

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SENAI – DEPARTAMENTO REGIONAL DO PARANÁ  
UNIVERSITÄT STUTTGART – ALEMANHA

SÉRGIO WIPPEL

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS GERADO NA  
ETE ATUBA SUL PARA SECAGEM TÉRMICA E HIGIENIZAÇÃO DO LODO



**CURITIBA**

**2012**

SÉRGIO WIPPEL



AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS GERADO NA  
ETE ATUBA SUL PARA SECAGEM TÉRMICA E HIGIENIZAÇÃO DO LODO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart, Alemanha, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Luiz Mathias

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Regina Maria Matos Jorge

Coorientador Prof. Dr. Mário José Dallavalli

**CURITIBA**

**2012**

Wippel, Sérgio

Avaliação técnica e econômica de utilização de biogás gerado na ETE Atuba Sul para secagem térmica e higienização do lodo / Sérgio Wippel. – Curitiba, 2012.

115f.: il.

Dissertação (mestrado profissional) – Universidade Federal do Paraná, SENAI - PR, *Universität Stuttgart*, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Alvaro Luiz Mathias

Coorientadora: Regina Maria Matos Jorge

Coorientador: Mário José Dallavalli

1. Lodo de esgoto. 2. Águas residuais. 3. Biogás. I. Mathias, Álvaro Luiz. II. Jorge, Regina Maria Matos. III. Dallavalli, Mário José. IV. Título.

CDD: 628.364

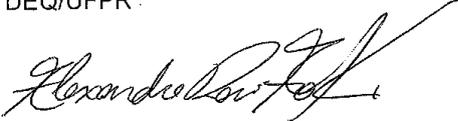
## TERMO DE APROVAÇÃO

SÉRGIO WIPPEL

### AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS GERADO NA ETE ATUBA SUL PARA SECAGEM TÉRMICA E HIGIENIZAÇÃO DO LODO

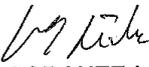
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):   
Prof. Dr. **ÁLVARO LUIZ MATHIAS**  
DEQ/UFPR

  
Prof. Dr. **ALEXANDRE RASI AOKI**  
DEE/UFPR

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. **ELAINE VOSNIAK TAKESHITA**  
DEQ/UFPR



  
Prof(a). Dr(a). **MARGARETE CASAGRANTE LASS ERBE**  
Coordenadora do TC/MAUI-UFPR

Curitiba, 25 de outubro de 2012.

Aos meus pais pelo grande incentivo dispensado e presença em toda minha caminhada. À minha esposa e aos meus filhos, que suportaram a minha ausência.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, dedico este trabalho à minha família, especialmente meus pais, Sr. Licínio e Sra. Valquíria; a minha esposa Daniele e aos meus filhos Rafael e Gabriel.

Ao meu orientador Prof. Alvaro Luiz Mathias, que nunca colocou obstáculos às minhas opiniões, sempre esteve disponível para guiar meu raciocínio, me motivar a prosseguir, e por me ensinar o real significado da palavra “orientar”. Aos coorientadores: Prof.<sup>a</sup> Regina Maria Matos Jorge e Prof. Mário José Dallavalli.

Aos colegas de trabalho, em especial meus mentores Pedro Luis Prado Franco, Antonio Carlos Nery, Gustavo Rafael Collere Possetti, Charles Carneiro, Décio Jurgensen, que durante todo o curso me apoiaram, tiveram paciência e compressão.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”.

Antonie Laurent de Lavoisier

## RESUMO

A ETE Atuba Sul trata efluente urbano e industrial de Curitiba, Paraná, Brasil. Ela foi projetada para uma vazão de 1.120 l/s. O tratamento é atualmente realizado em 16 reatores anaeróbicos tipo UASB. Esta prevista sua ampliação para 1.680 l/s com a instalação de mais oito reatores. Esses reatores após o tratamento produzem biogás, lodo e efluente tratado. Este último é descartado de acordo com as normas ambientais em corpo hídrico. O biogás tem sido queimado para evitar emissões mais nocivas à atmosfera. O lodo após ser desaguado, recebe adição de cal, é maturado nos pátios de cura em média por 120 dias e é destinado a uso na agricultura. A produção de lodo pela população da região metropolitana de Curitiba (3,22 milhões de habitantes) é de 295 ton/dia de lodo desaguado e revela a importância desse sub-produto. Isto exige o gasto de cal na ordem de 150 ton/dia, sendo o insumo mais importante no gasto da ETE. Assim, a viabilidade do aproveitamento da energia térmica da combustão do biogás para secagem do lodo foi avaliado para reduzir os custos com transporte interno e externo e para reduzir o tempo necessário para destinação do material; bem como dispensa o uso de cal. O fluxo de efluente, a DQO, a DBO<sub>5</sub>, o pH e a alcalinidade apresentam grande variação e são cíclicos, mas são compatíveis com a biotransformação em metano. O comportamento cíclico também foi verificado na produção de biogás, o que exigirá o uso de reservatório de biogás. A produção média (21,6 Nm<sup>3</sup>/h) atingiu 54% do previsto teoricamente pela remoção da DQO. Essa diferença pode ser atribuída a falhas de vedação do sistema e a perda do biogás dissolvido no efluente tratado e no lodo. O teor de metano no biogás atingiu cerca de 60% (5.100 kcal/m<sup>3</sup>). A secagem em secador rotativo reduziu a massa em 79%, sendo esperado atingir 90% depois da otimização. A umidade inicial média foi reduzida de 82% a 15%. O consumo médio de biogás foi de 164,71 m<sup>3</sup>/ton de lodo desaguado. Ovos de helmintos em amostras de lodo com 20,16 e 8% de umidade residual não foram detectados em lodo seco e não caído. Assim, a secagem é mais rápida e eficiente, reduz o gasto com transporte interno e externo e dispensam gastos com adição de cal. O investimento necessário para implantação do sistema de desaguamento e secagem prevê um investimento de R\$ 8.509.752,32. No entanto, a tecnologia de secagem evita investimento na construção adicional de pátios de cura, de sistema de cal e de desaguamento de lodo, os quais foram considerados como receita auferida; além dos gastos menores para transporte interno e externo de lodo e demanda de cal (R\$ 1.026.562,59 por ano). O resultado do VPL (Valor Presente Líquido) será positivo no ano 20 para propostas das empresas Andritz e Pieralise com uso exclusivo do biogás. Caso seja necessário utilizar gás natural, a quantidade máxima para o VPL igual a zero é de 180 Nm<sup>3</sup>/h.

**Palavras-chave:** Lodo de esgoto. Estação de tratamento de esgoto. Biogás. Secagem térmica. UASB.

## ABSTRACT

Atuba Sul wastewater treatment Plant receives domestic and industrial effluent from Curitiba, Parana, Brasil. It was designed for an inflow of 1.120 L/s. Nowadays the treatment is realized with 16 UASB reactors. 8 reactors will be installed increasing the capacity of treatment to 1.680 L/s. These reactors produce biogas, sludge and treated effluent being discharged according to the environment regulation in the river. The biogas is burned in order to avoid emissions to the atmosphere. The sludge after dewatering process, receives lime, it is matured in landfills for 120 days and destined to agriculture. The production of sludge by Curitiba metropolitan area (3,22 millions of inhabitants) is 295 ton/day of dewatered sludge revealing the importance of this by-product. The demand of lime is around 150 ton/day and it is considered in the most costful material. Therefore, the feasibility for using thermal energy from biogas combustion for sludge dewatering process was assessed to reduce internal and external transportation cost and to reduce the time needed to final disposal, as well as if the use of lime is dispensable. The inflow, COD, BOD, pH and alkalinity present great variation and occur in cycles, but are compatible to the biotransformation in methane. The cycle behavior was also observed in biogas production, that will require the use of biogas reservoir. The average production reached 54% of theoretical calculated COD degradation. This difference can be attributed to vegetation system failures and the loss of dissolved biogas in treated effluent and sludge. The methane level in the biogas reached around 60% (5.100 kcal/m<sup>3</sup>). The dewatering process in rotative equipment reduced the mass in 79% expecting to reach 90% after optimization. The initial average moisture was reduced from 82% to 15%. The average biogas consumption was 164,71 m<sup>3</sup>/ton of dewatered sludge. Helminth eggs in samples of sludge with 20,16 and 8% of residual moisture were not detected in dry not limed sludge. Hence, the drying process is faster and efficient, reduces costs with internal and external transportation, and lime is dispensable. The investment necessary to implement de dewatering and drying system is R\$ 8.509.752,32. But, this technology avoids additional investment in landfills, lime and dewatering systems, which were considered as earned income, in addition to lower costs of internal and external sludge transport and lime demand R\$ 1.026.562,59 per year). The result of NPL (Net present value) will be positive in year 20 for the proposals of Andritz and Pieralise enterprises using exclusively biogas. If it is necessary to use natural gas, the maximum amount for the NPL equals zero is 180 Nm<sup>3</sup>/h.

**Keywords:** Sludge. Sewage treatment station. Biogas. Thermal drying. UASB.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONVERSÃO BIOLÓGICA NOS SISTEMAS AERÓBIOS E ANAERÓBIOS.....	24
FIGURA 2 – VISTA ESQUEMÁTICA DO REATOR UASB.....	25
FIGURA 3 - PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BIOGÁS EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE METANO .....	33
FIGURA 4 – ETE ATUBA SUL-BACIAS HIDROGRÁFICAS, ÁREAS DE ABRANGÊNCIA E LOCALIZAÇÃO .....	49
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DA ETE ATUBA SUL .....	51
FIGURA 6 - IMAGEM DAS INSTALAÇÕES DA ETE ATUBA SUL E O LOCAL ONDE ESTÃO SENDO REALIZADAS AS MEDIÇÕES DE BIOGÁS .....	55
FIGURA 7 - FOTO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA MEDIR EM TEMPO REAL OS SEGUINTE PARÂMETROS INERENTES AO BIOGÁS: (a) VAZÃO, (b) TEOR DE METANO, c) TEMPERATURA , (d) PRESSÃO MANOMÉTRICA .....	56
FIGURA 8 - VOLUME DE ESGOTO TRATADO ENTRE JANEIRO DE 2010 E ABRIL DE 2012 .....	61
FIGURA 9 - PERFIL DE DBO (A), DQO (B), ALCALINIDADE (C), PH (D) E VAZÃO(E) DO ESGOTO SANITÁRIO QUE ENTRA NOS RALFS PARA UM INTERVALO DE 3 DIAS SEM CHUVAS.....	67
FIGURA 10 - PERFIL DA VAZÃO AO LONGO DE 24HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL, SENDO O INÍCIO AS 8:00h, PARA TRÊS DIAS COM ESTIAGEM.....	68
FIGURA 11 - PERFIL DO pH AO LONGO DE 24 HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL, SENDO O INÍCIO AS 8:00h, PARA TRÊS DIAS COM ESTIAGEM .....	69
FIGURA 12 - PERFIL DA ALCALINIDADE AO LONGO DE 24 HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL, SENDO O INÍCIO AS 8:00h, PARA TRÊS DIAS COM ESTIAGEM .....	70
FIGURA 13 - PERFIL DA DQO AO LONGO DE 24 HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL .....	71
FIGURA 14 - RELAÇÃO ENTRE DBO E DQO .....	72
FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE PH E ALCALINIDADE DO DIA 1.....	73
FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE pH e ALCALINIDADE DIA 2.....	73
FIGURA 17 - PERFIL DA DBO ENTRE 29/01/12 À 30/01/12.....	74

FIGURA 18 - VAZÃO DE BIOGÁS PRODUZIDA EM 30 DIAS COM DESTAQUE PARA UM INTERVALO DE 4 DIAS .....	76
FIGURA 19 - CURVA DE VAZÃO DE BIOGÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA UM INTERVALO DE 8 DIAS .....	77
FIGURA 20 – TEMPERATURA DO BIOGÁS NO REATOR E DA TEMPERATURA DO AR AMBIENTE AO LONGO DO TEMPO .....	78
FIGURA 21 - CURVAS DE VAZÃO (A), TEOR DE METANO (B), TEMPERATURA (C) E PRESSÃO MANOMÉTRICA (D) DO BIOGÁS DO REATOR EM FUNÇÃO DO INTERVALO DE 7 DIAS .....	81
FIGURA 22 - CURVA DE TEOR DE METANO ANTES E DEPOIS DA CONTENÇÃO DE VAZAMENTO DAS VÁLVULAS HÍDRICAS INSTALADAS NA ETE ATUBA.....	81
FIGURA 23 - REDUÇÃO DE MASSA PÓS-SECAGEM X DIAS .....	82
FIGURA 24 - FATOR DE REDUÇÃO DE MASSA X DIA.....	83
FIGURA 25 - CONSUMO DE BIOGÁS POR MASSA, M <sup>3</sup> /TON DIAS .....	84

