>, a bomba peristáltica 1 também trabalhou nos mesmos horários utilizados no teste 1.

#### 4.4.4. Configurações do Teste 3

O teste foi realizado de 18/09/2010 a 01/10/2010 e nele procurou-se simular os resíduos de dezembro/2009, seguindo-se, portanto, os legumes, frutas e hortaliças expostos na Tabela 4.6 com suas devidas proporções. A Tabela 4.9 mostra que a proporção obtida na pesagem não é 100% acurada conforme Tabela 4.6, contudo, o erro apresentado é aceitável, não sendo prejudicial aos resultados da pesquisa.

Utilizando a mesma metodologia adotada nos testes anteriores, foi identificado o percentual de SV de cada tipo de vegetal. A soma dos SV de cada componente do teste é o  $SV_{total}$ , que no caso do teste 3 foi de 2,866 kg, para uma massa total de 15,02 kg, conforme Tabela 4.9.

**Tabela 4.9** – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 3

RESÍDUO	SV (%)	PROPORÇÃO (%)	PESO (kg)	SV (kg)
Banana	27,42	44,41	6,67	1,829
Mamão	11,50	25,00	3,76	0,432
Batata Inglesa	16,40	13,52	2,03	0,333
Cebola	10,60	17,08	2,57	0,272
<b>TOTAL</b>		100	15,02	2,866

As taxas de circulação do sistema foram as mesmas adotadas nos testes anteriores. Multiplicando-se as taxas de circulação pelo  $SV_{total}$ , foi encontrado o volume diário de hidrolisado a ser circulado, que foi de 286,55 L.dia<sup>-1</sup> na primeira etapa e 20,06 L.dia<sup>-1</sup> da primeira para a segunda etapa.

Visando a atingir o volume de 286,55 L.dia<sup>-1</sup> de recirculação na primeira etapa, a bomba de cavidade progressiva trabalhou nos seguintes horários, totalizando 11 minutos por dia: 12:00 a 12:03, 16:00 a 16:03, 20:00 a 20:03, 00:00 a 00:03, 04:00 a 04:03 e 08:00 a 08:03.

Para atingir o volume de 20,06 L.dia<sup>-1</sup>, a bomba peristáltica 1 trabalhou nos seguintes horários, totalizando 12 minutos por dia: 13:00 a 13:03, 17:00 a 17:03, 21:00 a 21:04, 01:00 a 01:03, 05:00 a 05:03 e 09:00 a 09:04.

#### 4.4.5. Configurações do Teste 4

O teste foi realizado de 02/10/2010 a 15/10/2010 e nele procurou-se simular os resíduos de dezembro/2009, na mesma linha do teste 3. A Tabela 4.10 mostra que a proporção obtida na pesagem não é 100% acurada conforme tabela 4.6, contudo, o erro apresentado é aceitável, não sendo prejudicial aos resultados da pesquisa..

Utilizando a mesma metodologia adotada no testes anteriores, foi identificado o percentual de SV de cada tipo de vegetal. A soma dos SV de cada componente do teste é o SV<sub>total</sub>, que no caso do teste 4 foi de 2,882 kg, para uma massa total de 15,10 kg, conforme tabela 4.10.

**Tabela 4.10** – Proporção em massa utilizada no resíduo simulado do Teste 4

RESÍDUO	SV (%)	PROPORÇÃO (%)	PESO (kg)	SV (kg)
Banana	27,42	44,50	6,72	1,843
Mamão	11,50	24,87	3,76	0,432
Batata Inglesa	16,40	13,44	2,03	0,333
Cebola	10,60	17,19	2,60	0,275
<b>TOTAL</b>		100	15,10	2,882

As taxas de circulação do sistema foram as mesmas adotadas no teste 3. Multiplicando-se as taxas de circulação pelo SV<sub>total</sub>, foi encontrado o volume diário de hidrolisado a ser circulado, que foi de 288,24 L.dia<sup>-1</sup> na primeira etapa e 20,18 L.dia<sup>-1</sup> da primeira para a segunda etapa.

Visando a atingir o volume de 288,24 L.dia<sup>-1</sup> de recirculação na primeira etapa, a bomba de cavidade progressiva trabalhou nos mesmos horários utilizados no teste 3. Para atingir o volume de 20,18 L.dia<sup>-1</sup>, a bomba peristáltica 1 também trabalhou nos mesmos horários utilizados no teste 3.

#### 4.4.6. Resumo das Configurações dos Testes

A Tabela 4.11 mostra o resumo com as principais configurações dos testes apresentados.

**Tabela 4.11** – Principais configurações dos testes realizados

ITEM	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	TESTE 4
PESO TOTAL (kg)	20,38	20,32	15,02	15,10
SV <sub>total</sub> (kg)	1,676	1,665	2,866	2,882
TAXA RECIRC. 1ª ETAPA [L.(kgSV.dia) <sup>-1</sup> ]	100,00	100,00	100,00	100,00
VOL. RECIRCULADO 1ª ETAPA (L)	167,60	166,53	286,55	288,24
TAXA CIRC. 2ª ETAPA [L.(kgSV.dia) <sup>-1</sup> ]	7,00	7,00	7,00	7,00
VOL. CIRCULADO 2ª ETAPA (L)	11,73	11,66	20,06	20,18

#### 4.5. Cálculo da Produção de Energia

Para que se possa fazer uma estimativa da produção total de energia elétrica e térmica possível através da biodigestão dos resíduos da CEASAMINAS, é necessário considerar que os meses de agosto/2009 e dezembro/2009 podem representar todo o ano de 2009 em composição, uma vez que representam os extremos de geração de SV.

Denominado %SVAg, o percentual de SV do mês de agosto foi encontrado dividindo-se o total em SV recebidos pelo PRODAL nesse mês dividido pela massa total de resíduos recebidos no mesmo mês (Tabela 4.2). Analogamente, denominado %SVDz, o percentual de SV do mês de dezembro foi encontrado dividindo-se o total em SV recebidos pelo PRODAL nesse mês dividido pela massa total de resíduos recebidos neste mesmo mês (Tabela 4.2).

As variáveis %SVAg e %SVDz foram então multiplicadas pela massa total de resíduos produzida pela CEASAMINAS em agosto e dezembro/2009, respectivamente (Tabela 4.1), encontrando-se o total em SV contido nesses resíduos.

Isso posto, foi somado o total de SV dos meses citados, encontrando-se a massa total de SV do universo de resíduos considerados (agosto e dezembro/2009) para representar os resíduos da CEASAMINAS de 2009.

Dividiu-se então o total de SV dos meses de agosto e dezembro pela soma dos dois, visando a encontrar o peso de cada deles em uma média ponderada. Após encontrar o peso de cada um

dos meses escolhidos, foi então calculado o potencial de produção de biogás unitário, em  $\text{LBiogás.kgSV}^{-1}$ , para cada um dos testes realizados.

Os resultados encontrados em  $\text{LBiogás.SV}^{-1}$  foram então multiplicados pelo peso correspondente ao mês testado (agosto/2009 ou dezembro/2009) a fim de encontrar um resultado médio (média ponderada) que represente todo o ano de 2009. Os cálculos foram realizados conforme as equações abaixo:

$$V_{\text{médio}} = PSVAg * VAg + PSVDz * VDz \quad \text{Eq. 4.1}$$

Na qual:

$V_{\text{médio}}$  Volume médio, em  $\text{LBiogás.kgSV}^{-1}$ , gerado pelos resíduos simulados da CEASAMINAS em 2009;

$PSVAg$  Peso dos resíduos do mês de agosto/2009 na média ponderada com o mês de dezembro/2009;

$VAg$  Volume unitário em  $\text{LBiogás.kgSV}^{-1}$  do mês de agosto/2009 calculado como a média do volume unitário em  $\text{LBiogás.kgSV}^{-1}$  dos testes 1 e 2;

$PSVDz$  Peso dos resíduos do mês de dezembro/2009 na média ponderada com o mês de agosto/2009;

$VDz$  Volume unitário em  $\text{LBiogás.kgSV}^{-1}$  do mês de dezembro/2009 calculado como a média do volume unitário em  $\text{LBiogás.kgSV}^{-1}$  dos testes 3 e 4;

Para encontrar a produção unitária de metano por kgSV, foi necessário multiplicar  $V_{\text{médio}}$  pelo percentual médio de metano que foi encontrado conforme Eq. 4.2.

$$\%CH_4_{\text{médio}} = PSVAg * \%CH_4Ag + PSVDz * \%CH_4Dz \quad \text{Eq. 4.2}$$

Na qual:

$\%CH_4médio$  Percentual de metano médio encontrado no biogás gerado pelos resíduos simulados da CEASAMINAS em 2009;

$PSVAg$  Peso dos resíduos do mês de agosto/2009 na média ponderada com o mês de dezembro/2009;

$\%CH_4Ag$  Percentual de metano do mês de agosto/2009 calculado como a média dos percentuais de metano dos testes 1 e 2;

$PSVDz$  Peso dos resíduos do mês de dezembro/2009 na média ponderada com o mês de agosto/2009;

$\%CH_4Dz$  Percentual de metano do mês de dezembro/2009, calculado como a média dos percentuais de metano dos testes 3 e 4.

Multiplicando-se  $Vmédio$  por  $\%CH_4médio$  foi possível encontrar a produção unitária de metano por kgSV ( $VCH_4médio$ ) em  $LCH_4.kgSV^{-1}$ .

Por fim, para se encontrar a energia total unitária média possível de ser produzida, multiplicou-se  $VCH_4médio$  pelo poder calorífico do metano puro ( $11,17 \text{ kWh.Nm}^{-3}$  Atkins, (1987)) obtendo-se finalmente a  $Emédia$ , em  $kWh.kgSV^{-1}$ .

A energia média ( $Emédia$ ) encontrada foi então multiplicada pela eficiência do gerador adotada, de 33%, para encontrar-se a  $Eemédia$ , que é a energia elétrica unitária média. Os outros 67% são a  $Etmédia$ , ou energia térmica unitária média.

Visando a encontrar o total de SV produzidos pela CEASAMINAS em 2009, foi necessário encontrar primeiro o percentual médio de SV nos resíduos, calculados conforme a Eq. 4.3.

$$\%SVmédio = PSVAg * \%SVAg + PSVDz * \%SVDz \quad \text{Eq. 4.3}$$

Na qual:

$\%SVmédio$  Percentual médio de SV dos produtos recebidos pelo PRODAL em 2009;

<i>PSVA<sub>g</sub></i>	Peso dos resíduos do mês de agosto/2009 na média ponderada com o mês de dezembro/2009;
<i>%SVA<sub>g</sub></i>	Percentual de SV do mês de agosto/2009, calculado dividindo-se o total em SV recebidos pelo PRODAL nesse mês, dividido pela massa total de resíduos recebidos no mesmo mês (Tabela 4.2);
<i>PSVD<sub>z</sub></i>	Peso dos resíduos do mês de dezembro/2009 na média ponderada com o mês de agosto/2009;
<i>%SVD<sub>z</sub></i>	Percentual de SV do mês de dezembro/2009, calculado dividindo-se o total em SV recebidos pelo PRODAL nesse mês, dividido pela massa total de resíduos recebidos no mesmo mês (Tabela 4.2).

Obtido *%SV<sub>médio</sub>*, tal valor foi multiplicado pelo total de resíduos gerados na CEASAMINAS em 2009 visando a encontrar a massa total SV nesses resíduos.

Para encontrar a energia elétrica e térmica total possível de ser produzida com os resíduos (*E<sub>total</sub>* e *E<sub>ttotal</sub>*), tanto a *E<sub>média</sub>* quanto a *E<sub>tmédia</sub>* foram multiplicadas pelo total de SV produzidos pela CEASAMINAS no ano de 2009.

Ao se considerar que o ano padrão tem 8760 horas, dividiu-se a *E<sub>total</sub>* e a *E<sub>ttotal</sub>* pelas referidas horas, sendo então possível encontrar a potência térmica (*P<sub>ttotal</sub>*) e elétrica (*P<sub>etotal</sub>*) total possível de ser gerada com os resíduos da CEASAMINAS.

#### **4.6. Emissões de Carbono Evitadas – Créditos de Carbono**

Para o cálculo das emissões de carbono possíveis de serem evitadas com a implantação do processo de digestão anaeróbia a fim de processar os resíduos da CEASAMINAS, foram utilizadas ferramentas metodológicas da UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change).

Em um primeiro momento, foi calculada a linha de base, ou *baseline*, que representa a quantidade de metano emitida em tCO<sub>2</sub>e pelos resíduos da CEASAMINAS quando enviados e depositados no aterro de Contagem-MG.

Para o cálculo da linha de base foi utilizada ferramenta metodológica denominada *Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site* (UNFCCC, 2010a). A ferramenta metodológica em questão é baseada em um modelo de decaimento de primeira ordem, que diferencia entre diferentes tipos de resíduos com taxas de decaimento respectivamente diferentes e diferentes frações de carbono orgânico degradável.

O modelo calcula a geração de CH<sub>4</sub> baseado em fluxos de resíduos reais, dispostos a cada ano, começando com o primeiro ano após o começo do projeto até o fim do último ano para qual as emissões de base são calculadas (UNFCCC, 2010a).

Após o cálculo das emissões da linha de base, foi utilizada a metodologia AMS-III-AO (UNFCCC, 2010b) da UNFCCC para o cálculo da emissão de CH<sub>4</sub> evitada, em tCO<sub>2</sub>e, com a implantação do projeto de digestão anaeróbia para o processamento dos resíduos gerados na CEASAMINAS.

A metodologia compreende medidas para evitar as emissões de CH<sub>4</sub> advindas de biomassa para a atmosfera ou outro material orgânico biodegradável que, de outra forma, decairia anaerobicamente num aterro sanitário (SWDS), num sistema de gestão de resíduos advindos de animais (AWMS), ou num sistema de tratamento de efluentes sanitários (WWTS).

Por fim, a metodologia AMS-I-C (UNFCCC, 2010c) da UNFCCC foi utilizada para calcular a emissão evitada pela adição de energia renovável à rede nacional interligada.

Essa metodologia compreende o cálculo da diferença de emissão, em tCO<sub>2</sub>e, entre a produção de energia térmica e elétrica advinda da digestão anaeróbica e o fator de emissão da rede nacional interligada, divulgada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2009).

A soma da emissão de CH<sub>4</sub> evitada conforme a metodologia AMS-III-AO com a encontrada conforme metodologia AMS-I-C representou, então, o total de emissões de carbono evitadas em tCO<sub>2</sub>e para a possível implantação do projeto. O período de atividade do projeto considerado foi de 21 anos em três períodos de 7 anos, tempo máximo permitido conforme as modalidades e procedimentos para os projetos de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) contidos no Acordo de Marrakesh (UNFCCC, 2001).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Conforme já exposto, utilizando-se o aparato montado foram realizados 4 testes em laboratório com a duração de 14 dias cada, num período total de 56 dias. Os testes 1 e 2 foram feitos simulando os resíduos do mês de agosto/09, considerado o de menor potencial de produção de gás, e os testes 3 e 4 simularam os resíduos de dezembro/09, considerado o de maior potencial.

As planilhas com os resultados encontrados encontram-se no ANEXO II, sendo os mesmos apresentados a seguir.

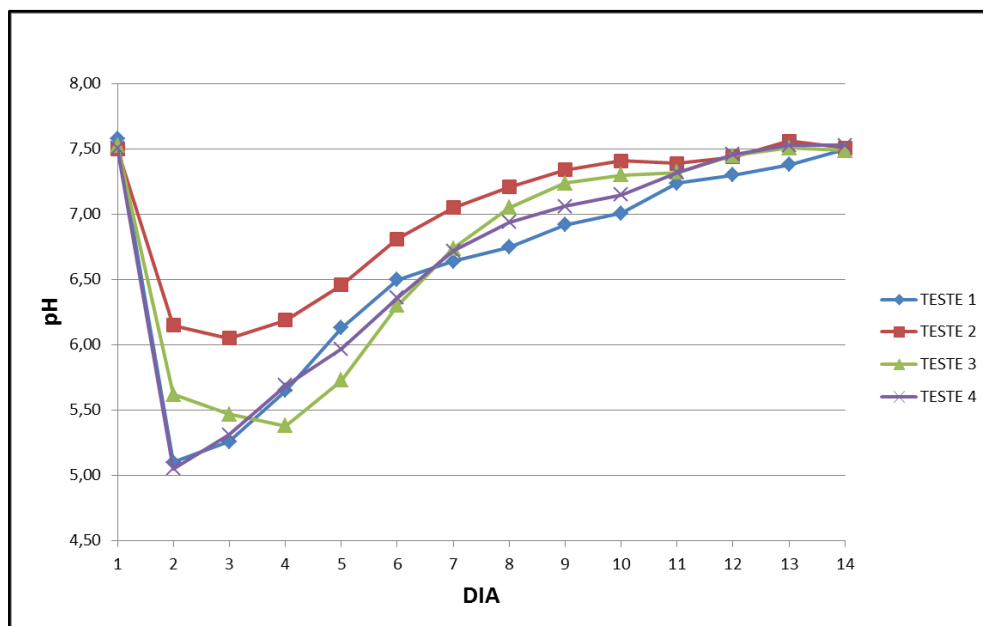
### **5.1. Medições de pH e DQO**

O percolado analisado do tanque intermediário “buffer” capta os resultados do primeiro estágio do processo, constituído pela hidrólise e pela acidogênese. A Figura 5.1 a seguir mostra as medições de pH realizadas diariamente no percolado do tanque intermediário “buffer” em todos os testes realizados.

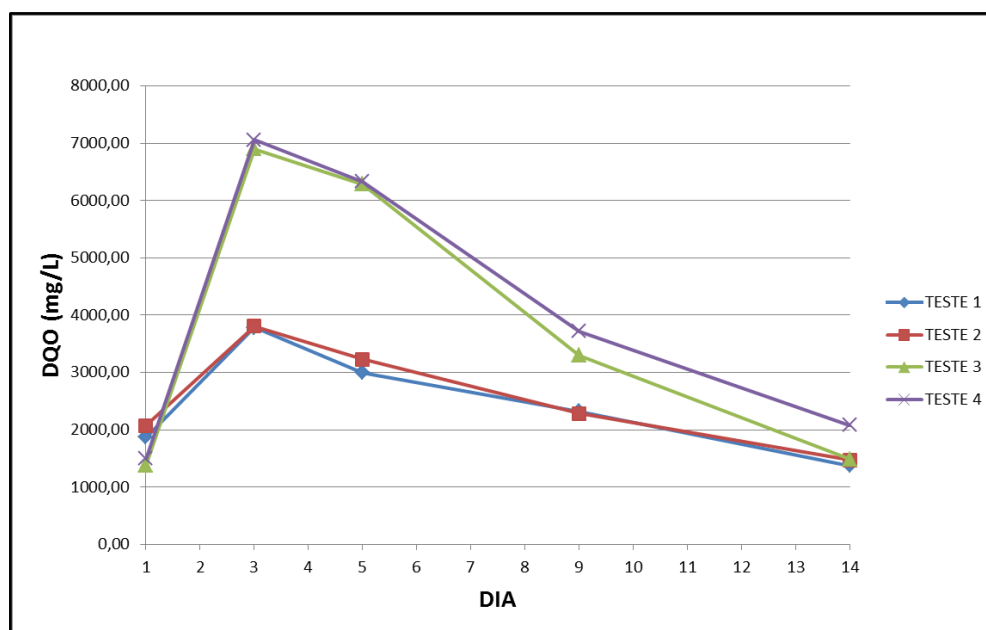
A figura mostra uma rápida queda no pH no tanque intermediário “buffer” logo no primeiro dia de experimento, em todos os testes. Isso se dá devido aos resíduos simulados da CEASAMINAS serem de degradação muito rápida, produzindo ácidos orgânicos quase que imediatamente ao início do processo.

Como se trata de um processo de ciclo fechado em que o efluente tratado retorna ao tanque intermediário, pode-se concluir que o processo manteve-se estável em todos os testes, uma vez que o pH retornou aos valores iniciais ao final do ciclo.

Isso leva a crer que toda matéria orgânica presente no percolado foi consumida pelo reator de metanogênese no segundo estágio. Para confirmar o consumo da matéria orgânica pelo reator de metanogênese, foram também realizadas medições de DQO no tanque intermediário em todos os testes (Figura 5.2).



**Figura 5.1** – Evolução do pH no tanque intermediário “buffer”



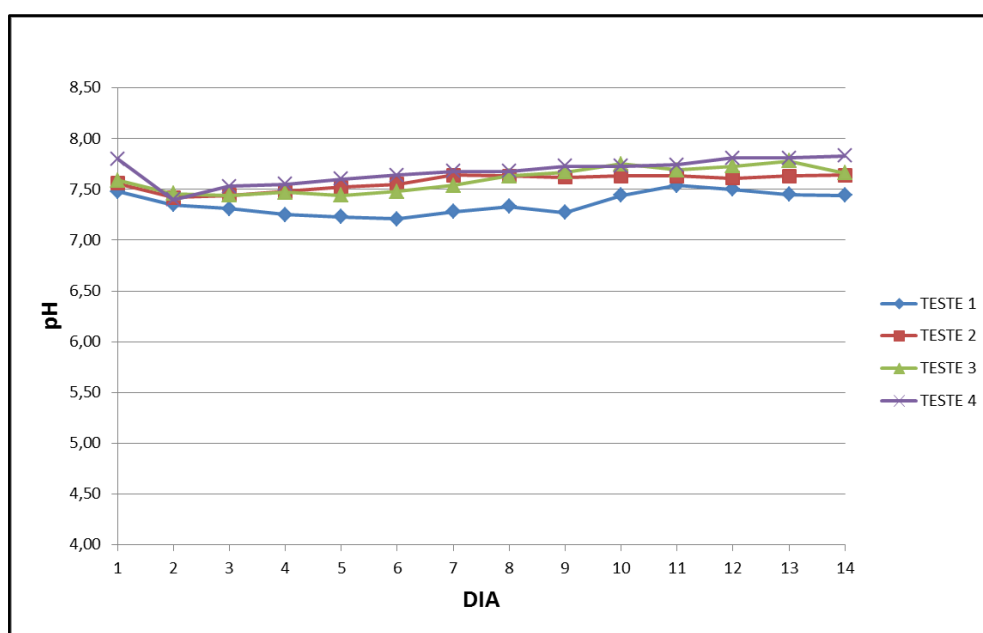
**Figura 5.2** – Evolução da DQO no tanque intermediário “buffer”

Observa-se pela Figura 5.2 que a remoção da matéria orgânica ao final dos 14 dias de experimento é quase total em todos os testes, demonstrando uma ótima eficiência do sistema no tratamento do percolado. Pavan *et al.* (2000) confirma esse fato ao citar que as condições acidogênicas foram rapidamente removidas em dois dias durante a hidrólise de resíduos de frutas e vegetais.

Nota-se também um rápido aumento da DQO nos dois primeiros dias, e depois um decréscimo contínuo até os valores iniciais. Os ácidos orgânicos não foram medidos, porém, pela indicação do pH, pode-se inferir que a curva de evolução deverá ser muito parecida com a de DQO.