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS.....	23
QUADRO 2 - RELAÇÃO DQO/DBO E RECOMENDAÇÃO DE PROCESSAMENTO.....	27
QUADRO 3 - CARACTERIZAÇÃO DO LODO QUANTO AO TEOR DE UMIDADE..	28
QUADRO 4 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS.....	30
QUADRO 5 – MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LODO. ....	59
QUADRO 6 – LOTES DE ESGOTO CALEADO E VALOR AGRONÔMICO DE METAIS PESADOS.....	85
QUADRO 7 – AMOSTRAS X RESULTADOS METAIS PESADOS X VALORES MÁXIMOS ADMITIDOS.....	85
QUADRO 8 – AMOSTRAS X % VALOR AGRONÔMICO .....	86
QUADRO 9 – COMPARATIVO TÉCNICO DE SECADORES TÉRMICOS.....	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO INFERIOR DE VÁRIOS TIPOS DE GASES .....	33
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO PELA ETE ATUBA SUL.....	37
TABELA 3 – VARIAÇÃO DE VAZÃO (PERÍODO DE 30 DIAS) .....	48
TABELA 4 - VALORES DE OVOS VIÁVEIS DE HELMINTOS DO LODO APÓS O PROCESSO DE SECAGEM E VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS PELO CONAMA 375/06.....	84
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO LODO BRUTO, DESIDRATADO E APÓS A SECAGEM TÉRMICA .....	90
TABELA 6 – CUSTO TOTAL DE IMPLANTAÇÃO DO PROJETO DE GERAÇÃO TÉRMICA E SECAGEM DO LODO.....	90
TABELA 7 – CUSTOS VARIÁVEIS.....	91
TABELA 8 - VALORES DE DEPRECIAÇÃO .....	92
TABELA 9 - DISCRIMINAÇÃO DOS CUSTOS E DAS RECEITAS AUFERIDA PELO PROJETO .....	98
TABELA 10 – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONOMICA DOS SECADORES TÉRMICOS DAS EMPRESAS ANDRITZ E PIERALISE .....	103

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	Assessoria de Planejamento e Investimento
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Internacional para a e Reconstrução e Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAESB	Companhia Água e Esgoto de Brasília
CEF	Caixa Econômica Federal
COMPAGAS	Companhia Paranaense de Gás
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPEL	Companhia de Energia Elétrica do Paraná
CLP	Controlador Lógico Programável
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DAE	Departamento de Água e Esgoto
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ELETRORBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
GEE	Gases do Efeito Estufa
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit</i>
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
JICA	Japan International Cooperation Agency
KFW	Banco Alemão de Desenvolvimento
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
NBR	Norma Brasileira
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
pH	Potencial de Hidrogênio
PNRS	Programa Nacional de Recursos Sólidos
PCS	Poder Calorífero Superior
PCI	Poder Calorífero Inferior

PNAD	Plano Nacional de Saneamento
PROSAB	Programa de Saneamento Básico
RALF	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SV	Sólidos Totais
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
VPL	Valor Presente Líquido

### LISTA DE SÍMBOLOS

A	Alcalinidade
$Q_e$	Vazão de efluente
Q	Vazão de biogás
$T_b$	Temperatura do biogás
P	Pressão do reator UASB
$M_i$	Massa de entrada no secador
$F_{rm}$	Fator de redução de massa
CX	Composição química do despejo
X	Frações atômicas da composição química do despejo
A	Quantidade molar dos componentes da reação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS .....	19
1.1.1 Objetivo Geral .....	19
1.1.2 Objetivos Específicos .....	20
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
2.1 TRATAMENTO ANAERÓBIO TIPO UASB .....	21
2.1.2 Demanda Química de Oxigênio .....	26
2.1.3 O esgoto e a produção de Lodo .....	27
2.1.4 Produção e aproveitamento de Biogás .....	29
2.2 QUANTIFICAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	33
2.2.1 Estimativa de Produção de Biogás.....	33
2.2.1.1 Estimativa a partir da composição química do despejo .....	34
2.2.1.2 Estimativa a partir da DQO removida .....	35
2.2.1.3 Estimativa utilizando a composição de biogás de fontes bibliográficas .....	36
2.3 SECAGEM TÉRMICA .....	37
2.3.1 Evolução na Europa .....	38
2.3.2 Evolução da secagem térmica no Brasil .....	39
2.3.3 Tipos e características dos secadores térmicos .....	42
2.3.3.1 Classificação de secadores térmicos .....	43
2.3.3.2 Secador granular rotativo de lodo da empresa Albrecht .....	44
2.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA .....	45
2.4.1 Técnicas de análise financeira .....	45
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ATUBA SUL.....	47
3.1.1 Descrição geral da ETE Atuba Sul .....	47
3.1.1.1 Localização .....	47
3.1.1.2 Situação atual e proposta de melhoria.....	47
3.1.2 Parâmetros operacionais da ETE Atuba Sul .....	52
3.1.2.1 Remoção de DQO .....	52
3.1.2.2 Produção e destinação de lodo.....	52
3.1.2.3 Produção e destinação de biogás.....	53
3.2 QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ETES TIPO UASB .....	53
3.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS REAIS DA GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ETES TIPO UASB .....	54
3.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE SECADOR TÉRMICO DA EMPRESA ALBRECHT .....	57

3.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DA ETE ATUBA SUL .....	59
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ATUBA SUL.....	61
4.1.1 Descrição Geral da ETE Atuba Sul .....	61
4.1.2 Parâmetros Operacionais da ETE Atuba Sul .....	61
4.1.3 Aspectos legais referentes aos parâmetros operacionais da ETE Atuba Sul. ...	63
4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO NA ETE ATUBA SUL.....	64
4.2.1 Produção teórica de metano – Dados iniciais .....	64
4.2.1.1 Produção teórica de metano – CNTP .....	64
4.2.1.2 Produção teórica de metano – Condições ETE Atuba Sul .....	65
4.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS REAIS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	66
4.3.1 Parâmetros físico-químicos do esgoto .....	66
4.3.1.1 Comportamento diário da vazão .....	67
4.3.1.2 Comportamento diário do pH.....	68
4.3.1.3 Comportamento diário da alcalinidade.....	69
4.3.1.4 Comportamento diário da DQO .....	70
4.3.1.5 Relação entre a DQO e a DBO.....	71
4.3.1.6 Relação entre o pH e a alcalinidade .....	72
4.3.1.7 Perfil da DBO ao longo de 24 horas de operação da ETE Atuba Sul .....	74
4.3.1.8 Curva de vazão de biogás em função do tempo.....	74
4.3.1.9 Curva de vazão em função do tempo com elevados índices de chuva .....	76
4.3.1.10 Teor de metano, temperatura e a pressão manométrica do biogás .....	77
4.3.1.11 Teor de metano antes e depois da interrupção de vazamentos em válvulas hídricas 81	
4.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE USO DO SECADOR TÉRMICO TIPO ROTATIVO DA EMPRESA ALBRECHT .....	82
4.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA .....	86
4.5.1.1 Investimento.....	89
4.5.1.2 Custos.....	91
4.5.1.2.1 Custos anuais com operação e manutenção .....	91
4.5.1.2.2 Custo de depreciação .....	92
4.5.1.2.3 Custo de Energia consumida pelo secador térmico .....	93
4.5.1.3 Receita Auferida.....	93
4.5.1.3.1 Pátio de Cura .....	93
4.5.1.3.2 Sistema de Cal.....	95
4.5.1.3.3 Sistema de Desidratação de Lodo .....	95
4.5.1.3.4 Economia com equipamentos que deixam de ser necessários.....	96
4.5.1.3.5 Benefícios adicionais.....	97
4.5.1.4 Resumo do Custo <i>versus</i> Receita Auferida pelo projeto.....	98

4.5.2 Estudo de viabilidade econômica dos secadores térmicos das empresas Perialise e Andritz através da utilização da ferramenta em Excel para calcular o VPL no ano 20 .....	98
4.5.2.1 Alternativa A - Andritz-Bio .....	99
4.5.2.2 Alternativa B - Andritz-GN .....	100
4.5.2.3 Alternativa C - Andritz Bio(medido) e GN.....	100
4.5.2.4 Alternativa D - Andritz Bio(medido) e GN renegociado .....	101
4.5.2.5 Alternativa E- Andritz Bio-GN – linha de corte .....	101
4.5.2.6 Alternativa F - Perialise-Bio.....	101
4.5.2.7 Alternativa G - Perialise GN .....	102
4.5.2.8 Alternativa H - Bio(medido) e GN.....	102
4.5.2.9 Alternativa I - Bio(medido) e GN renegociado.....	102
4.5.2.10 Alternativa J - Bio-GN – linha de corte.....	103
4.5.3 Análise de retorno econômico-financeiro .....	103
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>106</b>
<b>6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE A – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONOMICO-FINANCEIRA .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIOS 2429, 2430 E 2431/2010 .....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO B – CUSTOS DA RECICLAGEM AGRÍCOLA 2011 .....</b>	<b>125</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) foi pioneira na implantação e operação de sistemas de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico no Brasil, responsável pelo início e profusão da aplicação prática desses reatores anaeróbios a partir da década de 1980. (JORDÃO; ALÉM SOBRINHO, 2004).

Esse processo gera três subprodutos: biogás, lodo e efluente tratado. Este último é lançado no Rio Atuba após a adição de cloro. O biogás geralmente é queimado em *flare*. O lodo sofre desaguamento e recebe adição de cal, sendo condicionado em pátio de cura, em média, por 120 dias para mineralização do solo e, depois, enviado para uso na agricultura (SANEPAR, 2006).

A SANEPAR tem desenvolvido tecnologia para aplicação nobre deste biogás ao longo das últimas décadas. Em 1983, um processo de lavagem, compressão e armazenagem do biogás em cilindros de aço foi desenvolvido pela SANEPAR em Londrina (NIELSEN,1983). Os cilindros foram adaptados em parte da frota de veículos da SANEPAR naquela região do Estado. Porém, este processo foi descontinuado devido à tecnologia limitada disponível na época e aos elevados custos de purificação e compressão do gás. Além disso, a alternativa do uso de álcool, como biocombustível estava em plena expansão e se mostrava mais viável (WEBER, BUSATO, 2007).

No mesmo ano, uma segunda aplicação foi avaliada para o biogás. Este sub-produto produzido na ETE na cidade de Pirai do Sul foi bombeado através de dutos para as residências de 286 famílias da comunidade do entorno daquela estação (SAVELLI,1983). O biogás desta ETE foi usado em fogões convencionais a título experimental. Na ocasião, as técnicas exigiam um sistema de purificação mais sofisticado inviabilizando o uso do biogás, devido ao alto custo de implantação e manutenção (WEBER, BUSATO, 2007). Assim, a SANEPAR abandonou os projetos envolvendo a utilização do biogás até meados dos anos 2000 por razões técnicas e principalmente pela descontinuidade dos programas de governo.

Em 2006, a SANEPAR se associou ao Centro de Pesquisa da Itaipu e a COPEL (Companhia Paranaense de Energia) para desenvolver o Programa de Desenvolvimento de Metodologia de Geração Distribuída. A proposta do programa considerava o potencial energético contido na biomassa residual e propunha sua

conversão em energia elétrica. O projeto continua a ser desenvolvido na ETE Ouro Verde em Foz do Iguaçu e, ainda, esta em fase de ajustes; necessitando de monitoramento e acompanhamento de especialistas visando obter a melhor eficiência técnica e econômica (WEBER, BUSATO, 2007).

Além do uso do Biogás como combustível automotivo, para uso doméstico e para produção de energia elétrica, existe a possibilidade de uso como combustível na geração de energia térmica. Esta forma de energia poderia ser usada para secagem térmica do lodo de grandes estações de tratamento de esgoto.

A disposição do lodo no Brasil geralmente ocorre em aterros sanitários (ANDREOLLI, et.al.,1999). Outra possibilidade é sua disposição em solo agricultável, pois propicia uma melhor qualidade ao solo, desde que seja feita com normas de segurança e respeitando a viabilidade econômica. Por outro lado, o elevado teor de umidade do lodo, cerca de 89%, (ANDREOLLI, et.al.,1999) limita o uso a determinado raio de distribuição.

Assim, a redução da umidade do lodo por secagem é uma medida que viabilizaria o transporte a maior distância. Por outro lado, a energia térmica usada na secagem pode provocar um custo adicional que poderia limitar ou mesmo inviabilizar o processo. Assim, se for possível aproveitar o biogás gerado em ETE produzido em processos anaeróbicos, pode-se viabilizar este uso para o lodo.

O emprego do biogás como fonte energética também vai ao encontro com a agenda global. Este enfoque ambiental pode ser atribuído a redução de emissão de gases poluentes e a transformação de resíduos em energia renovável, sendo baseado no conceito de reciclagem e de minimização de resíduos (LIMA,2005).

O estudo da utilização do processo de secagem térmica do lodo com uso de biogás da ETE Atuba Sul possibilitará avaliar o emprego desta tecnologia, a qual baseia-se na redução de custos de armazenamento, de transporte, decorrente da redução de massa e do volume de lodo a ser destinado e da diminuição de custos para redução de patógenos; pois, atualmente é adicionada a cal, que é um dos insumos mais caros no sistema de tratamento de lodo de esgoto (SANEPAR,2011).

A Região Metropolitana de Curitiba conta com uma população de 3,22 milhões de habitantes (IBGE, 2010). Ela possui um potencial de produção mensal de aproximadamente 295 ton/dia de lodo, em base seca (SANEPAR, 2012a).

Essa biomassa necessita ser tratada com adição de cal (CaO) na proporção de 0,5 ton por 1 ton de lodo (em base seca) para ser sanitizada. Essa mistura

precisa ser realizada dentro dos pátios da ETE e exige 120 dias em média para estar adequada as normas de qualidade. Isto constitui um problema de dimensões consideráveis e que demanda a busca de soluções ambientalmente sustentáveis.