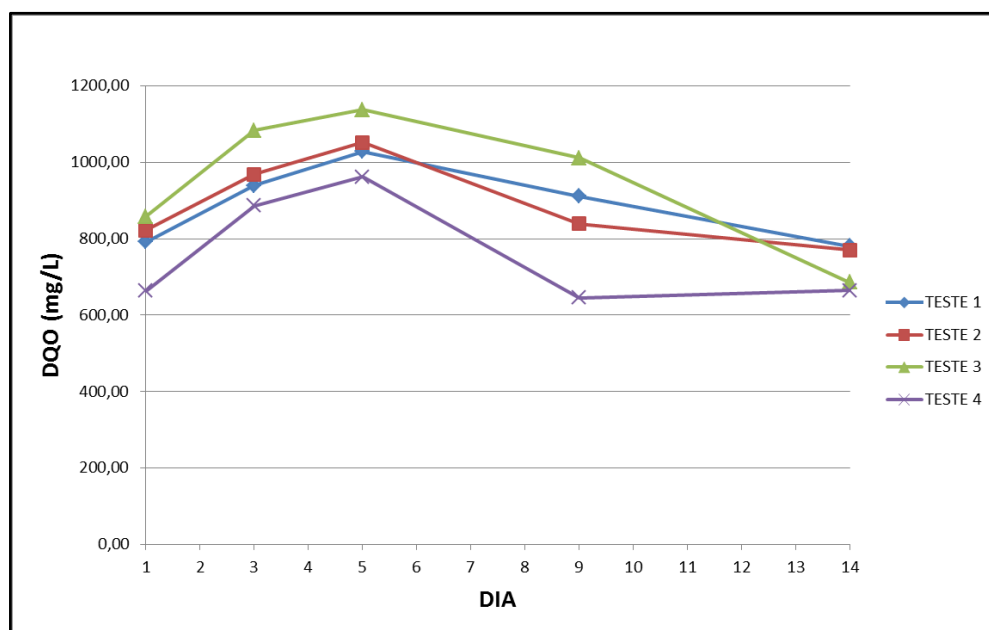
As medições realizadas no efluente do tanque final captam os resultados do segundo estágio do processo, constituído pela acetogênese e metanogênese, onde se dá a produção do biogás.

A Figura 5.3 mostra as medições de pH realizadas diariamente no percolado do tanque final em todos os testes realizados. Observa-se uma manutenção do valor do pH ao longo dos experimentos praticamente constante, entre 7,0 e 8,0, indicando uma boa estabilidade do sistema e o consumo total dos ácidos orgânicos produzidos no primeiro estágio (hidrólise e acidogênese).



**Figura 5.3** – Evolução do pH no tanque final

Para confirmar a eficiência do reator de metanogênese, medições da DQO no tanque final foram realizadas em todos os testes. A Figura 5.4 mostra que, em todos os testes, o sistema foi capaz de tratar o efluente mostrando eficiência e estabilidade, uma vez que houve relativa constância nos valores de DQO medidos ao longo dos mesmos. Tais medições mostram a capacidade do sistema de tratar o efluente gerado pela hidrólise e acidogênese dos resíduos da CEASAMINAS.



**Figura 5.4** – Evolução da DQO no tanque final

A Tabela 5.1 mostra que o sistema foi eficiente na remoção da DQO máxima presente no tanque intermediário, apresentando cerca de 90% de eficiência no caso dos testes 3 e 4 e 80% no caso dos testes 1 e 2, comparando-se com a DQO de saída no tanque final.

**Tabela 5.1** – Eficiência de tratamento do efluente pelo sistema

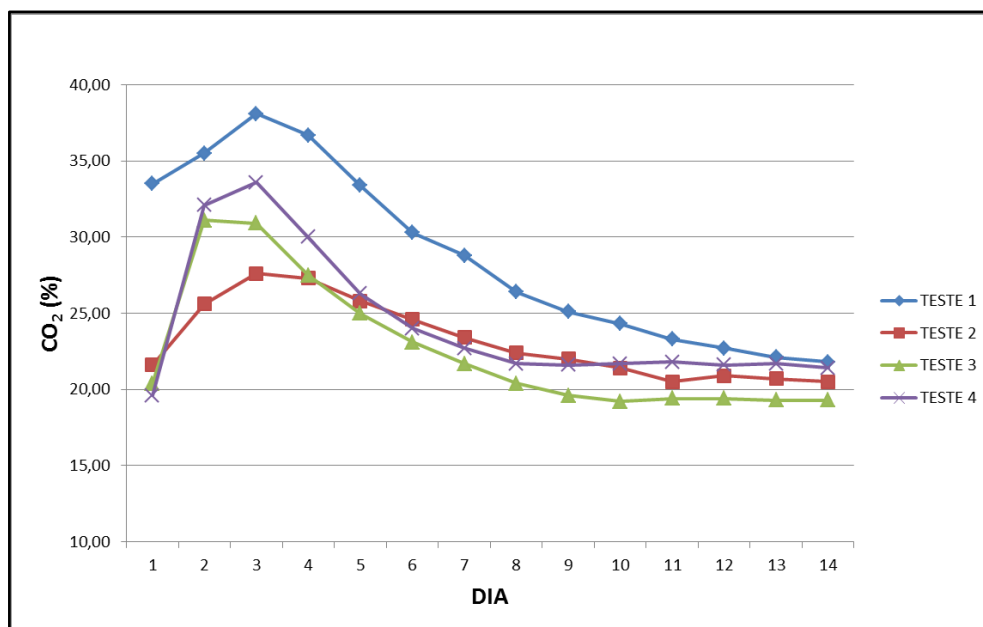
TANQUE	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	TESTE 4
INTERMEDIÁRIO (mg/L)	3.786	3.806	6.901	7.060
FINAL (mg/L)	781	770	687	665
Eficiência (%)	79,4%	79,8%	90,1%	90,6%

## 5.2. Medições de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>

Conforme já citado no item 4.4, diariamente foram medidos os percentuais de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> do biogás gerado pelo experimento.

O percentual de oxigênio contido no biogás produzido nos testes foi mínimo, bem próximo de zero. Tal resultado já era esperado, uma vez que as bactérias metanogênicas são obrigatoriamente anaeróbias, não havendo, portanto, produção nem utilização de oxigênio no processo de metanogênese.

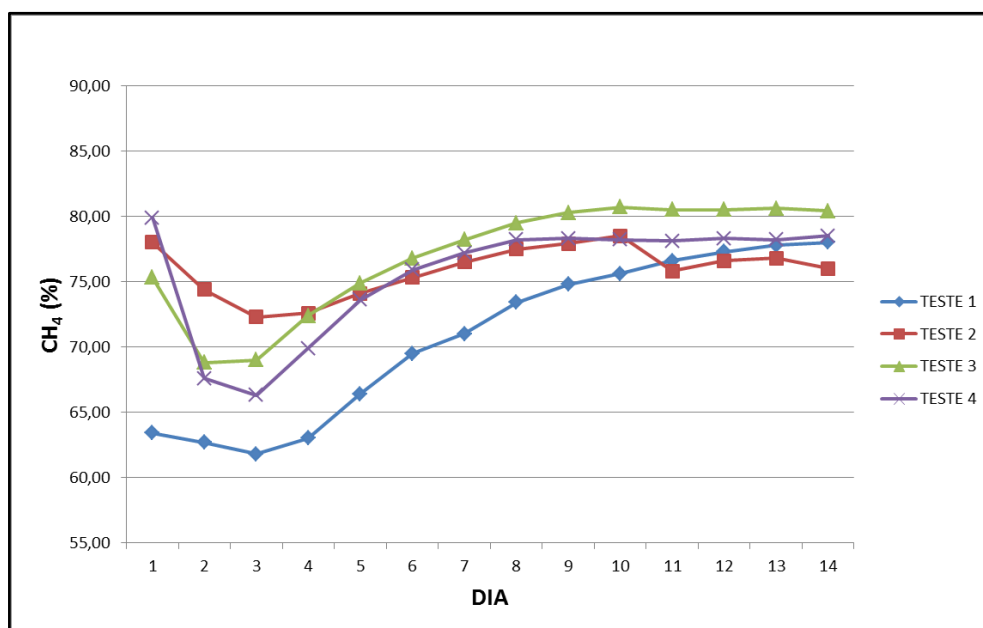
A Figura 5.5 mostra a evolução da proporção de dióxido de carbono no biogás ao longo dos testes. Observa-se um súbito aumento inicial na concentração de CO<sub>2</sub>, com a posterior queda e estabilização do percentual em cerca de 20-25%.



**Figura 5.5** – Evolução do percentual de CO<sub>2</sub> no biogás

O aumento do percentual inicial de CO<sub>2</sub> pode ser explicado por motivos biológicos, com o aumento inicial do percentual ocorrendo por causa da acetogênese, que precede a metanogênese, fase onde ocorre a produção do CO<sub>2</sub>. A exaustão dos ácidos orgânicos e o consumo de CO<sub>2</sub> pelas arqueas metanogênicas diminui a presença do CO<sub>2</sub> no biogás. Tal consumo é realizado especificamente pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que consomem H<sub>2</sub> além do CO<sub>2</sub>, produzindo o CH<sub>4</sub>.

Em caminho inverso, a Figura 5.6 mostra a queda inicial no percentual de CH<sub>4</sub> com o posterior aumento e estabilização em torno de 75-80%. Geralmente, a decomposição anaeróbica da biomassa melhora com um maior tempo de exposição (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008), fato verificado com o aumento do percentual de metano ao longo do tempo.



**Figura 5.6 – Evolução do percentual de CH<sub>4</sub> no biogás**

### **5.3. Produção de Biogás e Energia**

A Figura 5.7 mostra a evolução do volume acumulado de metano por kg de SV do substrato inserido nos reatores de hidrólise.

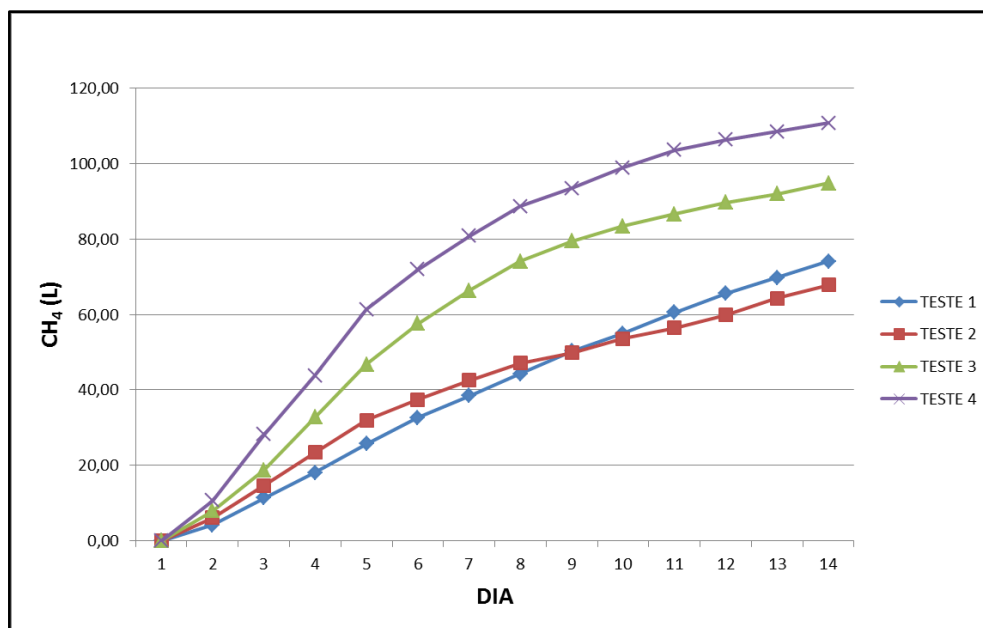
Observa-se uma evolução constante na quantidade de metano produzida por kg de SV, uma vez que ao final do teste 1 foi possível produzir um total de 74,06 LCH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup> e ao final do teste 4, um total de 110,76 LCH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup>.

Tal evolução se deve ao “amadurecimento” do reator de metanogênese com uma evolução na quantidade de arqueas metanogênicas (biofilme) fixadas nas peças plásticas contidas no reator, bem como a maior adaptação das mesmas ao percolado aplicado ao reator.

No entanto, o valor de 110,76 LCH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup> ainda é considerado baixo se comparado aos valores padrão encontrados em bibliografia para a produção de metano por kg de SV. Tal resultado provavelmente pode ser atribuído à pouca idade do reator de metanogênese.

Utilizando reator de bateladas e estágio único, Rajeshwari *et. al.* (1998) conseguiu produzir 160 LCH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup> em experimento realizado durante 47 dias com mistura de resíduos vegetais.

Claramente, trata-se de período de residência maior do que os 14 dias utilizados no presente experimento, produzindo melhores resultados.



**Figura 5.7** – Evolução do volume acumulado de CH<sub>4</sub> por kg de SV

Já VERRIER *et. al.* (1987) verificou a produção de 420 LCH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup> utilizando um sistema de duplo estágio similar ao deste experimento, para digestão de resíduos vegetais. Como se pode observar, trata-se de uma taxa de produção bem acima da verificada neste experimento, contudo, o experimento citado trabalhou em condições termofílicas, que aceleram os processos de degradação da matéria orgânica e produção de biogás.

Tal condição de trabalho requer, porém, uma maior energia para o aquecimento do reator de metanogênese, uma vez que a temperatura ótima de trabalho é de cerca de 55° C (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com o item 4.5 apresentado, visando a calcular o potencial de produção de energia unitária média com os resíduos da CEASAMINAS (*Emédia*), é necessário realizar os cálculos conforme a Eqs. 4.1 e 4.2. Para tanto, é preciso encontrar as variáveis  $V_{médio}$  e  $\%CH_4_{médio}$ , além de conhecer o poder calorífico do metano puro.

Conforme a Tabela 5.2, para o mês de menor potencial de produção de biogás (agosto/2009), os testes 1 e 2 mostraram que é possível produzir entre 106,40 L e 91,10 L de biogás para cada quilograma de SV introduzido no primeiro estágio.

No caso do mês de maior potencial de produção de biogás (dezembro/2009), os testes 3 e 4 mostraram que é possível produzir entre 126,87 L e 153,30 L de biogás para cada quilo de SV introduzido no primeiro estágio.

**Tabela 5.2** – Resultados dos testes 1 a 4 para produção de energia na forma de biogás

ITEM	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	TESTE 4
<b>Volume Total de Biogás (L)</b>	178,33	151,68	363,61	441,81
<b>Volume Total de CH<sub>4</sub> (L)</b>	124,13	113,00	271,60	319,20
<b>Percentual Médio de Metano</b>	69,61%	74,50%	74,70%	72,25%
<b>%CH<sub>4</sub>Ag e %CH<sub>4</sub>Dz</b>	72,05%		73,47%	
<b>Volume de Biogás/kgSV (LBiogás/kgSV)</b>	106,40	91,10	126,87	153,30
<b>Vag e VDz (LBiogás/KgSV)</b>	98,75		140,08	
<b>Volume de CH<sub>4</sub>/kgSV (L/kgSV)</b>	74,06	67,87	94,77	110,76

Para encontrar  $V_{médio}$ , conforme a Eq. 4.1, é necessário conhecer  $PSVA_g$  e  $PSVD_z$ , além de  $VA_g$  e  $VD_z$ .

Conforme a tabela 4.2, em agosto/2009 o PRODAL recebeu 87.552 kg de produtos que equivalem a 8.365,20 kg de SV. Para encontrar  $PSVA_g$  e  $PSVD_z$ , divide-se a quantidade de produtos pelo total de SV e encontra-se que  $\%SVA_g$  é igual a 9,52%. Em dezembro/2009 o PRODAL recebeu 195.657 kg de produtos que equivalem a 27.769,20 kg de SV. Dividindo-se a quantidade de produtos pelo total de SV, encontra-se que  $\%SVD_z$  é 14,19%.

Multiplicando-se os percentuais encontrados de  $\%SVA_g$  e  $\%SVD_z$  pela quantidade de resíduos produzidos pela CEASAMINAS em agosto e dezembro/2009 mostrados na Tabela 4.1, encontra-se o total de SV, que foi de 68,07 t e 223,01 t em cada um dos meses, respectivamente.

Dividindo-se cada valor total SV de cada mês pela soma dos dois, observa-se que o mês de agosto/2009 tem um peso de 0,2338 ( $PSVA_g$ ), enquanto dezembro/2009 tem um peso de

0,7662 ( $PSVD_z$ ). Os valores de  $V_{Ag}$  e  $VD_z$  foram encontrados utilizando-se os dados da Tabela 5.1, alcançando  $98,75 \text{ LBiogás.kgSV}^{-1}$  e  $140,08 \text{ LBiogás.kgSV}^{-1}$  respectivamente.

Utilizando as variáveis encontradas na Eq. 4.1, verificou-se que  $V_{\text{médio}} = 130,41 \text{ LBiogás.kgSV}^{-1}$ . Para encontrar  $\%CH_{\text{médio}}$ , realizou-se os cálculos conforme a Eq. 4.2, alcançando-se 73,13%.

Multiplicando-se  $V_{\text{médio}}$  por  $\%CH_{\text{médio}}$  foi então possível encontrar a produção unitária de metano por kgSV ( $VCH_{\text{médio}}$ ), que chegou a  $95,37 \text{ LCH}_4\text{.kgSV}^{-1}$ . Para encontrar  $E_{\text{média}}$ , conforme item 4.5, multiplicou-se o  $VCH_{\text{médio}}$  por  $11,17 \text{ kWh.Nm}^{-3}$  (ATKINS, 1987), encontrando-se o valor de  $1,07 \text{ kWh/kgSV}$ .

Visando a encontrar  $E_{\text{emédia}}$  (Energia elétrica unitária média),  $E_{\text{média}}$  foi multiplicada pela eficiência do gerador adotada, que é de 33%. Portanto,  $E_{\text{emédia}}$  foi calculada em  $0,353 \text{ kWh.kgSV}^{-1}$ . Por sua vez,  $E_{\text{tmédia}}$  (Energia térmica unitária média) é a energia restante, sendo calculada em  $0,717 \text{ kWh.kgSV}^{-1}$ .

Para se encontrar o percentual médio de SV ( $\%S_{\text{vmédio}}$ ) dos resíduos da CEASAMINAS, foram realizados cálculos conforme a Eq. 4.3, atingindo 13,10%.

De acordo com CEASAMINAS (2010a), em 2009 a CEASAMINAS produziu um total de 11.608.000 kg de resíduos. De acordo com percentual médio de SV encontrado (13,10%), pode-se concluir que um total de 1.520.640 kgSV estavam disponíveis neste período.

Para encontrar  $E_{\text{etotal}}$  e  $E_{\text{ttotal}}$ , multiplicou-se então  $E_{\text{emédia}}$  e  $E_{\text{tmédia}}$  pelo total de SV produzido pela CEASAMINAS em 2009. Portanto,  $E_{\text{etotal}} = 536.786 \text{ kWh}$  e  $E_{\text{ttotal}} = 1.090.299 \text{ kWh}$ .

Levando-se em conta que o ano padrão tem o equivalente a 8760 horas, dividindo-se  $E_{\text{etotal}}$  e  $E_{\text{ttotal}}$  por este número de horas é possível encontrar a  $P_{\text{etotal}}$  (Potência elétrica total) e (Potência térmica total)  $P_{\text{ttotal}}$ . Portanto,  **$P_{\text{etotal}} = 61,27 \text{ kW}$**  e  **$P_{\text{ttotal}} = 124,46 \text{ kW}$** .

#### **5.4. Créditos de Carbono**

Conforme já mencionado no item 4.6, para o cálculo dos créditos de carbono possíveis de serem obtidos ao não se destinar resíduos orgânicos ao aterro de Contagem-MG foi utilizada

ferramenta metodológica da UNFCCC denominada “Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site” (UNFCCC, 2010a).

Foram realizados os cálculos conforme a Eq. 3.4, visando a obter a linha de base de emissões de metano que, na ausência do projeto, seriam dispostos no aterro de Contagem-MG.

Para a atribuição de valores às variáveis da Eq. 3.4., foi considerado que o resíduo é homogêneo advindo de restos de alimentos, sendo o aterro de Contagem-MG considerado como sanitário, com queima parcial do gás. Para os fins do projeto, foram considerados três períodos de 7 anos, totalizando 21 anos.

Conforme a ferramenta de cálculo (UNFCCC, 2010a), a Tabela 5.3 mostra os parâmetros adotados para a Eq. 3.4.

**Tabela 5.3** – Parâmetros adotados para a Eq. 3.4

<b>PARÂMETRO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>	<b>VALOR</b>
$\phi$	Fator de correção do modelo para considerar incertezas	0,9
$f$	Fração de metano que seria capturada no aterro em questão	0,5
$GWP_{CH_4}$	Potencial de aquecimento global do metano	21
$OX$	Fator de oxidação, refletindo a proporção do metano formado no aterro que é oxidada em sua superfície	0,1
$F$	Proporção de metano no gás do aterro	0,5
$DOC_f$	Proporção do carbono orgânico degradável que é decomposto no aterro sanitário	0,5
$MCF$	Fator de correção do metano	1,0
$DOC_j$	Fração de carbono orgânico degradável (por peso, em t) presente no resíduo tipo $j$	0,15
$k_j$	Taxa de decaimento para o resíduo tipo $j$	0,40
$W_{jx}$	Massa anual de resíduos (t) do tipo $j$ que é destinado ao aterro	11608,00

Somando-se as emissões evitadas em todos os anos do projeto (1 a 21), conforme verificado na Tabela 5.4, obtém-se o total de 12.090 tCO<sub>2</sub>e que servirá de linha de base para os cálculos a serem realizados nos próximos passos.

Com a linha de base calculada, utiliza-se a metodologia AMS-III-AO (UNFCCC, 2010b) da UNFCCC para o cálculo da emissão de CH<sub>4</sub> evitada em tCO<sub>2</sub>e com a implantação do projeto de digestão anaeróbia para o processamento dos resíduos gerados na CEASAMINAS.

Os cálculos foram realizados conforme Eq. 3.5, e, nesse caso específico, co-substratos não foram utilizados, assim como não há legislação específica limitando a emissão de metano na atmosfera. Com isso, apenas o termo  $BE_{SWDS,y}$  da equação não é igual a zero.

Portanto, como não existem emissões a deduzir, os valores encontrados na Tabela 5.4 representam o “baseline” da emissão evitada de metano em tCO<sub>2</sub>e com a implantação do projeto de digestão anaeróbia para o processamento dos resíduos gerados na CEASAMINAS.

**Tabela 5.4 – Linha de base em emissões evitadas de metano para cada ano do projeto**

EMISSIONES DA LINHA DE BASE																					
x/y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09	9,88	9,74	9,64	9,58	9,54	9,51
2	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09	9,88	9,74	9,64	9,58	9,54
3	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09	9,88	9,74	9,64	9,58
4	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09	9,88	9,74	9,64
5	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09	9,88	9,74
6	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09	9,88
7	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40	10,09
8	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87	10,40
9	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56	10,87
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60	11,56
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16	12,60
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47	14,16
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92	16,47
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07	19,92
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76	25,07
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22	32,76
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32	44,22
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83	61,32
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89	86,83
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66	124,89
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181,66
<b>TOTAIS</b>	<b>181,66</b>	<b>306,55</b>	<b>393,38</b>	<b>454,70</b>	<b>498,92</b>	<b>531,67</b>	<b>556,75</b>	<b>576,67</b>	<b>593,14</b>	<b>607,29</b>	<b>619,90</b>	<b>631,46</b>	<b>642,33</b>	<b>652,73</b>	<b>662,82</b>	<b>672,69</b>	<b>682,43</b>	<b>692,07</b>	<b>701,65</b>	<b>711,18</b>	<b>720,69</b>

Conforme a metodologia AMS-III-AO (UNFCCC, 2010b), ainda é necessário calcular as emissões da atividade do projeto, sendo aquelas advindas das atividades intermediárias desenvolvidas com fulcro na consecução do projeto. Tal cálculo foi realizado conforme Eq. 3.6.

Para fins de simplificação, as emissões da atividade do projeto foram consideradas iguais a 5% do valor total da *baseline* do projeto. Isso porque no caso da implementação do projeto em escala industrial, não haveria qualquer incremento de transporte de materiais, os resíduos sólidos do processo seriam utilizados como adubo não gerando metano adicional, o vazamento padrão considerado é de 5% AMS-III-AO (UNFCCC, 2010b) e a queima de metano seria considerada com eficiência de 100%.

Com o vazamento padrão, subtraiu-se então 5% do metano evitado encontrado anteriormente (12.090 tCO<sub>2</sub>e), levando o valor final das emissões evitadas de metano conforme metodologia AMS-III-AO (UNFCCC, 2010b) a **11.485,50 tCO<sub>2</sub>e**.

Por fim, para o cálculo da emissão de carbono evitada pela adição de energia renovável à rede nacional interligada, foi utilizada a metodologia AMS-I-C (UNFCCC, 2010c) da UNFCCC. Visando à simplificação dos cálculos, tanto a energia elétrica quanto a térmica tiveram sua origem considerada como advinda da rede nacional interligada. A linha de base, ou “*baseline*”, foi calculada conforme a Eq. 3.7.