Vários projetos foram desenvolvidos ou estão em desenvolvimento, na melhoria na qualidade do efluente, destinação do lodo e utilização do biogás na ETE Atuba Sul, por exemplo:

a) Projeto de pós-tratamento por flotação por ar dissolvido (FAD), complementar ao tratamento de reatores anaeróbios;

b) Projeto piloto de tratamento de águas residuárias para reúso do efluente nos processos da ETE e/ou venda de água industrial;

c) Projeto de medição de biogás;

d) Projeto de secagem térmica de lodo.

Este trabalho contribui com o estudo de avaliação técnica e econômica do uso de biogás da ETE Atuba Sul para secar o lodo produzido. Esta avaliação definirá a aplicabilidade dessa tecnologia para ser difundida a outras unidades. A avaliação do equipamento de secagem, da redução de volume e massa do lodo, da quantidade de biogás e eliminação de patógenos serão os parâmetros para serem aferidos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de biogás gerado na ETE Atuba Sul para secagem térmica e higienização do lodo gerado na mesma unidade.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a ETE Atuba Sul com base em dados de demanda de tratamento e de redução de DQO, de produção e destinação de lodo, e de produção e destinação de gás;
- b) Quantificar o potencial teórico de geração de biogás em ETEs tipo UASB usando os dados de DQO da ETE Atuba Sul e dados disponíveis da SANEPAR e da literatura;
- c) Avaliar os dados reais de geração de biogás em ETEs tipo UASB usando os dados de medição em tempo real da ETE Atuba Sul e compará-los com os valores teóricos;
- d) Avaliar a viabilidade técnica de uso do secador térmico tipo rotativo direto da empresa Albretcht;
- e) Avaliar a sustentabilidade econômica do processo de secagem térmica na ETE Atuba.

## 1.2 ESTRUTURURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 relata o estado da arte que foi observado dentre os materiais técnico-científico que foi possível acessar. O Capítulo 3 trata dos materiais, metodologia e procedimentos de obtenção de dados dessa dissertação. O Capítulo 4 apresenta os dados, bem como sua discussão com as informações disponíveis na literatura. Por último, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e, logo a seguir, as sugestões e trabalhos complementares.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A apresentação desta revisão bibliográfica está dividida em cinco partes. A primeira, descreve o tratamento anaeróbio tipo UASB com base em dados operacionais fornecidos de janeiro de 2010 a maio de 2012 com o uso dos parâmetros relacionados à eficiência de operação como remoção de DQO, produção e destinação de lodo, produção e destinação de gás. A segunda quantifica o potencial teórico de geração de biogás em ETEs. A terceira avalia os dados reais de geração de biogás usando os dados de medição e a comparação com os valores teóricos. A quarta avalia a viabilidade técnica do uso do secador térmico e, por último, a quinta parte define a viabilidade econômica do processo de secagem térmica.

### 2.1 TRATAMENTO ANAERÓBIO TIPO UASB

Segundo dados do PNAD (PROSAB, 2009),

49% do esgoto sanitário produzido no Brasil são coletados em rede pública. Apenas 32% deste esgoto são tratados, ou seja, cerca de 16% do esgoto produzido é convenientemente tratado. Diante destes números, aliado ao quadro epidemiológico e ao perfil sócio-econômico das comunidades brasileiras, constata-se que existe a necessidade de se implementar sistemas simplificados de tratamento dos esgotos para viabilizar um aumento quantitativo do tratamento do esgoto.

Com a implantação de reatores UASB no tratamento de esgoto o investimento em relação ao sistema aeróbio é em torno de 35%

Estes sistemas devem conjugar os seguintes requisitos (LETTINGA, 1983; VON SPERLING, 2005):

- a) baixo custo de implantação;
- b) elevada sustentabilidade do sistema, relacionada à pouca dependência de fornecimento de energia, de peças e equipamentos de reposição;
- c) simplicidade operacional, de manutenção e de controle;
- d) baixos custos operacionais;

- e) adequada eficiência na remoção das diversas categorias de poluentes (matéria orgânica biodegradável, sólidos suspensos, nutrientes e patogênicos);
- f) pouco problema com a disposição do lodo gerado na estação;
- g) baixos requisitos de área de operação;
- h) existência de flexibilidade em relação às expansões futuras e ao aumento de eficiência;
- i) possibilidade de aplicação em pequena escala (sistemas descentralizados);
- j) pouca dependência de operadores e engenheiros altamente especializados) e dependência da existência de grandes interceptores;
- k) fluxograma simplificado de tratamento (poucas unidades integrando a estação);
- l) elevada vida útil;
- m) ausência de problemas que causem transtorno à população vizinha;
- n) possibilidade de recuperação de subprodutos úteis, visando sua aplicação na irrigação e na fertilização de culturas agrícolas;
- o) existência de experiência prática.

Embora não exista uma solução que atenda integralmente a todos estes requisitos, existem várias alternativas que atendem, em maior ou menor grau, aos principais requisitos que devem ser observados num estudo técnico-econômico de escolha de alternativas. Entende-se que, atualmente, os sistemas anaeróbios encontram uma grande aplicabilidade no Brasil.

As diversas características favoráveis destes sistemas, como o baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos, aliadas às condições ambientais no Brasil, onde há a predominância de elevadas temperaturas, têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos em posição de destaque, particularmente os reatores de manta de lodo tipo UASB.

As principais vantagens e desvantagens dos sistemas anaeróbios são ilustradas no Quadro 1.

Vantagens	Desvantagens
a) baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios; b) baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de esgoto de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos; c) baixa demanda de área; d) baixos custos de implantação, da ordem de R\$ 20 a 40 <i>per capita</i> ; e) produção de metano, um gás combustível de elevado poder calorífico; f) possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; g) tolerância a elevadas cargas orgânicas; h) aplicabilidade em pequena e grande escala; i) baixo consumo de nutrientes.	a) as bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por uma grande gama de produtos químicos; b) menor produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios; c) a partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semeadura adaptado; d) alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária; e) a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; f) possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis; g) possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; h) remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória.

QUADRO 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS  
 FONTE: CHERNICHARO (1997)

A Figura 1 possibilita uma visualização mais clara de algumas das vantagens da digestão anaeróbia em relação ao tratamento aeróbio, notadamente no que se refere à produção de gás metano e à baixíssima produção de sólidos.

Cerca de 40 a 50% de degradação biológica ocorre somente nos sistemas aeróbios, com a conseqüente conversão em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Verifica-se uma enorme incorporação de matéria orgânica, como biomassa microbiana (cerca de 50 a 60%), que vem a se constituir no lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás carbônico, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (5 a 10%).

Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em biogás (cerca de 70 a 90%), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir no lodo excedente do sistema.

Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se, via de regra, mais concentrado e com melhores características de desidratação. O material não convertido em biogás, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (10 a 30%).

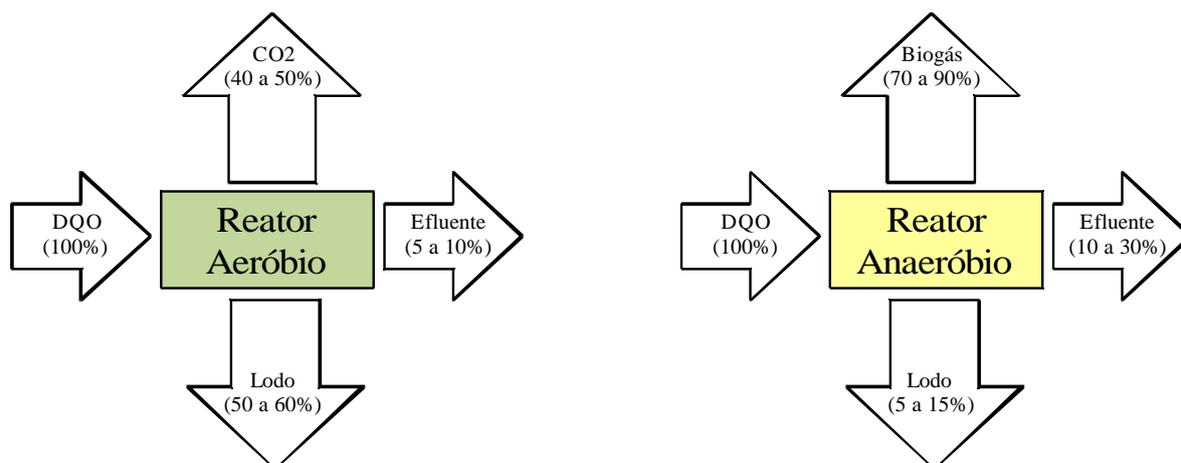


FIGURA 1 – CONVERSÃO BIOLÓGICA NOS SISTEMAS AERÓBIOS E ANAERÓBIOS.  
 FONTE: CHERNICHARO (1997)

Hoje em dia, pode-se afirmar que a tecnologia anaeróbia, aplicada ao tratamento de esgotos domésticos, encontra-se consolidada em nosso país, sendo que praticamente todas as análises de alternativas de tratamento incluem os reatores anaeróbios como uma das principais opções. Sem dúvida, uma grande contribuição para a consolidação e difusão da tecnologia anaeróbia no Brasil deve-se ao livro publicado pelo PROSAB, em seu Edital 1, intitulado: “*Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*” (CAMPOS et al., 1999). O referido livro contempla, de forma bastante abrangente, os principais aspectos relativos ao tratamento de esgotos domésticos por meio de sistemas anaeróbios.

Durante muito tempo, acreditava-se que as águas residuárias poderiam ser tratadas com elevada eficiência apenas quando se empregavam processos aeróbios e que o processo anaeróbio só se aplicava à digestão de lodos, com elevada concentração de sólidos orgânicos (CAMPOS et. al., 1999).

A evolução acelerada dos conhecimentos e do emprego de reatores anaeróbios não convencionais para o tratamento de despejo líquidos contendo quantidades relativamente pequenas de matéria orgânica é devida, em grande parte, à contribuição inicial oriunda do trabalho dos pesquisadores James C. Young e Perry L. McCarty, na década de 1960.

Segundo Kato, Florêncio e Arantes (2001),

Reatores anaeróbios são reatores biológicos nos quais o esgoto é tratado na ausência de oxigênio livre (ambiente anaeróbio), ocorrendo a formação de uma biomassa anaeróbia (lodo anaeróbio) e, como um dos subprodutos principais do processamento da matéria orgânica, tem-se biogás, que é composto principalmente de metano e gás carbônico.

Segundo Bárea (2006),

No reator anaeróbio UASB o despejo é introduzido e distribuído em toda a sua base (1); um manto de lodo anaeróbio é mantido no seu interior. O esgoto afluente é forçado a percolar através deste manto. Nesta passagem, partículas finas suspensas são filtradas e componentes solúveis são absorvidos na biomassa (2); a biomassa converte o esgoto em biogás e alguma nova biomassa. O biogás sai da biomassa na forma de bolhas o que ocasiona a necessária mistura. Na parte de cima do reator está localizada uma estrutura que direciona o biogás para os coletores de biogás (3). Parte dos sólidos (lodo) e líquidos são direcionados para os compartimentos de decantação, neste local não há biogás, portanto propicia a decantação dos sólidos. Os sólidos que sedimentam no decantador e retornam novamente para o compartimento em que se localiza o manto de lodo. E o efluente tratado é retirado do reator através de vertedores localizados nos decantadores (4).

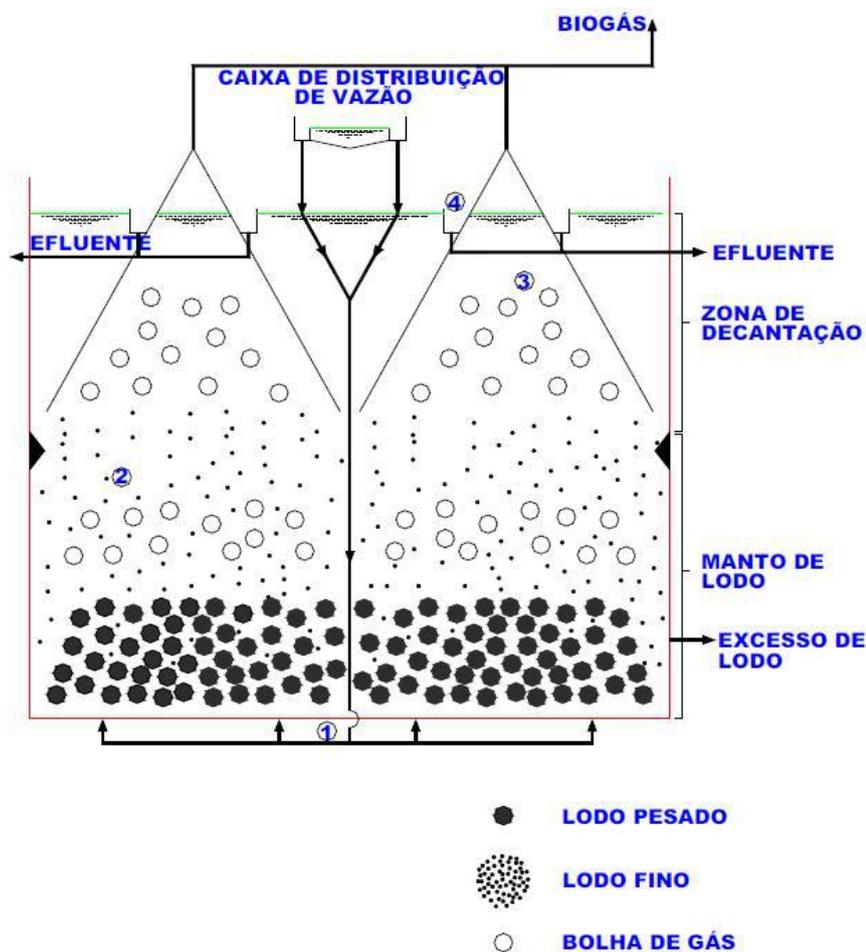


FIGURA 2 – VISTA ESQUEMÁTICA DO REATOR UASB  
FONTE: BÁREA (2008)

De acordo com Lettinga (1983), o tratamento de efluentes e produção de energia através da digestão anaeróbia parece extremamente atraente para países em desenvolvimento, porque apresenta diversas vantagens, tais como instalações de técnicas simples, produção e utilização de energia e pode ser usado em todas as escalas e circunstâncias variadas.

Segundo Foresti *et al.* (1999), os fatores que mais interferem no desempenho da digestão anaeróbia são a temperatura, a presença de nutrientes, os valores de pH e alcalinidade, a capacidade de assimilação de cargas tóxicas, a ocorrência de sobrecargas hidráulicas e a atividade metanogênica.

Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), o tratamento incluirá a redução da concentração das seguintes características do esgoto bruto: sólidos em suspensão, material orgânico (biodegradável), nutrientes (notadamente nitrogênio e fósforo) e/ou organismos patogênicos.

De acordo com as exigências da legislação ambiental vigente, o tratamento poderá envolver a redução de uma ou mais características citadas.

### 2.1.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio

Segundo Jordão *et al.*, (2004), o parâmetro DBO é utilizado para determinar a quantidade aproximada de oxigênio requerida para estabilizar biologicamente a matéria orgânica presente em uma amostra, para dimensionamento das unidades de tratamento de esgoto e para medir a eficiência dos processos de tratamento.

Metcalf e Eddy (2003) verificaram que após o período de 5 dias adotado para a determinação da DBO, a oxidação foi completada em torno de 60 a 70% e ao final de 20 dias, a oxidação está de 95% a 99% completa (DBO<sub>20</sub>).

### 2.1.2 Demanda Química de Oxigênio

A determinação da DQO tem o objetivo de medir a quantidade necessária de oxigênio para oxidar quimicamente a matéria orgânica (LAMAS,2007).

A relação DBO/DQO pode ser um indicativo da degradabilidade dos despejos. Valores altos da relação indicam que a fração biodegradável é elevada e valores baixos indicam que a fração não biodegradável é elevada. Para esgoto doméstico, a relação DBO/DQO varia entre 0,3 e 0,8. Se o valor for 0,5 ou mais, o esgoto é considerado facilmente tratável biologicamente. Se o valor for inferior a 0,3, provavelmente o esgoto possui algum componente tóxico ou compostos refratários de baixa biodegradabilidade (METCALF; EDDY, 2003).

Von Sperling (2005) utiliza a relação entre DQO e a DBO para obter conclusões sobre a biodegradabilidade dos despejos e do método de tratamento a ser empregado, mas a conclusão é similar (QUADRO 2).

RELAÇÃO DQO /DBO <sub>5</sub>	RECOMENDAÇÃO
Baixa < 2,5 (= DBO/DQO = 0,45)	fração biodegradável elevada, indicação para tratamento biológico
Intermediária entre 2,5 e 3,5	fração não voláteis e minerais (sólidos fixos), além da água. Suas características como composição e propriedades podem variar bastante, dependendo da origem do esgoto ; indicação estudos de tratabilidade
Elevada > 3,5 (= DBO/DQO = 0,29)	fração inerte elevada, possível tratamento físico-químico

QUADRO 2 - RELAÇÃO DQO/DBO E RECOMENDAÇÃO DE PROCESSAMENTO  
FONTE: VON SPERLING (2005)

### 2.1.3 O esgoto e a produção de Lodo

O esgoto é uma mistura rica de moléculas hidrofílicas e hidrofóbicas e íons em meio aquoso. Além disso, existe matéria suspensa em água e que pode sedimentar.

Segundo Jordão et al. (2004), os sólidos sedimentáveis correspondem à parcela que sedimenta no Cone Imhoff após o tempo de 60 minutos. Os sólidos que não sedimentam podem ser removidos do esgoto através de processos físico-químicos como coagulação seguida de sedimentação ou oxidação biológica. Esses processos geram uma massa de matéria rica em matéria orgânica e com elevadíssimo conteúdo de água, sendo denominado lodo.

Todos os sistemas biológicos de tratamento de esgoto produzem sólidos que se acumulam ao longo do tempo nas unidades de tratamento, havendo necessidade de descartá-los com determinada frequência (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Campos *et. al.* (1999) cita que é gerado cerca de 0,10 a 0,20 SST/kg DQO afluente em função da baixa taxa de volume gerado no processo anaeróbio.

O lodo é uma mistura complexa de sólidos de origem biológica e mineral que são removidos do esgoto. Os lodos resultantes do processo de tratamento de esgoto são constituídos basicamente de materiais orgânicos (sólidos voláteis) e inorgânicos (sólidos fixos); além da água. Suas características como composição e propriedades podem variar bastante, dependendo da origem do esgoto e da indicação de estudos de tratabilidade do processo de tratamento empregado. A Nihon Suido Consultants CO., LTD. (2010), classifica o lodo quanto ao teor de umidade e a característica geral do lodo conforme Quadro 3 abaixo:

Teor de Umidade	Caracterização do Lodo
> 90%	Líquido
> 50 à 70%	Bolo
> 30 à 50%	Granulado
Abaixo de 30%	Pó

QUADRO 3 - CARACTERIZAÇÃO DO LODO QUANTO AO TEOR DE UMIDADE

FONTE: NIHON SUIDO CONSULTANTS CO., LTD. (2010)

Andreoli *et al.*,(1999) cita que existem várias alternativas tecnicamente aceitáveis para o tratamento do lodo, o mais comum envolve a digestão anaeróbia que pode ser seguida pela destinação final em aterros sanitários exclusivos, seguida de alternativas como a disposição de superfície, a disposição oceânica, lagoas de armazenagem, a incineração ou a reciclagem agrícola. Esta última tem se destacado, a nível mundial, do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, por viabilizar a reciclagem de nutrientes, promover melhorias físicas, especialmente na estruturação do solo e por apresentar uma solução definitiva para a disposição do lodo.

O uso do lodo de esgoto na agricultura foi incrementado inicialmente na Europa, nos anos 1940 e 1950 e, posteriormente, no Estados Unidos. Atualmente, a reciclagem agrícola é uma alternativa muito importante de disposição do lodo. Essa aplicação também ocorre no Brasil e é regulamentada pela Resolução CONAMA 2005. Isto exige uma caracterização do lodo de esgoto, ou produto derivado a ser aplicado, e deve incluir os seguintes aspectos: I – potencial agrônômico; II – substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas; III – indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos; e IV – estabilidade.

#### 2.1.4 Produção e aproveitamento de Biogás

Biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos, sendo formado principalmente por metano e dióxido de carbono, em média em partes iguais. Quanto maior a formação de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Há ainda dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico (causador de mau cheiro), traços de siloxinas (que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético) e vapor d' água (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003).

O biogás foi descoberto por volta do século XVIII pelo pesquisador Alessandro Volta, que iniciou sua produção em ampla escala por biodigestores difundidos na Índia e também na China tendo como finalidade suprir as necessidades energéticas na zona rural (SILVEIRA, 1981).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás como água e o dióxido de carbono, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. No caso do gás sulfídrico, o mesmo pode acarretar corrosão precoce, diminuindo tanto o rendimento, quanto a vida útil do motor térmico utilizado (COELHO *et al.*, 2006).

A siloxina, também presente na composição do biogás, é um composto de sílica proveniente de produtos de higiene pessoal e cosmético. Sua presença, na ordem de ppb (partes por bilhão) acarreta, ao longo do tempo, problemas nos rotores de turbinas e motores pela formação de grãos de sílica (areia) no interior dos equipamentos, devido à elevada temperatura (CAPSTONE, 2001).

A geração de biogás nos digestores é um resultado direto da destruição dos sólidos voláteis pelos microrganismos metanogênicos em processo de digestão anaeróbia. A produção específica de biogás é normalmente da ordem de 1 metro cúbico de gás nas condições normais de pressão e temperatura por kilograma de sólido volátil destruído.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), a produção de biogás é de 0,75 a 1,12 m<sup>3</sup>/kg SSV destruído. Neste processo, a destruição de SSV é da ordem de 30 a 50% do valor afluente.

Mendonça e Campos (2007) cita que a produção de biogás em reatores UASB em termos de DQO removida é de 100 a 350 L/kg DQOr, segundo Droste (1997), enquanto Metcalf e Eddy (2003) comenta que é de 341 L/kg DQOr.

O biogás produzido em uma ETE é constituído basicamente de metano (entre 60 e 70%); gás carbônico (entre 25 a 30%) e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e gás sulfídrico. O poder calorífero do biogás situa-se entre 21.000 e 25.000 kJ/m<sup>3</sup>, conforme Qasin (1985), o que torna de grande interesse para aproveitamento em processos que necessitam do uso de energia como aquecimento de digestores ou secagem térmica.

O quadro 4 abaixo representa uma coletânea de outros autores quanto a composição de biogás em reatores e digestores anaeróbios.

Referência	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Van Handel e Lettinga(1994)	70 a 80%	n.q	n.c	n.c
Noyola <i>et al.</i> ,(2006)	70 a 80%	5 a 10%	10 a 25%	n.c
Agrawal <i>et al.</i> ,(1997)	n.c	n.c	n.c	0,11 a 0,39%
David(2002)	60 a 70%	n.c	n.c	n.c
Alves(2000)	50 a 90%	10 a 50%	0 a 0,1%	0 a 0,3%
COPASA(2011) <sup>1</sup>	68,20%	31,80%	<0,01%	n.c
Splenger(2009) <sup>2</sup>	60,65%	3,80%	27,90%	n.q
Coelho <i>et al.</i> ,(2006)	75,80%	4,75%	15,50%	0,06%
SABESP(2001) <sup>3</sup>	66,5%	30,5%	0,5%	0,01%

QUADRO 4 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS

Fonte: O autor (2012)

Todos estes constituintes gasosos, em maior ou menor grau, se solubilizam no líquido, o que dificulta, portanto, a sua captura normal e condução para destino adequado. A este respeito, Van Haandel e Lettinga (1994) e Noyola, Sagastume e Hernandez (2006), relataram que uma parcela significativa dos gases gerados no processo de tratamento tende a permanecer dissolvida no líquido e, assim, sair com o efluente tratado ou encontrar outra rota de desprendimento.

<sup>1</sup> CO < 0,001%; O<sub>2</sub> = 0,01 e umidade = 1,5%

<sup>2</sup> O<sub>2</sub> = 5,45% e H<sub>2</sub> = 9,00%

<sup>3</sup> O<sub>2</sub>= 0,5% e umidade = 2,5%

De fato, o biogás é produzido em um digestor anaeróbio quando as concentrações dos constituintes na fase líquida excedem as concentrações de saturação (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

A lei de Henry permite que se calcule, para uma dada pressão parcial de um componente na fase gasosa, a sua concentração de saturação na fase líquida. No entanto, segundo Paus *et al.* (1990), nos processos anaeróbios, nos quais muitos diferentes gases (metano, nitrogênio, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono) são produzidos e/ou consumidos, o problema de transferência de líquido-gás é pobremente documentado. Os mesmos autores complementam afirmando que nestes processos biológicos com formação de gases, a transferência de massa líquido para gás é crucial.

Logo, em busca destas tecnologias, notou-se que todos os processos de tratamento de efluentes baseados em processos biológicos ou que envolviam alguma unidade de bio-digestão eram potenciais geradores de biogás, como por exemplo, sistema de reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), filtro anaeróbio, lagoas anaeróbias, lagoas facultativas, entre outros (CENBIO, 2004).

Existem diversas tecnologias para efetuar esta conversão. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. As turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo Otto são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética (PECORA, 2006).

Caso estas aplicações citadas não sejam adotadas, o biogás deve ser queimado em *flare*, evitando assim a emissão de metano para a atmosfera. A maior componente do biogás, o metano, lançado na atmosfera apresenta potencial de poluição de 21 vezes superior ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no que se refere ao efeito estufa, sendo que sua utilização na geração de energia leva a uma redução do potencial de poluição ambiental (COELHO, *et al.*, 2006). Entretanto, quando queimado em *flare* representa uma quantidade de energia que sai do sistema sem ter o seu potencial energético aproveitado (PECORA, 2006).

De acordo com Genovese, Udaeta e Galvão (2006), em cenários futuros haverá muitas vantagens em produzir energia da biomassa, principalmente quando

as fontes de energia renovável se tornar competitivas em relação aos combustíveis fósseis, o que se espera que ocorra por volta de 2020.

Bley (2006) apud Hefner III (2006), demonstrou como a humanidade utilizou e desenvolveu seus combustíveis em cada período e os foi substituindo diante dos fatores determinantes como escassez, efeitos negativos imprevisíveis, impactos ambientais, desempenho econômico, e outros. No estudo de tendência do uso dos gases até o seu ponto culminante, o hidrogênio, demonstrou que numa etapa não pode ser ignorada ou negligenciada a passagem pela intensa que compõe o biogás. Será necessário desenvolver e aprimorar suas aplicações, como se fosse um estágio preliminar, ou precursor da economia do hidrogênio.