Para o cálculo de  $EG_{BL,y}$ , foi necessário calcular a quantidade de energia possível de produzir com os resíduos da CEASAMINAS no ano de 2009. Com os dados do item 5.3, pode-se afirmar que em 2009 foi possível produzir uma energia total de 1.627.085 Kwh com os resíduos da CEASAMINAS, sendo 536.786 Kwh de energia elétrica ( $E_{etotal}$ ) e 1.090.299 Kwh de energia térmica ( $E_{ttotal}$ ). Nesse caso,  $EG_{BL,y}$  foi considerado como 1.627.085 Kwh.

Visando à simplificação dos cálculos, tanto a energia elétrica quanto a térmica tiveram sua origem considerada como advinda da rede nacional interligada. Foi considerado que a energia térmica produzida será utilizada, em igual montante, em substituição a alguma atividade que antes empregava energia elétrica da rede para produzir calor. Foi ainda descontado um total de 15% da energia produzida, sendo esta a energia estimada ao funcionamento de todo o projeto.

O fator de emissão do sistema nacional interligado ( $EF_{CO_2}$ ) é publicado pelo MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia) diariamente. Para o ano de 2009, conforme Brasil (2009), o fator médio de emissão da rede nacional interligada foi de 0,0794 tCO<sub>2</sub>e.MWh<sup>-1</sup>, sendo este então o valor considerado para  $EF_{CO_2}$ .

Portanto, as emissões de linha de base para o projeto no ano de 2009 foram consideradas como a multiplicação de  $EG_{BL,y}$  e  $EF_{CO_2} * 0,85$ , levando a um valor final de 109,81 tCO<sub>2</sub>e. Ao levar em conta um projeto de 21 anos, considera-se então o valor 21 vezes maior, de **2.306,01 tCO<sub>2</sub>e**.

Somando-se as emissões evitadas de carbono tanto pela não emissão quanto pela substituição por energia mais limpa advinda de biomassa, observa-se que, considerando-se um prazo de 21 anos, a implantação do projeto seria capaz de evitar o lançamento de **13.791,51 tCO<sub>2</sub>e** na atmosfera.

Caso o projeto seja enquadrado como um projeto MDL, as **13.791,51 tCO<sub>2</sub>e** se transformarão em créditos de carbono ou CER's, que poderão ser comercializadas no mercado.

## 6. CONCLUSÕES

Diante dos dados obtidos com a pesquisa, conclui-se que a implantação de um tratamento em reator anaeróbio de duplo estágio para o tratamento dos resíduos sólidos da CEASAMINAS é tecnicamente viável.

Os experimentos mostraram que, com os resíduos gerados pela CEASAMINAS em seu entreposto de Contagem-MG, é possível produzir 130,41 LBiogás.kgSV<sup>-1</sup> com um percentual médio de CH<sub>4</sub> de 73,13%.

Com tais condições aliadas a um motor com eficiência de 33%, verificou-se que é possível a produção média anual de 536.786 kWh de energia elétrica e 1.090.299 kWh de energia térmica com os resíduos. Com tal disponibilidade energética, a instalação de um motor CHP de 61,27 kW trabalhando 24h / dia é possível, ainda com a recuperação de 124,46 kW de potência em calor gerado.

Também foi demonstrado com os dados que com a implantação do projeto na CEASAMINAS, poder-se-ia evitar a emissão de 13.791,51 tCO<sub>2</sub>e para a atmosfera em um prazo de 21 anos, sendo esse um número bastante significativo.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Os números apresentados na pesquisa são animadores, uma vez que o prazo dos experimentos foi demasiado curto e o reator de metanogênese não havia ainda atingido sua máxima eficiência. Tendo isso em mente e visando a maximizar a produção de biogás, recomenda-se a realização de novos experimentos com os seguintes procedimentos:

- Inocular o reator de metanogênese com estrume de vaca ou lodo de ETE e ambientar as bactérias presentes ao substrato a ser utilizado por um prazo de 90 dias, realizando bateladas seguidas;
- Variar a taxa de recirculação do primeiro estágio de  $50 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{\text{total}} \cdot \text{dia})^{-1}$  a  $200 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{\text{total}} \cdot \text{dia})^{-1}$  em incrementos de  $10 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{\text{total}} \cdot \text{dia})^{-1}$ ;
- Variar a taxa de circulação do primeiro para o segundo estágio de  $5 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{\text{total}} \cdot \text{dia})^{-1}$  a  $50 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{\text{total}} \cdot \text{dia})^{-1}$  em incrementos de  $5 \text{ L} \cdot (\text{kgSV}_{\text{total}} \cdot \text{dia})^{-1}$ ;
- Realizar um teste com resíduo simulado da CEASAMINAS representando cada mês do ano, totalizando 12 resíduos simulados diferentes;
- Diminuir a granulometria média do resíduo a ser utilizado na pesquisa a até no máximo 10 mm.

## 8. REFERÊNCIAS

ATKINS, P. W. *Physical Chemistry*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

BERNARD, Frei-Baffoe. *Double stage dry-wet fermentation of unsorted municipal solid waste*. Orientador: Günter Busch. 2006. 174 f. Tese (Doutorado em gestão ambiental e de recursos) – Faculty of Environmental Sciences and Process Engineering, Brandenburg University of Technology Cottbus, Cottbus, Alemanha, 2006.

BITTENCOURT, Felipe Ribeiro. *A pirólise como tecnologia para redução de emissões de gases de efeito estufa e sequestro de carbono: Um estudo de caso do tratamento de resíduos de couro wet-blue*. Orientador: Gilberto Caldeira Bandeira de Melo. 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. *Fatores de Emissão da Rede Nacional Interligada – 2009*. Brasília, 2009.

BRASIL Ministério de Minas e Energia – MME. *Balanço energético nacional – Ano base 2009*. Brasília, 2010.

BTU - BRANDENBURGISCHE TECHNISCHE UNIVERSITÄT COTTBUS. Guenter Busch e Marko Burkhardt. *Vergärungsversuche zur zweistufigen Vergärung von Marktabfällen nach vorgegebener Zusammensetzung „Marktabfälle Brasilien“*, 2008.

BTU - BRANDENBURGISCHE TECHNISCHE UNIVERSITÄT COTTBUS. Guenter Busch e Marko Sieber. *Abbauverfahren von biogenem material*. WO 2006/048008 A2, 2006.

BUSCH, G; GROSSMANN, J; SIEBER, M; BURKHARDT, M. A New and Sound Technology for Biogas from Solid Waste and Biomass. *Springer*, p. 90-97, 2008.

BOUALLAGUI, H.; TOUHAMI, Y.; BEN CHEIKH, R; HAMDI, M. Bioreactor Performance in Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Wastes. *Elsevier*, p. 990-991, 2004.

CEASAMINAS: *História*. Disponível em: <<http://www.ceasaminas.com.br>>. Acesso em: 09 mai. 2011.

CEASAMINAS - Departamento de Comunicação - DECOM. *Informativo CEASAMINAS*. Contagem, 2009.

CEASAMINAS - Departamento de Engenharia - DEMFA. *Implementação do processo tecnológico “transformação de lixo em energia” na CEASAMINAS*. Contagem, 2007.

CEASAMINAS - Departamento de Engenharia - DEMFA. *Planilhas de controle de saída de resíduos 2009*. Contagem, 2010a.

CEASAMINAS - Departamento Técnico - DETEC. *Planilhas de controle de entrada de produtos na CEASAMINAS*. Contagem, 2010b.

CEASAMINAS - Departamento de Engenharia - DEMFA. *Planta baixa do entreposto de Contagem-MG*. Contagem, 2010c.

CEASAMINAS – Programa de Distribuição de Alimentos da CEASAMINAS - PRODAL. *Planilhas de controle de entrada de produtos no PRODAL*. Belo Horizonte, 2010d.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: UFMG/DESA, 1997.

CONAB - COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - *Diagnóstico dos mercados atacadistas de hortigranjeiros*, Brasília, 2008a.

CONAB - COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – *Manual I - Breve história do sistema de CEASAs no Brasil*, Brasília, 2008b.

CUNHA, A. R. A. de A. Dimensões estratégicas e dilemas das centrais de abastecimento no Brasil. *Rev. Política Agrícola*, nº 4, p. 37-46, Brasília, 2006.

CUNHA, A. R. A. de A.; CAMPOS, J. B. *O Sistema de abastecimento atacadista no Brasil: uma rede complexa de logística*, Belo Horizonte, 2008.

DEFRA - DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS: Climate Change and Waste Management. *The Link*. Londres, Reino Unido. 2005.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources - An Introduction*. Weinheim: WILEY-VCH, 2008.

EEROLA, T.T. Mudanças Climáticas Globais: Passado, Presente e Futuro. Fórum de Ecologia. Instituto de Ecologia Política, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Florianópolis. 10p. 2003.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE: *Minas sem lixões*. Disponível em: <<http://www.feam.br>>. Acesso em: 23 mai. 2011.

FISCHER, J.R.; IANNOTTI, E.L.; PORTER, J.H.; GARCIA, A. *Producing methane gas from swine manure in a pilot-size digester*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.22, n.2, p.370-374, 1979.

GOMES, André Luiz. *Análise técnica e econômica de filtro anaeróbio utilizado para o tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios – Estudo de Caso*. Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: CO<sub>2</sub> removals in residual combustion products (charcoal). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4. Appendix 1, 2p. 2006.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Paris, Fev., 2007.

LEITE, V. D.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; LOPES, W. S.; JÚNIOR, G. B. A.; DANTAS, A. M. M. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbio de batelada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande – PB, v. 7, n. 2, p. 318-322, 2003.

LOPES, Ignez Vidigal (Coord.). *O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação*. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 2002.

LUCAS JÚNIOR, J.; SILVA, F.M. Aproveitamento de resíduos agrícolas para a geração de energia. In: ENERGIA, Automação e Instrumentação. Lavras: SBEA/UFLA, 1998. p.63-67.

OSTREM, K.M.; MILLRATH, K.; THEMELIS., N.J. Combining anaerobic digestion and waste-to energy, *12<sup>th</sup> North America Waste to Energy Conference*, 12, 2004.

PAVAN, P.; P. BATTISTONI; F. CECCHI; J. MATTA ALVAREZ. *Two-phase anaerobic digestion of source sorted OFMSW (organic fraction of municipal solid waste): performance and kinetic study*. Wat Sci and Tec, Vol. 41, No 3, p. 111-118, 2000.

PENA VARO, M. R. *Advance primary treatment of domestic wastewater in tropical countries:Development of high-rate anaerobic ponds*. Tese de Doutorado – Department of civil engineering, University of Leeds, Leeds, Inglaterra, 2002.

MEEHL, G., WASHINGTON, W., AMMANN, C., ARBLASTER, J., WIGLEY, T., TEBALDI, C.: Combinations of Natural and Anthropogenic Forcings in Twentieth-Century Climate. *Journal of Climate*. Vol. 17. pp. 3721-3727. 2004.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. O Protocolo de Quioto e as Possibilidades de Inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de Projetos em Energia Limpa. *Contexto Internacional*, v. 30, n<sup>o</sup> 1, p.9-47, Rio de Janeiro, 2008.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior de Minas Gerais – SECTES. *Bioenergia – Cadeia Produtiva e co-produtos em Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2009.

RAJESHWARI, KV.; PANTH, DC.; LATA, K.; KISHORE, VVN. *Studies on biomethanation of vegetable market waste*. Biogas Forum, v. 3, p. 4-11. 1998.

SANTANA, A. M.; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. Desempenho da Atividade da Microbiota de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB), em Dois Estágios, Tratando Águas Residuárias de Suinocultura. *24<sup>o</sup> Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, 2007.

STROOT, P. G.; McMAHON, K. D.; MACKIE, R. I.; RASKIN, L. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions - I. Digester Performance. *Wat. Res.*, v. 35, n°7, p.1804-1816, 2001.