No Brasil, os estudos com biogás foram iniciados de maneira mais intensa em 1996. Entretanto, os resultados alcançados já demonstram um bom domínio tecnológico podendo ser qualificado como apto a desenvolver um vasto programa no âmbito nacional com biogás, seja no setor agrícola ou no setor industrial (MARTINS; ASSIS, 2007).

Para garantir um sistema de recuperação do biogás, técnico e economicamente, deve haver disponibilidade de biogás, operação satisfatória do sistema e garantia de compra do excedente de energia gerado. Além de incentivar a melhor prática, a agência ambiental deve impor a correta queima do biogás em queimadores ou seu uso para fins energéticos e/ou térmicos (PECORA, 2006).

A estimativa da produção de metano pode ser feita a partir da massa de DQO degradada.

A partir da Equação (1), observa-se que um mol de metano requer dois moles de oxigênio para sua completa oxidação a dióxido de carbono e água, ou seja, cada 16 gramas de CH<sub>4</sub> produzido e retirado da fase líquida correspondem à remoção de 64 gramas de DQO do despejo.



De acordo com Lima (2005), o poder calorífico do biogás depende de sua concentração de metano, conforme mostra a Figura 3.

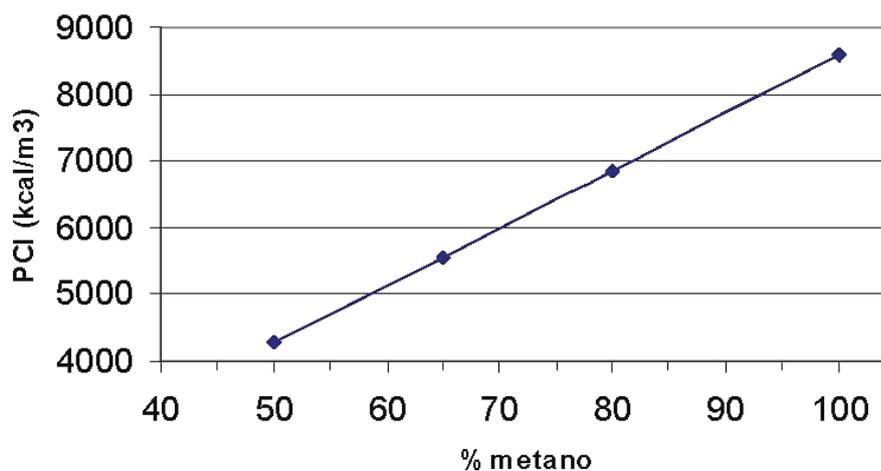


FIGURA 3 - PODER CALORÍFICO INFERIOR DO BIOGÁS EM FUNÇÃO DO PERCENTUAL DE METANO  
 FONTE: LIMA (2005)

Segundo David (2002), a concentração de metano no biogás resultante da digestão anaeróbia de lodo fica entre 60 e 70 %, resultando um poder calorífico inferior (PCI) por volta de 5.500 kcal/m<sup>3</sup>. Apenas para título de comparação, Tabela 1 apresenta o PCI para vários tipos de gases (DAVID, 2002).

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO INFERIOR DE VÁRIOS TIPOS DE GASES

Gases	PCI em kcal/m <sup>3</sup>
Metano (CH <sub>4</sub> )	8.500
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	22.000
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	28.000
Gás Natural	7.600
Biogás	5.500

FONTE: DAVID (2002)

## 2.2 QUANTIFICAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

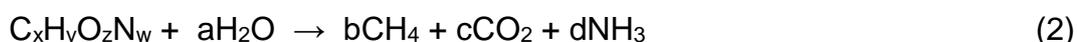
### 2.2.1 Estimativa de Produção de Biogás

Há duas maneiras para estimar teoricamente a produção de metano; uma baseada na análise elementar do despejo, e a outra na DQO removida (CHERNICHARO, 1997). A avaliação experimental é baseada na produção de

metano; sendo que é necessária a medição da vazão do biogás e discriminação dos constituintes.

### 2.2.1.1 Estimativa a partir da composição química do despejo

A reação da digestão anaeróbia é dada pela equação de Buswell (2) (CHERNICHARO, 1997).



Onde:

$C_xH_yO_zN_w$  é a composição química do despejo

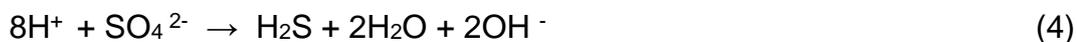
x, y, z, w são as frações atômicas da composição química do despejo

a, b, c, d representam as quantidades molares dos componentes da reação, que podem ser obtidas das frações x, y, z, w

Em particular, o número de moles do metano é calculado por:

$$b = x/2 + y/8 - z/4 - 3w/8 \quad (3)$$

Na presença de oxigênio e de doadores inorgânicos, como nitrato, sulfato e sulfito, a produção de metano diminui pelo consumo de hidrogênio para produção de água. A reação envolvendo sulfato exemplifica o processo:



O uso da equação de Buswell necessita da análise qualitativa e quantitativa dos componentes químicos do despejo. Cada componente tem uma fórmula  $C_xH_yN_w$  distinta e o cálculo de DQO e de metano produzido é feito para cada componente individualmente e em seguida os resultados são somados ponderadamente (CHERNICHARO, 1997). Neste caso, o valor calculado se aproxima do valor previsível bioquimicamente. Mas, esse tipo de avaliação não é viável na prática devido a composição variável e complexa do despejo orgânico.

### 2.2.1.2 Estimativa a partir da DQO removida

A DQO acidificável é uma parcela da DQO biodegradável que estará verdadeiramente disponível para a transformação metanogênica, pois uma parte desta é convertida por outros tipos de células bacterianas. Assim a quantidade de DQO biodegradável afluyente que pode ser acidificada é o somatório das parcelas convertidas em ácidos graxos voláteis e em metano (CHERNICHARO, 1997).

A  $DQO_{cel}$  refere-se ao substrato que é consumido pelos microrganismos fermentativos e convertido em células. Dessa forma, nem toda a DQO estará disponível para bactérias metanogênicas produzir metano, uma vez que parte da mesma é convertida em novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

A DQO recalcitrante refere-se à parcela de substrato orgânico que não pode ser degradada pelos microrganismos fermentativos. É devida aos substratos complexos, submetidos ao tratamento em reatores anaeróbios contendo biomassa ainda não adaptada aos mesmos, ou aos substratos considerados biologicamente inertes nas condições do processo (CHERNICHARO, 1997).

A produção de metano implica na remoção de DQO do despejo. Para oxidação do metano produzido são necessários dois moles de oxigênio, como mostra a equação:



Portanto, para cada mol (16 gramas ou 22,4 l nas CNTP) de metano produzido são removidos 2 moles (64 gramas) de DQO do despejo (CHERNICHARO, 1997). Nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), isto corresponde a 350 ml de metano para cada 1 kg de DQO degradada. A estimativa teórica de produção de metano em função da demanda química de oxigênio (DQO), definida por Chernicharo (1997), é dada pela equação:

$$V_{CH_4} = DQO_{CH_4} / k(T) \quad (6)$$

Onde:

$V_{CH_4}$  = volume de metano produzido, em litros

$DQO_{CH_4}$  = DQO removida do reator e convertida em metano, em g

$k(T)$  = fator de correção para temperatura de operação do RALF.

O fator de correção para temperatura é dado pela equação:

$$k(T) = P \cdot COD / [R \cdot (273 + T)] \quad (7)$$

Onde:

$P$  = pressão atmosférica (101.325 Pa)

$COD$  = carbono orgânico dissolvido por mol de  $CH_4$  = 64 g DQO/mol

$R$  = constante universal dos gases = 8,31 J/mol.K

$T$  = temperatura de operação do reator em °C.

Neste caso, o valor é o potencialmente produzido, mas tem variabilidade devido à diferença que realmente pode ser catabolizada como metano e dióxido de carbono.

### 2.2.1.3 Estimativa utilizando a composição de biogás de fontes bibliográficas

As composições de biogás de ETE estão disponíveis também na literatura técnico-científica. Trocciola e Healy (1995) apresentaram que o biogás é constituído de metano (57-66% em volume), dióxido de carbono (33-39% vol), nitrogênio (1-10 % vol) e uma pequena quantidade de oxigênio (< 0,5%). Os constituintes minoritários são compostos de enxofre, sulfeto de hidrogênio, traços de compostos halogenados e outros compostos orgânicos. Os níveis de compostos de enxofre podem variar de 6 a 200 ppm, enquanto compostos halogenados variam de 0 a 4 ppm.

Segundo (ALVES, 2000), o biogás é uma mistura dos seguintes gases: metano (50-90% vol), gás carbônico (50-10% vol) e outros gases (1 a 5% vol), sendo divididos em nitrogênio de ( $H_2$ ); de 0 a 1% vol e ácido sulfídrico( $H_2S$ ); de 0 a 3% vol.

A composição do biogás da ETE Arrudas, com acompanhamento da Universidade Federal de Minas Gerais, constatou os seguintes percentuais: metano

(68,2%), dióxido de carbono (31,8%), monóxido de carbono (< 0,001%); nitrogênio e oxigênio inferiores a 0,01, umidade 1,5% e poder calorífero de 24.798 J/kg (COPASA, 2011),

No ano de 2009, as medições de biogás em 03 linhas na ETE Atuba Sul foram feitas utilizando um anemômetro. A Tabela 2 resume a composição de cada linha no tempo, composta por quatro reatores tipo RALF. O valor médio de metano foi de 60%, o que revela um bom potencial energético.

TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO PELA ETE ATUBA SUL

GÁS	COMPOSIÇÃO (% mol/mol)			
	Linha 02	Linha 03	Linha 04	Média
CH <sub>4</sub>	62,118	57,415	62,420	60,651
CO <sub>2</sub>	3,853	3,600	3,968	3,807
N <sub>2</sub>	27,133	30,168	26,423	27,908
O <sub>2</sub>	4,888	6,610	4,863	5,454
H <sub>2</sub>	0,000	0,000	0,000	0,000

FONTE: SPRENGER (2009)

### 2.3 SECAGEM TÉRMICA

De acordo com Von Sperling (2005), o processo de secagem térmica do lodo é uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução do teor de umidade de “tortas” oriundas do desaguamento de lodos orgânicos domésticos e industriais disponíveis atualmente em uso. A redução da umidade a ser atingida pode ser controlada e o teor de sólidos do produto final depende da rota de disposição escolhida, citando-se como exemplos:

- a) Lodos destinados à incineração: necessitam de teores de sólidos entre 30 e 35% para garantir a operação auto-térmica do incinerador.
- b) Lodos para disposição em aterros sanitários; aconselhável teor de sólidos de 65%.
- c) Bio-sólidos destinados ao mercado agrícola com venda de varejo (utilização irrestrita): necessitam de teores de sólidos acima de 90%.

A entalpia de vaporização da água contida no lodo é de 2.744 kJ, mas este valor é geralmente acrescido de 100% para compensar as condições reais de operação (VON SPERLING, 2005).

A demanda total de energia dependerá da eficiência do equipamento escolhido e do tipo de lodo processado. Parte desta energia deverá vir de fontes externas, como óleo combustível, gás natural, etc. Para o caso de lodos anaeróbios, pode-se utilizar o biogás gerado no digestor como fonte auxiliar de energia.

A aplicação do biossólido submetido a processos de secagem térmica no solo pode ser: aplicação direta, enchimento para fabricação de fertilizantes e fabricação de fertilizante organomineral (DAVID, 2002).

### 2.3.1 Evolução na Europa

Segundo Lowe *et al.* (1995), a secagem térmica para lodo tem sido praticada no Reino Unido por muitas décadas. Uma das primeiras plantas, um secador rotativo Ruggles Cole, foi instalado por Bradford em Huddesfield em 1915. Alguns anos mais tarde em 1933, Halifax Borough Council instalou um secador Scott. Secadores térmicos também foram construídos durante a década de 60 em Cheltenham, Bolton, Horsforth, Roby(Huyton)..

Em 1976, o primeiro de uma nova geração de secadores de tambor rotativo foi encomendado em Halifax (Yorkshire). No entanto, ao final dos anos 1970, a Halifax e plantas Dewsbury foram os dois únicos remanescentes de plantas de secagem em operação no Reino Unido. Após problemas de odor, juntamente com um mercado em declínio para o produto semi-seco foi fechada a planta Halifax.

Nos anos 1980, Água Wessex descobriu que a secagem de lodo estava sendo praticada com sucesso na Suíça, e como resultado foi reintroduzida a secagem no Reino Unido com a construção de um tambor rotativo da marca Combi (SUIÇA COMBI SC Technology GmbH). A promoção do sistema de interesse reavivado em tecnologia de secagem como uma alternativa viável de opção para alcançar uma satisfatória solução ambiental para o problema de lodo, e algumas das companhias de água e esgoto estão agora considerando o processo como parte de sua gestão estratégia de lodo.

Nos Estados Unidos, cerca de 25% do total de biossólidos produzidos tem destinação agrícola. Na Europa e Canadá, o uso agrícola de biossólidos é de aproximadamente 37% do total produzido (TSUTIYA, 1999 *apud* DAVID, 2002).

Na cidade de Augsburg na Alemanha o lodo é digerido anaerobicamente e por dia são gerados 18.000 m<sup>3</sup> de biogás que é utilizado para geração de energia elétrica e térmica. São três módulos: o primeiro é gerado 580 kW de energia elétrica e 1.183 kW de energia térmica, o segundo gera 734 kW de energia elétrica e 1.079 kW de energia térmica e o terceiro gera 1.352 kW de energia elétrica e 1.294 de energia térmica. O consumo total da ETE é de 15.750.131 kWh, destes 14.143.888 kWh são fornecidos por geração própria (biogás), o que confere uma cobertura de energia de 91,3% (BMU,2012). O principal destino das 36.000 ton/ano de lodo geradas na ETE de Augsburg são as estações termoelétricas movidas a carvão (BMU, 2012).

### 2.3.2 Evolução da secagem térmica no Brasil

De um modo geral, segundo informações de fabricantes de secadores, a quantidade de energia necessária para evaporar a água contida no lodo é da ordem de 800 a 1000 kcal/kg de água evaporada. Isso equivale dizer que para um lodo com teor de sólidos de 30%, que se deseja secar para 90%, o consumo de energia será da ordem de 670 kcal por kg de lodo.

Considerando-se o gás natural como fonte de energia para secagem, com poder calorífero de 9.400 kcal por metro cúbico, cujo custo é da ordem de R\$ 0,50 por metro cúbico (aproximadamente US\$ 0,20) para consumos industriais e comerciais, situados na faixa de 5.000 a 50.000 metros cúbicos mensais, conforme informações da Compagás. Considerando-se, ainda, um equipamento de secagem cuja eficiência térmica produza evaporação de 1kg de água com 900 kcal, o custo do combustível para a secagem será da ordem de R\$ 120,00 por tonelada de lodo seco. Ou, na ordem de R\$ 50,00 por tonelada de água evaporada do lodo (DAVID, 2002).

A solução estruturada para a destinação dos bio-sólidos produzidos na Região Metropolitana de São Paulo é a aplicação da tecnologia de secagem térmica

em percentual significativo da produção de maneira a viabilizar a utilização benéfica dos bio-sólidos na agricultura. Foi assim preconizada a implantação de duas centrais de secagem térmica, a serem implantadas em uma primeira etapa na ETE São Miguel, e posteriormente na ETE Barueri. O aterro sanitário exclusivo deverá receber assim uma parte dos lodos na forma de tortas desidratadas provenientes das ETES situadas nas regiões de maior concentração industrial, e o excedente dos bio-sólidos secos e granulados rejeitados para o uso agrícola. A alternativa de incineração somente será necessária se fracassadas todas as alternativas de uso benéfico dos bio-sólidos (DAVID, 2002).

No relatório da Missão DKTI, a Alemanha convidou várias empresas brasileiras na área de saneamento e energia para apresentarem a situação de suas empresas em relação à utilização do biogás e a situação dos projetos existentes na Alemanha. Abaixo, está descrito a situação das empresas com base no documento gerado no encontro entre as instituições alemãs e brasileiras (BMU, 2012):

- a) O aproveitamento energético de biogás no Brasil encontra-se no início de seu desenvolvimento, apresentando um grande potencial (BMU, 2012).
- b) O governo prevê o tratamento de 91% dos esgotos urbanos até 2030 e disponibiliza verbas para a construção desta infraestrutura (PAC), e o PNRS prevê o tratamento adequado de resíduos até 2014 (GIZ, 2012).
- c) A ANEEL está elaborando a Chamada Pública 014/2012 de um projeto estratégico sobre o aproveitamento energético de biogás no âmbito do programa P & D do setor elétrico (GIZ, 2012). Alguns projetos já foram implementados, por exemplo: a ETE Arrudas, 06 plantas da Copel/Itaipu, sendo estas iniciativas isoladas (GIZ, 2012).
- d) A Resolução para geração distribuída até 1MW foi aprovado pela ANEEL em abril de 2012 (GIZ, 2012).
- e) As linhas de financiamento do Fundo Clima estarão disponíveis em breve para redução de GEE no setor de saneamento (GIZ, 2012).
- f) Em linhas gerais, as experiências com o tema Biogás nas empresas de saneamento no Brasil são inexpressivas (GIZ, 2012).
- g) Na SABESP iniciou com o abastecimento da frota veículos da companhia na região metropolitana na década de 1980. Atualmente à dois estudos em andamento: o primeiro sobre a gestão do lodo, utilizando o biogás como fonte de energia; e o segundo sobre o próprio uso do biogás

gerado na própria ETE para realizar a remoção da umidade de lodo e tornar sustentável o processo de recuperação de energia (VICENTE *apud* BMU, 2012).

- h) Na SANEPAR, os trabalhos que estão sendo realizados são: a mensuração de Biogás; testes de transmissores de vazão mássica em condições de guiamento passivo, aferindo a vazão, qualidade, temperatura e pressão.
- i) Um projeto piloto de energias renováveis na ETE Ouro Verde em Foz do Iguaçu foi implantado, com a utilização do biogás para produção de energia elétrica. Está em desenvolvimento a sua instrumentação. Há um projeto de sistema térmico de higienização e secagem de lodo nas ETEs de médio e pequeno porte. Há proposta de instalação de equipamentos de medição de biogás nas grandes estações (BUSATO *apud* BMU, 2012)
- j) A EMBASA está iniciando o projeto de pesquisa de aproveitamento de gás da ETE Jacuípe, no município de Feira de Santana, em parceria com a Coelba/Aneel e tendo consultoria da GIZ (ARAÚJO *apud* BMU, 2012).
- k) A CAESB tem diversos estudos de viabilidade de aproveitamento de geração de energia, geração de calor e combustível automotivo com pedidos de financiamento ao BID a partir do biogás (NEDER *apud* BMU, 2012).
- l) A COPASA tem os seguintes projetos: Usina termelétrica a biogás com capacidade instalada de 2,4 MW na ETE Arrudas, em operação desde 2010, e com geração média de 700 kw projeto de aproveitamento do lodo e do biogás para secagem térmica, incineração e geração de energia elétrica na ETE Ibirite, 160 kw e ETE Betim Central, 500 kw, a primeira, obra esta em licitação e a segunda esta em projeto (GAIO *apud* BMU, 2012).
- m) A ELETROBRÁS estima investimentos nos próximos anos via Programa de P&D+I da Aneel da ordem de até 2 bilhões mediante Chamada Pública de Projetos.
- n) O LACTEC realizou dois projetos: o primeiro de Gestão Ambiental de Resíduos da Suinocultura e Geração de Energia na cidade de Xavantina/SC – 2006; e o segundo para Instalação de Sistema Biodigestor e Gerador de Energia Elétrica no Regimento da Cavalaria de

Guarda em Brasília/DF 2007. Atualmente desenvolve o projeto de aproveitamento energético do biogás proveniente de resíduos agropecuários e águas residuárias industriais de vinhaça de cana-de-açúcar e no desenvolvimento de soluções que otimizam a geração e composição do Biogás, considerando as características específicas dos resíduos estudados e dos processos aplicados (SABBAG *apud* BMU, 2012).

- o) A ANEEL, através da Eletrosul Centrais Elétricas S/A, desenvolveu em 2010 um sistema de purificação de biogás para utilização de motores de combustão interna. A ANEEL, Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, estudou a purificação de gás metano oriundo de biogás através de coluna de absorção de gás carbônico e adsorção de gás sulfídrico (CHIARADIA *apud* BMU, 2012).
- p) A UFMG detêm várias experiências: caracterização quantitativa e qualitativa do biogás produzido e quantificação de perdas de metano dissolvido em efluente de reatores anaeróbios; desenvolvimento de modelo para estimar de forma mais realista o balanço de DQO e produção de metano e dispositivos para redução ou recuperação do metano dissolvido no efluente de reatores anaeróbios; aperfeiçoamento de motores de combustão interna (diesel e gasolina) para utilização com biogás, visando a cogeração de eletricidade e calor para uso em ETEs e desenvolvimento de secadores térmicos de lodo de esgoto (MELO *apud* BMU, 2012).
- q) A UFRJ está pesquisando à caracterização da geração de biogás, e a precipitação de fósforo na forma estruvita a partir da linha sobrenadante de digestor anaeróbio de lodo (JORDÃO *apud* BMU, 2012).

### 2.3.3 Tipos e características dos secadores térmicos

O processo de secagem térmica é uma das mais eficientes e flexíveis operações de redução do teor de umidade de “tortas” oriundas do desaguamento de lodos orgânicos domésticos e industriais disponíveis atualmente em uso. Pode ser

utilizado em diferentes tipos de lodo, primário ou digerido, sendo recomendável um teor de sólidos na alimentação entre 15 – 30 %, obtido através de desaguardamento mecânico (DAVID,2002).

Historicamente a secagem térmica tem sido adotada em ETEs existentes que estão sofrendo algum tipo de modernização e que já se utilizam de processos de estabilização biológica do lodo, principalmente digestão anaeróbia (ANDREOLLI et al.,1999). Em condições ideais, 2.744 kJ (655 kcal) de energia são necessários para evaporar um kg de água presente no lodo (DAVID,2002).

O lodo sai do secador em forma de “*pellets*” com diâmetro médio entre 2 e 5 mm e teor de sólidos acima de 90%, quando destinado a agricultura.(ANDREOLLI et al., 1999).

### **2.3.3.1 Classificação de secadores térmicos**

As formas mais úteis de classificação de secadores são quanto ao modo de transferência de calor para os sólidos úmidos e quanto as características de manipulação e propriedades físicas do material úmido.

Quanto ao processo de transferência de calor, os secadores podem ser classificados como: diretos, indiretos, radiantes ou mistos (DAVID, 2002).

Nos secadores diretos, o material entra em contato direto com o meio de seca: ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido, que serve como fonte de calor para conduzir o processo de secagem. A vantagem principal é que o lodo pode ser seco prontamente para teores de umidade inferiores de 20%. A principal desvantagem desse tipo de secador é a geração de grande quantidade de gases com odores. Outra desvantagem é o risco potencial de incêndio devido à presença de fino e poeiras gerados quando os lodos são transportados ou estocados (FROST et. al., 1990).

Nos secadores indiretos, o lodo permanece separado do fluido de transferência de calor por uma parede metálica. Essa parede metálica recebe calor do meio de transferência de calor, que pode ser vapor saturado ou óleo térmico. Sua temperatura encontrasse bem superior à do lodo úmido para que o calor seja transferido. O teor crítico de sólido é um parâmetro importante.

Segundo Tizi e Craen ([s.d] *apud* DAVID 2002), situa-se na faixa de 50 a 60% e deve ser levado em conta quando o lodo precisa ser seco para um teor de sólido maior.

Os secadores por radiação são semelhantes, construtivamente, aos secadores transportadores de esteira. O calor é transmitido ao lodo por radiação, não há contato do lodo com gases de combustão.

Os secadores rotativos é um dos tipos de secadores mais empregados para secagem de lodos biológicos e podem ser do tipo direto ou indireto. São constituídos por um ou mais cilindros rotativos, onde o lodo é deslocado continuamente ao longo da sua geratriz inferior pela ação das pás direcionadoras presas na face interna do cilindro, que também promovem o revolvimento do lodo. No secador do tipo rotativo direto, o lodo entra em contato com uma corrente de ar quente ao longo de seu percurso, o que promove a evaporação da água.

Duas medidas de controle muito importantes, associadas com a secagem térmica do lodo são: coleta de matérias particulados e eliminação de odores.

Os separadores tipo ciclone, com eficiência de 75 a 80%, são adequados a aplicações a gases com temperaturas de até 370 ° (METCALF; EDDY, 2003).

Os gases de exaustão devem ser aquecidos até aproximadamente 730 °C para a eliminação dos odores. Em temperaturas mais baixas, pode ocorrer oxidação parcial de componentes produtores de odores, o que resultada em um aumento na intensidade de odor produzido (DAVID, 2002).

### **2.3.3.2 Secador granular rotativo de lodo da empresa Albrecht**

O secador granular de lodos BRUTHUS apresenta-se como uma tecnologia que utiliza gases quentes para secagem do lodo. O tambor do secador é constituídos em um corpo cilíndrico, confeccionado em chapa de aço carbono SAC 300. Externamente, o tambor possui isolamento térmico com lã de rocha revestida com chapa de alumínio. Este isolamento tem a finalidade de garantir a proteção pessoal e a otimização energética.

O tambor possui internamente aletas direcionadoras de fluxo, moinhos e peneiras que tem a finalidade a granulação do lodo, garantindo a troca térmica e a

perfeita higienização do lodo. O sistema motriz é constituído por acionamento direto em duas rodas de apoio para uma melhor distribuição de cargas. O controle do tambor é efetuado através de inversor de frequência.

As rodas motrizes e as de apoio são revestidas em poliuretano para reduzir o nível de ruído, evitar vibração e aumentar a vida útil da pista de rolamento.

A secagem do lodo úmido no secador granular BRUTHUS ocorre em uma única passagem, sem necessidade de reprocessamento do material, evitando a formação de excesso de finos, risco de incêndio e problemas de emissões de material particulado.

O secador térmico Bruthus é empregado para lodos desaguados em centrífuga, filtro-prensa, prensa desaguadora, leito de secagem ou outros processos que garantam um teor de sólidos de aproximadamente 10 a 20%.