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - *Convênio 09/98 - UFV/CEASA*. P. 02. Viçosa – MG ,1998.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change: *The Marrakesh Accords*. Decision 17 / CP7. 72p. 2001.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site. 09p. Bonn, 2010a.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, *AMS-III-AO. Methane recovery through controlled anaerobic digestion*. 11 p. Bonn, 2010b.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, *AMS-I-C. Thermal energy production with or without electricity*. 23 p. Bonn, 2010c.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, *AMS-III-D. Methane recovery in animal manure management systems*. 15 p. Bonn, 2010d.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, *AMS-III-H. Methane recovery in wastewater treatment*. 31 p. Bonn, 2010e.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, *AMS-I-D. Grid connected renewable electricity generation*. 9 p. Bonn, 2010f.

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. *Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO) Versão II*. Campinas: Unicamp/Nepa, 2006.

VERRIER, D., RAY, F., ALBAGNAC, G. *Two-phase methanization of solid vegetable wastes*. *Biol. Wastes*, v. 22, p. 77-163, 1987.

VIDAL, J.W.B. A posição do Brasil frente ao novo ambiente mundial. *Revista Eco 21*, ano XIII, n. 75, fev. 2003. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em: 15 mai. 2011.

## **9. ANEXOS**

**9.1. ANEXO I – COMPOSIÇÃO DAS SOBRAS RECEBIDAS PELO PRODAL  
EM 2009, COM SUA RESPECTIVA MASSA TOTAL E EM SV**

## JANEIRO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Banana	71,83	0,75	27,42	16.974,00	4.653,71
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	8.420,00	2.450,22
Mamão	88,00	0,50	11,50	20.042,00	2.304,83
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	10.275,00	1.685,10
Manga	84,00	0,35	15,65	10.278,00	1.608,51
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	6.432,00	1.472,93
Mandioca	62,00	0,60	37,40	3.304,00	1.235,70
Laranja	87,20	0,40	12,40	9.776,00	1.212,22
Abacate	84,00	0,50	15,50	3.260,00	505,30
Abóbora	93,67	0,53	5,80	6.300,00	365,40
Melancia	91,00	0,30	8,70	4.072,00	354,26
Pêssego	89,00	0,50	10,50	3.096,00	325,08
Limão	87,00	0,40	12,60	2.116,00	266,62
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	2.920,00	265,72
Repolho	95,00	0,40	4,60	5.725,00	263,35
Maracujá	83,00	0,80	16,20	991,00	160,54
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	538,00	133,96
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	946,00	128,66
Cebola	89,00	0,40	10,60	1.080,00	114,48
Inhame	73,00	1,20	25,80	420,00	108,36
Tomate	95,00	0,50	4,50	2.184,00	98,28
Melão	91,00	0,50	8,50	918,00	78,03
Goiaba	86,00	0,50	13,50	438,00	59,13
Maçã	83,50	0,25	16,25	331,00	53,79
Pimentão	93,00	0,43	6,57	800,00	52,53
Caqui	80,00	0,50	19,50	255,00	49,73
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	684,00	48,56
Vagem	92,00	0,50	7,50	468,00	35,10
Ameixa	85,00	0,60	14,40	126,00	18,14
Chuchu	95,00	0,30	4,70	352,00	16,54
Alho	68,00	1,30	30,70	51,00	15,66
Beterraba	86,00	0,90	13,10	60,00	7,86
Pepino	97,00	0,30	2,70	270,00	7,29
Kiwi	86,00	0,70	13,30	12,00	1,60
Morango	92,00	0,50	7,50	15,00	1,13
<b>TOTAL</b>				<b>123.929,00</b>	<b>20.158,31</b>

## FEVEREIRO/2009

Tipo	Umidade (%)	Cinzas (g) / 100g	SV (g) / 100g	MASSA (kg)	SV Total (kg)
Banana	71,83	0,75	27,42	12.762,00	3.498,92
Mamão	88,00	0,50	11,50	17.232,00	1.981,68
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	6.746,00	1.963,09
Laranja	87,20	0,40	12,40	12.654,00	1.569,10
Mandioca	62,00	0,60	37,40	2.158,00	807,09
Limão	87,00	0,40	12,60	6.008,00	757,01
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	3.450,00	565,80
Goiaba	86,00	0,50	13,50	4.158,00	561,33
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	1.452,00	332,51
Cebola	89,00	0,40	10,60	2.796,00	296,38
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	812,00	202,19
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	2.164,00	196,92
Maracujá	83,00	0,80	16,20	1.197,00	193,91
Abacate	84,00	0,50	15,50	1.160,00	179,80
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	1.674,00	118,85
Manga	84,00	0,35	15,65	525,00	82,16
Beterraba	86,00	0,90	13,10	580,00	75,98
Caqui	80,00	0,50	19,50	304,00	59,28
Coco-Verde	44,00	1,00	55,00	96,00	52,80
Chuchu	95,00	0,30	4,70	1.032,00	48,50
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	350,00	47,60
Tomate	95,00	0,50	4,50	968,00	43,56
Pepino	97,00	0,30	2,70	1.591,00	42,96
Repolho	95,00	0,40	4,60	675,00	31,05
Abóbora	93,67	0,53	5,80	525,00	30,45
Maçã	83,50	0,25	16,25	170,00	27,63
Pimentão	93,00	0,43	6,57	410,00	26,92
Melancia	91,00	0,30	8,70	296,00	25,75
Pêssego	89,00	0,50	10,50	237,00	24,89
Inhame	73,00	1,20	25,80	80,00	20,64
Jiló	92,00	0,60	7,40	176,00	13,02
Berinjela	94,00	0,40	5,60	144,00	8,06
Alface	96,00	0,60	3,40	68,00	2,31
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	24,00	1,54
Alho	68,00	1,30	30,70	3,00	0,92
Nabo	94,00	0,80	5,20	10,00	0,52
Brócolis	91,00	0,80	8,20	2,00	0,16
<b>TOTAL</b>				<b>84.689,00</b>	<b>13.891,28</b>

## MARÇO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Banana	71,83	0,75	27,42	15.930,00	4.367,48
Cebola	89,00	0,40	10,60	33.280,00	3.527,68
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	7.040,00	2.048,64
Mandioca	62,00	0,60	37,40	3.864,00	1.445,14
Abacate	84,00	0,50	15,50	5.880,00	911,40
Caqui	80,00	0,50	19,50	4.141,00	807,50
Mamão	88,00	0,50	11,50	5.818,00	669,07
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	5.990,00	545,09
Manga	84,00	0,35	15,65	3.335,00	521,93
Tomate	95,00	0,50	4,50	11.066,00	497,97
Repolho	95,00	0,40	4,60	8.530,00	392,38
Laranja	87,20	0,40	12,40	3.107,00	385,27
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	2.100,00	344,40
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	1.465,00	335,49
Maracujá	83,00	0,80	16,20	1.860,00	301,32
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	2.934,00	208,31
Jiló	92,00	0,60	7,40	2.368,00	175,23
Chuchu	95,00	0,30	4,70	3.056,00	143,63
Pepino	97,00	0,30	2,70	3.378,00	91,21
Limão	87,00	0,40	12,60	660,00	83,16
Inhame	73,00	1,20	25,80	315,00	81,27
Feijão	13,71	3,74	82,54	68,00	56,13
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	302,00	41,07
Ervilha	80,00	1,40	18,60	180,00	33,48
Maçã	83,50	0,25	16,25	198,00	32,18
Abóbora	93,67	0,53	5,80	510,00	29,58
Melancia	91,00	0,30	8,70	287,00	24,97
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	380,00	24,32
Berinjela	94,00	0,40	5,60	396,00	22,18
Beterraba	86,00	0,90	13,10	120,00	15,72
Pimentão	93,00	0,43	6,57	190,00	12,48
Lima	87,00	0,40	12,60	90,00	11,34
Vagem	92,00	0,50	7,50	117,00	8,78
Brócolis	91,00	0,80	8,20	80,00	6,56
Uva	85,50	0,55	13,95	25,00	3,49
<b>TOTAL</b>				<b>129.060,00</b>	<b>18.205,81</b>

## ABRIL/2009

Tipo	Umidade (%)	Cinzas (g) / 100g	SV (g) / 100g	MASSA (kg)	SV Total (kg)
Alho	68,00	1,30	30,70	15.884,00	4.876,39
Laranja	87,20	0,40	12,40	24.359,00	3.020,52
Mamão	88,00	0,50	11,50	16.366,00	1.882,09
Cebola	89,00	0,40	10,60	14.148,00	1.499,69
Tomate	95,00	0,50	4,50	31.529,00	1.418,81
Abacate	84,00	0,50	15,50	7.564,00	1.172,42
Caqui	80,00	0,50	19,50	5.636,00	1.099,02
Chuchu	95,00	0,30	4,70	21.162,00	994,61
Mandioca	62,00	0,60	37,40	2.530,00	946,22
Banana	71,83	0,75	27,42	2.682,00	735,32
Limão	87,00	0,40	12,60	5.170,00	651,42
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	2.342,00	583,16
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	3.223,00	528,57
Tangerina	89,00	0,30	10,70	1.806,00	193,24
Melão	91,00	0,50	8,50	2.106,00	179,01
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	2.484,00	176,36
Pimentão	93,00	0,43	6,57	2.040,00	133,96
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	558,00	127,78
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	881,00	80,17
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	500,00	68,00
Repolho	95,00	0,40	4,60	1.200,00	55,20
Vagem	92,00	0,50	7,50	728,00	54,60
Jiló	92,00	0,60	7,40	656,00	48,54
Berinjela	94,00	0,40	5,60	828,00	46,37
Pepino	97,00	0,30	2,70	1.428,00	38,56
Melancia	91,00	0,30	8,70	320,00	27,84
Inhame	73,00	1,20	25,80	100,00	25,80
Caju	88,00	0,30	11,70	205,00	23,99
Lima	87,00	0,40	12,60	144,00	18,14
Maçã	83,50	0,25	16,25	36,00	5,85
Goiaba	86,00	0,50	13,50	26,00	3,51
Beterraba	86,00	0,90	13,10	22,00	2,88
Alface	96,00	0,60	3,40	61,00	2,07
Brócolis	91,00	0,80	8,20	12,00	0,98
Abóbora	93,67	0,53	5,80	13,00	0,75
<b>TOTAL</b>				<b>168.749,00</b>	<b>20.721,85</b>

## MAIO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Mamão	88,00	0,50	11,50	31.500,00	3.622,50
Cebola	89,00	0,40	10,60	15.500,00	1.643,00
Limão	87,00	0,40	12,60	11.676,00	1.471,18
Caqui	80,00	0,50	19,50	3.974,00	774,93
Abacate	84,00	0,50	15,50	4.300,00	666,50
Laranja	87,20	0,40	12,40	5.263,00	652,61
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	2.608,00	649,39
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	5.760,00	524,16
Banana	71,83	0,75	27,42	1.242,00	340,52
Goiaba	86,00	0,50	13,50	2.386,00	322,11
Pimentão	93,00	0,43	6,57	4.536,00	297,86
Alho	68,00	1,30	30,70	870,00	267,09
Repolho	95,00	0,40	4,60	5.375,00	247,25
Chuchu	95,00	0,30	4,70	4.756,00	223,53
Berinjela	94,00	0,40	5,60	2.448,00	137,09
Abóbora	93,67	0,53	5,80	2.115,00	122,67
Tangerina	89,00	0,30	10,70	1.134,00	121,34
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	697,00	94,79
Jiló	92,00	0,60	7,40	1.120,00	82,88
Mandioca	62,00	0,60	37,40	132,00	49,37
Maracujá	83,00	0,80	16,20	279,00	45,20
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	275,00	45,10
Vagem	92,00	0,50	7,50	530,00	39,75
Melancia	91,00	0,30	8,70	352,00	30,62
Pepino	97,00	0,30	2,70	861,00	23,25
Manga	84,00	0,35	15,65	120,00	18,78
Tomate	95,00	0,50	4,50	220,00	9,90
Inhame	73,00	1,20	25,80	36,00	9,29
Morango	92,00	0,50	7,50	89,00	6,68
Almeirão	94,00	1,00	5,00	115,00	5,75
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	48,00	3,07
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	10,00	2,29
Alface	96,00	0,60	3,40	66,00	2,24
<b>TOTAL</b>				<b>110.393,00</b>	<b>12.552,69</b>