O projeto de sistema de secagem térmica levará em conta os seguintes requisitos: sistema interno de granulação do lodo para garantir uma perfeita homogeneização e aumentar a eficiência de secagem; garantir uma perfeita higienização quanto à patógenos; concentração de sólidos na saída do secador de até 90%; redução de peso e volume; tratamento de gases composto de multiciclone e lavador de gases, para a eliminação de odor, material particulado e enquadramento das emissões atmosféricas (ALBRECHT, 2007).

## 2.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA

### 2.4.1 Técnicas de análise financeira

Fundamentalmente, toda operação financeira é representada em termos de fluxos de caixa, ou seja, em fluxos futuros esperados de recebimentos e pagamentos de caixa. A avaliação desses fluxos consiste, em essência, na comparação dos valores presentes, calculados segundo o regime de juros compostos a partir de uma dada taxa de juros, das saídas e entradas de caixa (ASSAF NETO, 1988).

Os métodos da taxa interna de retorno e do valor presente líquido são admitidos como os de maior utilização e rigor conceitual nas análises das operações

de aplicações e captações financeiras e de projetos de investimentos (MACEDO; SIQUEIRA, 2006).

A taxa interna de retorno é a taxa de juros que iguala, em determinado momento do tempo, o valor das entradas (recebimentos) com os de saídas (pagamentos) previstas de caixa (ASSAF NETO, 1988). A alternativa de investimento é atrativa quando a taxa interna de retorno é maior que a taxa mínima de atratividade.

De acordo com Hirschfeld (2000), o método do valor presente líquido (VPL), também chamado método do valor atual líquido, tem como finalidade determinar um valor no instante considerado inicial, a partir de um fluxo de caixa formado de uma série de receitas e dispêndios. A alternativa de investimento é considerada atrativa quando o valor presente líquido é maior que zero.

A viabilidade financeira de um empreendimento também é examinada dentro de um prazo de interesse, no qual se deseja saber o esforço produtivo a ser realizado vale mais, do que uma simples aplicação dos valores envolvidos a taxas mínimas de atratividade. Para existir a viabilidade é necessário que, nos instantes verificados, os benefícios resultantes sejam superiores aos custos empregados (HIRSCHFELD, 2000).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ATUBA SUL**

A caracterização da estação de tratamento de esgoto do Atuba Sul foi realizada com base em dados operacionais fornecidos pela SANEPAR de janeiro de 2010 a maio de 2012. Os parâmetros utilizados foram relacionados à eficiência, como remoção de DQO, à produção e destinação de lodo e de biogás.

##### **3.1.1 Descrição geral da ETE Atuba Sul**

###### **3.1.1.1 Localização**

A estação de tratamento de esgoto Atuba Sul localiza-se no Jardim Acrópolis, Bairro Cajuru, do município de Curitiba, Paraná. Ela fica à margem direita do Rio Atuba, próximo a confluência deste com o Rio Iguaçu. A área total disponível é de 64.780,00 m<sup>2</sup>. A topografia da região apresenta-se relativamente plana, cuja cota média da área é de 873,50 m. A estação recebe esgoto dos municípios de Curitiba, São José dos Pinhais, Pinhais, Colombo e Piraquara.

A ETE Atuba Sul receberá esgoto das cidades de Quatro Barras e parte de Campina Grande do Sul com as obras em andamento da desativação da ETE Menino Deus, conforme pode ser visto na Figura 4.

###### **3.1.1.2 Situação atual e proposta de melhoria**

A ETE Atuba Sul encontra-se em operação desde o ano de 1998. Segundo dados da SANEPAR (2012a), o esgoto recebido em maio de 2012 era gerado por aproximadamente 171.909 economias totais, sendo que destas 160.255 destacam-

se como economias domiciliares. Está ligado ao sistema de afastamento e transporte e corresponde a um volume de 1.901.792 m<sup>3</sup> de esgoto tratado por mês.

A Figura 5 apresenta um fluxograma com vista superior das unidades existentes da ETE. A Figura 5 mostra uma vista aérea do sistema de entrada, os reatores anaeróbios, pós-tratamento, prédio de desaguamento de lodo e o laboratório.

A tabela 3, abaixo, apresenta a variação de vazão num período de 30 dias. Nos dias de chuva a ETE não suporta a vazão de entrada.

TABELA 3 – VARIACÃO DE VAZÃO (PERÍODO DE 30 DIAS)

	Qnominal	Qmédia(medida)	Qmínima	Qmáxima
ETE Atuba Sul(l/s)	1120	1026,52	576,98	3142,3

FONTE: O autor (2012)

As unidades no início de operação da ETE eram a elevatória final de esgoto bruto para recuperação de nível, gradeamento mecanizado, desarenação mecanizada, calha Parschal de medição de vazão e controle de nível, caixa de distribuição de fluxo dos reatores anaeróbios, tratamento anaeróbio através de 16 reatores retangulares com volume de 2.000 m<sup>3</sup> cada, elevatória do efluente dos reatores.

Posteriormente, em 2009, foram implantadas unidades de pós-tratamento com capacidade média de 1.120 l/s, constituídas de flotação por ar dissolvido (FAD), com objetivo de polimento dos esgotos já tratados nos reatores anaeróbios, reduzindo ainda mais os valores de carga orgânica do efluente final.

Com dois módulos de 560 l/s cada, elevatória de descarte de lodo, o qual abriga um tanque vertical com capacidade de 3.000 litros para preparação manual de polímero, um silo de cal de 25 m<sup>3</sup>, um dosador volumétrico de cal, um decantador centrífugo de capacidade nominal de 16.000 l/h (4,44 l/s), um misturador lodo e cal, três roscas transportadoras, um compressor de ar e duas caçambas de 4m<sup>3</sup> para retirada de lodo, um adensador circular de lodo, prédio de desidratação de lodo, pátio de cura com 1.024 m<sup>2</sup>, calha Parschal para medição de vazão do efluente final e cloração do efluente na saída dos reatores, conforme Figura 5.

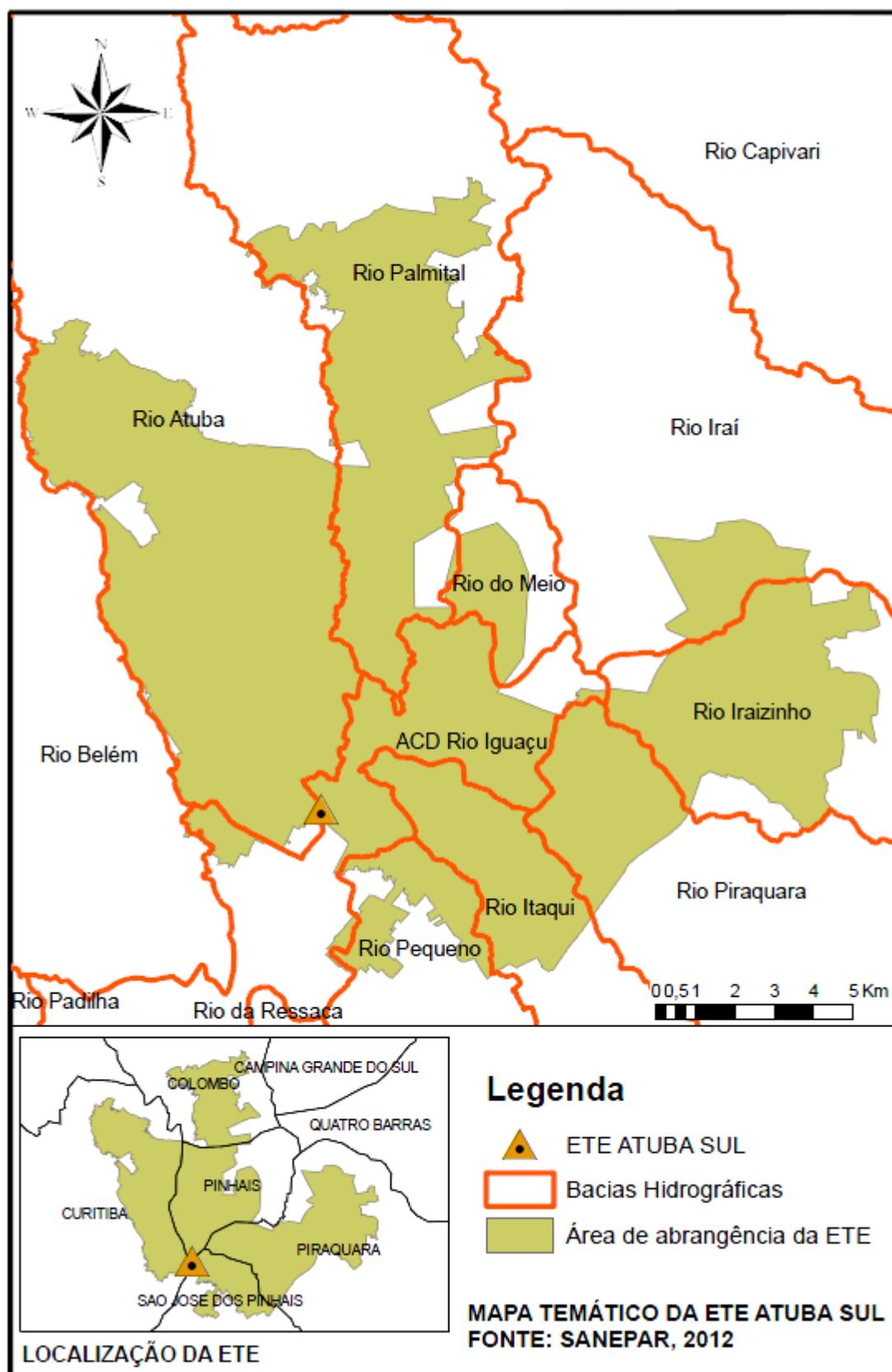


FIGURA 4 – ETE ATUBA SUL-BACIAS HIDROGRÁFICAS, ÁREAS DE ABRANGÊNCIA E LOCALIZAÇÃO  
 FONTE: O autor (2012)

Com a nova ampliação das redes coletoras de esgoto na Bacia do Atuba, está programada a execução de um novo empreendimento para iniciar no primeiro semestre de 2013. Este empreendimento prevê a ampliação de 50% da capacidade dos reatores e a implantação de um sistema de secagem térmica de lodo para os 16 módulos de tratamento existentes e os 8 módulos projetados, conforme o fluxograma da Figura 5. O sistema de secagem de lodo com uso ou não de biogás é o foco de estudo deste trabalho.

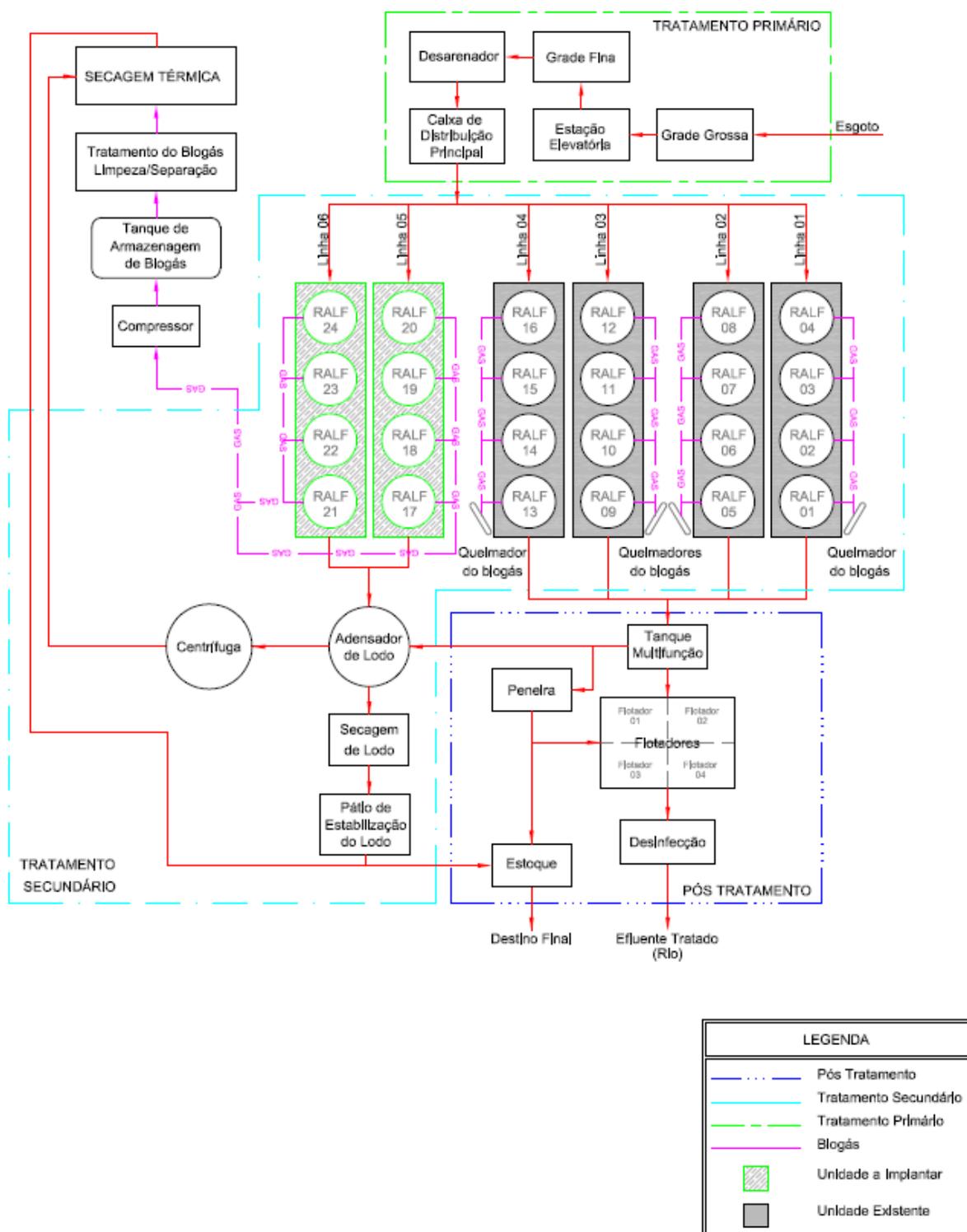


FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DA ETE ATUBA SUL  
 FONTE: O autor (2012)

### 3.1.2 Parâmetros operacionais da ETE Atuba Sul

O principal parâmetro de operação da ETE Atuba Sul para este estudo foi considerado a DQO, o qual está relacionado com a matéria orgânica, produção e destinação de lodo e produção e destinação de biogás.