## JUNHO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Ameixa	13,00	0,67	86,33	5.880,00	5.076,40
Limão	87,00	0,40	12,60	12.286,00	1.548,04
Laranja	87,20	0,40	12,40	12.438,00	1.542,31
Mamão	88,00	0,50	11,50	11.758,00	1.352,17
Cebola	89,00	0,40	10,60	7.718,00	818,11
Banana	71,83	0,75	27,42	2.268,00	621,81
Tangerina	89,00	0,30	10,70	5.514,00	590,00
Repolho	95,00	0,40	4,60	8.159,00	375,31
Manga	84,00	0,35	15,65	2.379,00	372,31
Goiaba	86,00	0,50	13,50	2.546,00	343,71
Caqui	80,00	0,50	19,50	1.710,00	333,45
Abacate	84,00	0,50	15,50	1.900,00	294,50
Mandioca	62,00	0,60	37,40	726,00	271,52
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	1.044,00	259,96
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	1.155,00	157,08
Pimentão	93,00	0,43	6,57	1.686,00	110,71
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	1.188,00	84,35
Alface	96,00	0,60	3,40	2.213,00	75,24
Melancia	91,00	0,30	8,70	808,00	70,30
Abóbora	93,67	0,53	5,80	947,00	54,93
Jiló	92,00	0,60	7,40	576,00	42,62
Tomate	95,00	0,50	4,50	828,00	37,26
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	157,00	35,95
Chuchu	95,00	0,30	4,70	704,00	33,09
Lima	87,00	0,40	12,60	180,00	22,68
Berinjela	94,00	0,40	5,60	300,00	16,80
Couve	91,00	1,30	7,70	213,00	16,40
Coco-Verde	44,00	1,00	55,00	28,00	15,40
Maçã	83,50	0,25	16,25	54,00	8,78
Alho	68,00	1,30	30,70	20,00	6,14
Pêra	84,00	0,30	15,70	38,00	5,97
Almeirão	94,00	1,00	5,00	93,00	4,65
Melão	91,00	0,50	8,50	40,00	3,40
Vagem	92,00	0,50	7,50	39,00	2,93
Maracujá	83,00	0,80	16,20	14,00	2,27
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	11,00	1,00
Morango	92,00	0,50	7,50	8,00	0,60
<b>TOTAL</b>				<b>87.626,00</b>	<b>14.608,14</b>

## JULHO/2009

Tipo	Umidade (%)	Cinzas (g) / 100g	SV (g) / 100g	MASSA (kg)	SV Total (kg)
Tangerina	89,00	0,30	10,70	20.272,00	2.169,10
Laranja	87,20	0,40	12,40	13.860,00	1.718,64
Mandioca	62,00	0,60	37,40	3.583,00	1.340,04
Mamão	88,00	0,50	11,50	10.512,00	1.208,88
Repolho	95,00	0,40	4,60	25.800,00	1.186,80
Banana	71,83	0,75	27,42	3.888,00	1.065,96
Manga	84,00	0,35	15,65	5.535,00	866,23
Cebola	89,00	0,40	10,60	5.387,00	571,02
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	1.748,00	508,67
Limão	87,00	0,40	12,60	3.908,00	492,41
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	1.700,00	423,30
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	3.024,00	411,26
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	4.338,00	308,00
Tomate	95,00	0,50	4,50	6.292,00	283,14
Abacate	84,00	0,50	15,50	1.520,00	235,60
Goiaba	86,00	0,50	13,50	884,00	119,34
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	1.619,00	103,62
Caqui	80,00	0,50	19,50	390,00	76,05
Beterraba	86,00	0,90	13,10	572,00	74,93
Couve	91,00	1,30	7,70	945,00	72,77
Inhame	73,00	1,20	25,80	234,00	60,37
Jiló	92,00	0,60	7,40	544,00	40,26
Alface	96,00	0,60	3,40	992,00	33,73
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	104,00	23,82
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	186,00	16,93
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	100,00	16,40
Caju	88,00	0,30	11,70	113,00	13,22
Chuchu	95,00	0,30	4,70	280,00	13,16
Melancia	91,00	0,30	8,70	128,00	11,14
Pimentão	93,00	0,43	6,57	158,00	10,38
Brócolis	91,00	0,80	8,20	91,00	7,46
Lima	87,00	0,40	12,60	54,00	6,80
Pepino	97,00	0,30	2,70	168,00	4,54
Abóbora	93,67	0,53	5,80	52,00	3,02
Maçã	83,50	0,25	16,25	18,00	2,93
Pêra	84,00	0,30	15,70	18,00	2,83
Maracujá	83,00	0,80	16,20	14,00	2,27
Vagem	92,00	0,50	7,50	23,00	1,73
Almeirão	94,00	1,00	5,00	31,00	1,55
Berinjela	94,00	0,40	5,60	12,00	0,67
<b>TOTAL</b>				119.097,00	13.508,93

## AGOSTO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Laranja	87,20	0,40	12,40	12.161,00	1.507,96
Repolho	95,00	0,40	4,60	27.075,00	1.245,45
Tangerina	89,00	0,30	10,70	11.340,00	1.213,38
Mamão	88,00	0,50	11,50	9.258,00	1.064,67
Beterraba	86,00	0,90	13,10	4.554,00	596,57
Limão	87,00	0,40	12,60	4.482,00	564,73
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	858,00	249,68
Cebola	89,00	0,40	10,60	2.218,00	235,11
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	900,00	224,10
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	1.300,00	213,20
Abacate	84,00	0,50	15,50	1.320,00	204,60
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	2.664,00	170,50
Jiló	92,00	0,60	7,40	1.744,00	129,06
Mandioca	62,00	0,60	37,40	226,00	84,52
Tomate	95,00	0,50	4,50	1.873,00	84,29
Maçã	83,50	0,25	16,25	486,00	78,98
Banana	71,83	0,75	27,42	270,00	74,03
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	247,00	56,56
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	774,00	54,95
Pimentão	93,00	0,43	6,57	834,00	54,77
Pêra	84,00	0,30	15,70	324,00	50,87
Alface	96,00	0,60	3,40	1.320,00	44,88
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	288,00	39,17
Maracujá	83,00	0,80	16,20	240,00	38,88
Almeirão	94,00	1,00	5,00	425,00	21,25
Goiaba	86,00	0,50	13,50	106,00	14,31
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	154,00	14,01
Manga	84,00	0,35	15,65	45,00	7,04
Vagem	92,00	0,50	7,50	78,00	5,85
Couve	91,00	1,30	7,70	67,00	5,16
Chuchu	95,00	0,30	4,70	102,00	4,79
Inhame	73,00	1,20	25,80	18,00	4,64
Brócolis	91,00	0,80	8,20	36,00	2,95
Abóbora	93,67	0,53	5,80	39,00	2,26
Morango	92,00	0,50	7,50	18,00	1,35
Melão	91,00	0,50	8,50	8,00	0,68
<b>TOTAL</b>				<b>87.852,00</b>	<b>8.365,20</b>

## SETEMBRO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Banana	71,83	0,75	27,42	18.596,00	5.098,40
Laranja	87,20	0,40	12,40	36.254,00	4.495,50
Mamão	88,00	0,50	11,50	20.630,00	2.372,45
Repolho	95,00	0,40	4,60	34.250,00	1.575,50
Arroz	13,00	0,67	86,33	1.800,00	1.554,00
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	16.764,00	1.525,52
Tomate	95,00	0,50	4,50	20.240,00	910,80
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	11.082,00	709,25
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	6.426,00	456,25
Abacate	84,00	0,50	15,50	2.740,00	424,70
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	1.452,00	422,53
Tangerina	89,00	0,30	10,70	3.654,00	390,98
Mandioca	62,00	0,60	37,40	748,00	279,75
Limão	87,00	0,40	12,60	2.106,00	265,36
Cebola	89,00	0,40	10,60	2.438,00	258,43
Maçã	83,50	0,25	16,25	1.368,00	222,30
Pimentão	93,00	0,43	6,57	3.148,00	206,72
Chuchu	95,00	0,30	4,70	4.220,00	198,34
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	824,00	188,70
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	598,00	148,90
Pepino	97,00	0,30	2,70	5.061,00	136,65
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	800,00	131,20
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	813,00	110,57
Manga	84,00	0,35	15,65	705,00	110,33
Jiló	92,00	0,60	7,40	1.456,00	107,74
Berinjela	94,00	0,40	5,60	1.536,00	86,02
Alface	96,00	0,60	3,40	1.436,00	48,82
Morango	92,00	0,50	7,50	573,00	42,98
Vagem	92,00	0,50	7,50	391,00	29,33
Inhame	73,00	1,20	25,80	100,00	25,80
Maracujá	83,00	0,80	16,20	110,00	17,82
Melancia	91,00	0,30	8,70	200,00	17,40
Beterraba	86,00	0,90	13,10	100,00	13,10
Pêra	84,00	0,30	15,70	38,00	5,97
Abóbora	93,67	0,53	5,80	75,00	4,35
Couve	91,00	1,30	7,70	14,00	1,08
Almeirão	94,00	1,00	5,00	16,00	0,80
<b>TOTAL</b>				<b>202.762,00</b>	<b>22.594,32</b>

## OUTUBRO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Banana	71,83	0,75	27,42	26.622,00	7.298,87
Cebola	89,00	0,40	10,60	28.976,00	3.071,46
Mamão	88,00	0,50	11,50	14.948,00	1.719,02
Repolho	95,00	0,40	4,60	26.617,00	1.224,38
Laranja	87,20	0,40	12,40	8.698,00	1.078,55
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	14.094,00	1.000,67
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	10.566,00	961,51
Limão	87,00	0,40	12,60	5.860,00	738,36
Manga	84,00	0,35	15,65	4.074,00	637,58
Mandioca	62,00	0,60	37,40	1.298,00	485,45
Maracujá	83,00	0,80	16,20	1.884,00	305,21
Pepino	97,00	0,30	2,70	10.938,00	295,33
Chuchu	95,00	0,30	4,70	4.330,00	203,51
Abacate	84,00	0,50	15,50	1.220,00	189,10
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	2.820,00	180,48
Inhame	73,00	1,20	25,80	640,00	165,12
Pêssego	89,00	0,50	10,50	1.422,00	149,31
Beterraba	86,00	0,90	13,10	1.116,00	146,20
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	548,00	136,45
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	520,00	119,08
Pimentão	93,00	0,43	6,57	1.793,00	117,74
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	577,00	78,47
Morango	92,00	0,50	7,50	987,00	74,03
Vagem	92,00	0,50	7,50	910,00	68,25
Berinjela	94,00	0,40	5,60	1.056,00	59,14
Abóbora	93,67	0,53	5,80	940,00	54,52
Jiló	92,00	0,60	7,40	576,00	42,62
Tomate	95,00	0,50	4,50	946,00	42,57
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	130,00	37,83
Lima	87,00	0,40	12,60	144,00	18,14
Almeirão	94,00	1,00	5,00	245,00	12,25
Maçã	83,50	0,25	16,25	60,00	9,75
Melancia	91,00	0,30	8,70	96,00	8,35
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	50,00	8,20
Alface	96,00	0,60	3,40	140,00	4,76
Goiaba	86,00	0,50	13,50	26,00	3,51
Alho	68,00	1,30	30,70	10,00	3,07
Tangerina	89,00	0,30	10,70	12,00	1,28
<b>TOTAL</b>				<b>175.889,00</b>	<b>20.750,12</b>

## NOVEMBRO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Banana	71,83	0,75	27,42	37.710,00	10.338,83
Manga	84,00	0,35	15,65	14.979,00	2.344,21
Arroz	13,00	0,67	86,33	1.760,00	1.519,47
Laranja	87,20	0,40	12,40	10.567,00	1.310,31
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	13.188,00	1.200,11
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	6.750,00	1.107,00
Mamão	88,00	0,50	11,50	6.670,00	767,05
Cebola	89,00	0,40	10,60	7.098,00	752,39
Tomate	95,00	0,50	4,50	15.378,00	692,01
Repolho	95,00	0,40	4,60	14.842,00	682,73
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	2.120,00	616,92
Açúcar	0,00	0,00	100,00	520,00	520,00
Inhame	73,00	1,20	25,80	1.880,00	485,04
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	5.710,00	405,41
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	1.754,00	401,67
Pêssego	89,00	0,50	10,50	3.744,00	393,12
Abacate	84,00	0,50	15,50	2.320,00	359,60
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	5.304,00	339,46
Mandioca	62,00	0,60	37,40	792,00	296,21
Berinjela	94,00	0,40	5,60	4.278,00	239,57
Pêra	84,00	0,30	15,70	1.143,00	179,45
Vagem	92,00	0,50	7,50	2.210,00	165,75
Abóbora	93,67	0,53	5,80	2.618,00	151,84
Jiló	92,00	0,60	7,40	1.856,00	137,34
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	550,00	136,95
Chuchu	95,00	0,30	4,70	2.728,00	128,22
Fubá	11,00	0,60	88,40	115,00	101,66
Limão	87,00	0,40	12,60	758,00	95,51
Pepino	97,00	0,30	2,70	3.192,00	86,18
Maçã	83,50	0,25	16,25	486,00	78,98
Tangerina	89,00	0,30	10,70	544,00	58,21
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	369,00	50,18
Maracujá	83,00	0,80	16,20	209,00	33,86
Pimentão	93,00	0,43	6,57	467,00	30,67
Cará	74,00	0,90	25,10	100,00	25,10
Melancia	91,00	0,30	8,70	120,00	10,44
Ervilha	80,00	1,40	18,60	39,00	7,25
Lima	87,00	0,40	12,60	18,00	2,27
Coco-Verde	91,00	1,30	7,70	16,00	1,23
Kiwi	86,00	0,70	13,30	5,00	0,67
<b>TOTAL</b>				<b>174.907,00</b>	<b>26.252,85</b>

## DEZEMBRO/2009

<b>Tipo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Cinzas (g) / 100g</b>	<b>SV (g) / 100g</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>SV Total (kg)</b>
Banana	71,83	0,75	27,42	45.224,00	12.398,91
Mamão	88,00	0,50	11,50	25.554,00	2.938,71
Batata Inglesa	83,00	0,60	16,40	13.800,00	2.263,20
Cebola	89,00	0,40	10,60	17.404,00	1.844,82
Manga	84,00	0,35	15,65	8.127,00	1.271,88
Laranja	87,20	0,40	12,40	7.146,00	886,10
Repolho	95,00	0,40	4,60	16.300,00	749,80
Abobrinha	92,33	0,57	7,10	8.550,00	607,05
Tomate	95,00	0,50	4,50	11.726,00	527,67
Abóbora	93,67	0,53	5,80	7.771,00	450,72
Cenoura Vermelha	90,00	0,90	9,10	4.238,00	385,66
Limão	87,00	0,40	12,60	2.930,00	369,18
Abacate	84,00	0,50	15,50	2.160,00	334,80
Mandioca	62,00	0,60	37,40	866,00	323,88
Milho Verde	76,00	1,10	22,90	1.262,00	289,00
Abacaxi	86,00	0,40	13,60	1.810,00	246,16
Pimentão	93,00	0,43	6,57	3.604,00	236,66
Maracujá	83,00	0,80	16,20	1.260,00	204,12
Tangerina	89,00	0,30	10,70	1.476,00	157,93
Chuchu	95,00	0,30	4,70	3.290,00	154,63
Inhame	73,00	1,20	25,80	576,00	148,61
Caqui	80,00	0,50	19,50	690,00	134,55
Pêssego	89,00	0,50	10,50	1.116,00	117,18
Beterraba	86,00	0,90	13,10	860,00	112,66
Batata Baroa / Salsa	74,00	1,10	24,90	442,00	110,06
Couve-Flor	93,00	0,60	6,40	1.560,00	99,84
Jiló	92,00	0,60	7,40	992,00	73,41
Pepino	97,00	0,30	2,70	2.688,00	72,58
Melancia	91,00	0,30	8,70	770,00	66,99
Cará	74,00	0,90	25,10	221,00	55,47
Batata Doce	70,00	0,90	29,10	180,00	52,38
Berinjela	94,00	0,40	5,60	576,00	32,26
Maçã	83,50	0,25	16,25	144,00	23,40
Alface	96,00	0,60	3,40	224,00	7,62
Vagem	92,00	0,50	7,50	78,00	5,85
Lima	87,00	0,40	12,60	18,00	2,27
Coco-Verde	44,00	1,00	55,00	24,00	13,20
<b>TOTAL</b>				<b>195.657,00</b>	<b>27.769,20</b>

## **9.2. ANEXO II – RESULTADOS DOS TESTES**

## MEDIÇÕES DO TESTE 1

Dia	Hora	V Acum. (L)	$\Delta V$ Total (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	pH (int)	pH (fin)	DQO (mg/L) (int)	DQO (mg/L) (fin)
21/08/2010	11:30	0	0	63,40	33,50	0,00	3,10	7,58	7,48	1873,00	792,00
22/08/2010	11:27	11,01	11,01	62,70	35,50	0,20	1,60	5,10	7,35	-	-
23/08/2010	13:31	30,49	19,48	61,80	38,10	0,00	0,10	5,26	7,31	3786,00	939,00
24/08/2010	11:15	48,38	17,89	63,00	36,70	0,10	0,20	5,65	7,25	-	-
25/08/2010	12:49	67,81	19,43	66,40	33,40	0,10	0,10	6,13	7,23	2998,00	1028,00
26/08/2010	13:16	84,53	16,72	69,50	30,30	0,10	0,10	6,50	7,21	-	-
27/08/2010	12:58	98,09	13,56	71,00	28,80	0,10	0,10	6,64	7,28	-	-
28/08/2010	13:01	111,48	13,39	73,40	26,40	0,10	0,10	6,75	7,33	-	-
29/08/2010	14:30	125,05	13,57	74,80	25,10	0,00	0,10	6,92	7,27	2320,00	911,00
30/08/2010	12:04	135,45	10,4	75,60	24,30	0,00	0,10	7,01	7,44	-	-
31/08/2010	12:55	147,49	12,04	76,60	23,30	0,00	0,10	7,24	7,54	-	-
01/09/2010	14:14	158,5	11,01	77,30	22,70	0,00	0,00	7,30	7,50	-	-
02/09/2010	13:54	167,38	8,88	77,80	22,10	0,00	0,10	7,38	7,45	-	-
03/09/2010	15:30	176,72	9,34	78,00	21,80	0,10	0,10	7,50	7,44	1372,00	781,00
04/09/2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## MEDIÇÕES DO TESTE 2

Dia	Hora	V Acum. (L)	$\Delta V$ Total (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	pH (int)	pH (fin)	DQO (mg/L) (int)	DQO (mg/L) (fin)
04/09/2010	11:00	0,00	0,00	78,00	21,60	0,20	0,20	7,50	7,56	2076,00	822,00
05/09/2010	14:10	13,58	13,58	74,40	25,60	0,00	0,00	6,15	7,42	-	-
06/09/2010	13:49	33,2	19,62	72,30	27,60	0,00	0,10	6,05	7,44	3806,00	969,00
07/09/2010	14:43	53,43	20,23	72,60	27,30	0,00	0,10	6,19	7,48	-	-
08/09/2010	15:55	72,72	19,29	74,10	25,80	0,00	0,10	6,46	7,52	3232,00	1052,00
09/09/2010	13:14	84,73	12,01	75,30	24,60	0,00	0,10	6,81	7,55	-	-
10/09/2010	12:36	95,99	11,26	76,50	23,40	0,00	0,10	7,05	7,64	-	-
11/09/2010	15:17	105,74	9,75	77,50	22,40	0,00	0,10	7,21	7,63	-	-
12/09/2010	13:11	111,55	5,81	77,90	22,00	0,00	0,10	7,34	7,62	2284,00	839,00
13/09/2010	17:06	119,57	8,02	78,50	21,40	0,00	0,10	7,41	7,63	-	-
14/09/2010	16:24	125,87	6,3	75,80	20,50	0,30	3,40	7,39	7,63	-	-
15/09/2010	15:42	133,22	7,35	76,60	20,90	0,00	2,50	7,44	7,61	-	-
16/09/2010	18:00	142,72	9,5	76,80	20,70	0,00	2,50	7,56	7,63	-	-
17/09/2010	16:15	150,61	7,89	76,00	20,50	0,00	3,50	7,51	7,64	1471,00	770,00
18/09/2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### MEDIÇÕES DO TESTE 3

Dia	Hora	V Acum. (L)	$\Delta V$ Total (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	pH (int)	pH (fin)	DQO (mg/L) (int)	DQO (mg/L) (fin)
18/09/2010	10:45	0,00	0,00	75,30	20,40	0,10	4,20	7,53	7,59	1382,10	858,17
19/09/2010	16:45	33,13	33,13	68,80	31,10	0,00	0,10	5,62	7,46	-	-
20/09/2010	14:10	77,93	44,80	69,00	30,90	0,00	0,10	5,47	7,44	6901,47	1084,00
21/09/2010	13:19	133,24	55,31	72,40	27,50	0,00	0,10	5,38	7,47	-	-
22/09/2010	13:22	186,85	53,61	74,90	25,00	0,00	0,10	5,73	7,44	6287,20	1138,20
23/09/2010	12:58	227,31	40,46	76,80	23,10	0,00	0,10	6,30	7,48	-	-
24/09/2010	12:39	259,25	31,94	78,20	21,70	0,00	0,10	6,74	7,54	-	-
25/09/2010	14:28	287,25	28,00	79,50	20,40	0,00	0,10	7,05	7,63	-	-
26/09/2010	14:14	306,33	19,08	80,30	19,60	0,00	0,10	7,24	7,67	3297,17	1011,73
27/09/2010	13:31	320,61	14,28	80,70	19,20	0,00	0,10	7,30	7,75	-	-
28/09/2010	11:47	331,84	11,23	80,50	19,40	0,00	0,10	7,32	7,69	-	-
29/09/2010	14:48	342,87	11,03	80,50	19,40	0,00	0,10	7,45	7,73	-	-
30/09/2010	12:13	350,93	8,06	80,60	19,30	0,00	0,10	7,51	7,78	-	-
01/10/2010	16:00	361,04	10,11	80,40	19,30	0,00	0,30	7,49	7,66	1490,50	686,53
02/10/2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## MEDIÇÕES DO TESTE 4

Dia	Hora	V Acum. (L)	$\Delta V$ Total (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	BAL (%)	pH (int)	pH (fin)	DQO (mg/L) (int)	DQO (mg/L) (fin)
02/10/2010	10:02	0,00	0,00	79,90	19,60	0,00	0,50	7,51	7,80	1494,00	663,00
03/10/2010	13:10	45,57	45,57	67,60	32,10	0,10	0,20	5,05	7,40	-	-
04/10/2010	14:28	121,47	75,90	66,30	33,60	0,00	0,10	5,31	7,53	7060,00	886,00
05/10/2010	13:45	186,00	64,53	69,90	30,00	0,00	0,10	5,69	7,55	-	-
06/10/2010	15:38	254,52	68,52	73,60	26,30	0,00	0,10	5,97	7,60	6330,00	962,00
07/10/2010	13:57	294,93	40,41	75,90	24,00	0,00	0,10	6,36	7,64	-	-
08/10/2010	13:53	327,85	32,92	77,20	22,70	0,00	0,10	6,72	7,68	-	-
09/10/2010	18:45	357,2	29,35	78,20	21,70	0,00	0,10	6,94	7,68	-	-
10/10/2010	14:05	374,85	17,65	78,30	21,60	0,00	0,10	7,06	7,73	3720,00	646,00
11/10/2010	14:41	394,97	20,12	78,20	21,70	0,00	0,10	7,15	7,73	-	-
12/10/2010	18:20	411,99	17,02	78,10	21,80	0,00	0,10	7,32	7,74	-	-
13/10/2010	17:28	421,88	9,89	78,30	21,60	0,00	0,10	7,46	7,81	-	-
14/10/2010	15:52	430,24	8,36	78,20	21,70	0,00	0,10	7,53	7,81	-	-
15/10/2010	16:05	438,35	8,11	78,50	21,40	0,00	0,10	7,53	7,83	2080,00	665,00
16/10/2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-