#### 3.1.2.1 Remoção de DQO

A demanda bioquímica de oxigênio (DQO) é medida pela SANEPAR (SANEPAR mg/L, baseado na *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, (APHA,2005). A diferença entre o valor final e o inicial é considerado como grau de remoção de DQO.

#### 3.1.2.2 Produção e destinação de lodo

Para um bom funcionamento do reator é necessário promover periodicamente o descarte do lodo. A quantidade do lodo a ser descartado é definida pelo Técnico do Laboratório. Os parâmetros de tomada de decisão estão no relatório de operação e manutenção do reator anaeróbio de lodo fluidizado da ETE Atuba Sul e deverão ser realizados quando: a) a altura do manto de lodo está acima de 2,20m em relação ao fundo do reator no horário de pico da vazão; b) o teor da análise de sólidos sedimentáveis está maior que 1,0 mg/L.h no horário de pico da vazão; c) a relação SSV/ST do colchão do lodo está abaixo de 40% (SANEPAR, [s.d]a).

Em acordo com as diretrizes da SANEPAR, a alternativa de disposição final de resíduos com aplicação agrícola deve observar que os lodos desaguados e tratados de diferentes procedências deverão ser estocados segregadamente, com identificação de origem, volume, data de recebimento, data de caleação e datas de amostragem (SANEPAR, 2012a)

A princípio, os lodos desaguados que serão destinados a agricultura passarão por processo de higienização através da calagem. Portanto, as instalações

para o tratamento de lodo poderão variar em função do tipo de desaguamento e da quantidade de lodo a ser processada.

Além da área destinada ao tratamento de lodo, devem ser consideradas áreas adicionais para o recebimento do lodo de 30 dias, estocagem de cal para a cura do lodo, onde o lodo caleado será depositado em leiras por um período estimado de 60 dias, e para estocagem durante o período de espera até recebimento dos resultados de análises, estimados em 30 dias para a liberação do lote para fins agrícolas, totalizando um prazo de 120 dias (SANEPAR, 2006).

### **3.1.2.3 Produção e destinação de biogás**

O biogás na ETE Atuba Sul está sendo gerado nos 16 RALFs. Neste caso, são conduzidos em quatro linhas e queimados no *Flare*. O queimador de gás precisa de manutenção periódica, bem como as válvulas corta-chamas do tipo colméia, com manutenção bimestral e o acendedor automático, com manutenção mensal.

O processo de tratamento anaeróbio gera gases como o metano e o gás sulfídrico. O gás sulfídrico é o principal responsável pelos maus odores. O procedimento para monitoramento de maus odores é através do acompanhamento das condições atmosféricas, pela manhã e à tarde. Os parâmetros verificados são: temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, direção do vento, leitura de H<sub>2</sub>S e análise dos sulfetos. Para amenizar o mau odor devem ser adotados as seguintes ações que constam no documento da SANEPAR- Procedimento operacional padrão para o controle de maus odores que visam a eliminação de cascadeamento, aplicação de gás cloro, aplicação de cal virgem, implantação de cortina verde e queima de biogás (SANEPAR, [s.d.]a)

## **3.2 QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ETES TIPO UASB**

A expressão geral que determina a produção teórica de metano por grama de DQO removida do despejo é dada pela equação abaixo, (CHERNICHARO, 1997):

$$V_{CH_4} = DQO_{CH_4} / k(T) \quad (9)$$

Onde:

$V_{CH_4}$  = volume do metano produzido em litros;

$DQO_{CH_4}$  = carga de DQO removida no reator e convertida em metano, g (gDQO);

$K(T)$  = fator de correção para a temperatura operacional do reator, em gDQO/l.

O fator de correção  $K(T)$  é dado pela equação (10): (CHERNICHARO,1997).

$$K(T) = P \times COD / [R \times (273 + T)] \quad (10)$$

Onde:

$P$  = pressão atmosférica (1 atm)

$COD$  = carbono orgânico dissolvido por mol de metano = 64 gDQO/mol;

$R$  = constante dos gases (0,08206 atm.l/mol.K)

$T$  = temperatura operacional do reator (°C).

### 3.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS REAIS DA GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ETES TIPO UASB

O insumo mais importante no sistema de secagem térmica é o gás combustível. A viabilidade do projeto da ETE foi realizada pela avaliação da quantidade e da composição do biogás desprendido na linha dois dos reatores 5, 6, 7 e 8 (Figura 6).

Os dados experimentais dos últimos seis meses, no período de agosto de 2011 a fevereiro de 2012, foram monitorados. A medição de vazão, o teor de metano, a temperatura e a pressão manométrica do biogás oriundo de reatores anaeróbios de lodo fluidizado (RALFs) foram realizadas em tempo real.

Havia um conjunto de tubos coletores e condutores de biogás montados em cada uma das linhas, os quais conduzem o biogás para um queimador. As medições da vazão do biogás foram realizadas no trecho final dos tubos condutores de biogás da linha dois, de forma a medir o biogás disponibilizado nos quatro reatores.

O queimador da linha dois foi removido e uma estrutura de ferro fundido dúctil contendo três reduções com diferentes diâmetros foi adaptado ao tubo (Figura 6). Essa adaptação foi utilizada para adequar as velocidades do biogás no interior do

tubo à resolução do transmissor de vazão. A linha dois foi escolhida pela facilidade de interligação à linha três em caso de problemas e ou manutenção.

A Figura 6 apresenta uma imagem das instalações da ETE Atuba Sul e indica o local onde estão sendo feitas as medições.

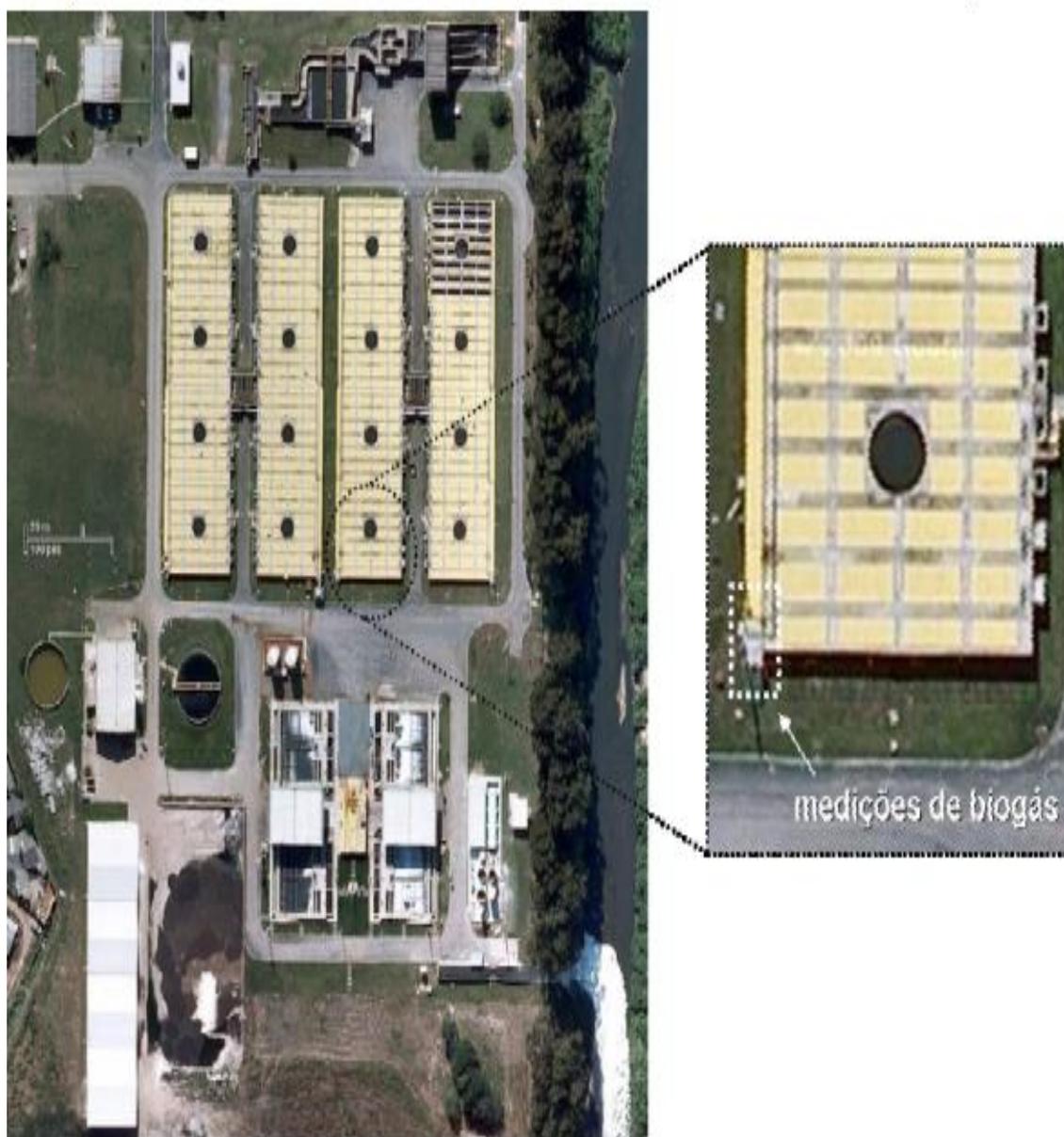


FIGURA 6 - IMAGEM DAS INSTALAÇÕES DA ETE ATUBA SUL E O LOCAL ONDE ESTÃO SENDO REALIZADAS AS MEDIÇÕES DE BIOGÁS  
FONTE: SANEPAR (2011)

A temperatura e a vazão do biogás foram medidas com dois transmissores por dispersão térmica Thermathel (Magnetrol, TA2, USA). Essas medições foram executadas em tubos com diâmetros internos de 200 e 62 mm.

O teor de metano presente no biogás foi determinado com um transmissor óptico seletivo operado na faixa infravermelho (Guardian Plus, Edinburgh Sensors, Escócia). Adicionalmente, um transdutor de pressão capacitivo (LD 301, Smar, Brasil) foi utilizado para medir a pressão manométrica do biogás.

Esses equipamentos foram alimentados eletricamente, sendo acoplados a um quadro de comando dedicado. Eles foram configurados para fornecer sinais analógicos padrão 4-20 mA, os quais foram monitorados em intervalos de 30 segundos e armazenados em um sistema de aquisição de dados (A202, Comtemp, Brasil) instalado em um Notebook Dell (Latitude, Brasil). A fixação dos transmissores e a inserção das sondas nos tubos condutores de biogás foram executadas de acordo com as diretrizes reportadas em seus manuais.

A Figura 7 apresenta uma foto do arranjo experimental utilizada para avaliar o biogás em tempo real.



FIGURA 7 - FOTO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA MEDIR EM TEMPO REAL OS SEGUINTE PARÂMETROS INERENTES AO BIOGÁS: (a) VAZÃO, (b) TEOR DE METANO, c) TEMPERATURA, (d) PRESSÃO MANOMÉTRICA  
FONTE: SANEPAR (2011)

### 3.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE SECADOR TÉRMICO DA EMPRESA ALBRECHT

O secador térmico da Empresa Albrecht (modelo Bruthus Móvel, BRASIL) foi instalado dentro do galpão do desaguamento do lodo da ETE Atuba Sul, sendo o biogás gerado nos reatores usado como fonte de energia térmica. O experimento ocorreu entre os dias 13/04 à 06/07/10, sendo tratado o lodo oriundo da prensa desaguadora.

Para encaminhamento do biogás gerado na ETE, foi instalado um registro na linha três dos RALFs para direcionamento do biogás para o secador (Figura 4). A tubulação utilizada foi de PEAD 63 mm e acoplada ao registro. O biogás foi coletado das linhas dos RALFs 1 e 2.

Dois compressores radiais, com paletas em alumínio, de motor trifásico em série foram instalados para sucção do biogás até o secador térmico de lodos sanitários. Então, o biogás era enviado diretamente ao sistema de queima do secador, sendo que o biogás utilizado era armazenado no interior do próprio reator.

Medições de percentual de sólidos do lodo na entrada e saída foram feitas para verificar o rendimento do equipamento em termos de secagem. Visando simplificar o trabalho foi considerada somente a redução de massa, sendo desprezado o volume. A metodologia utilizada na análise de Sólidos Totais foi pelo Método de Gravimetria APHA (2005). Estas medições foram realizadas em uma balança medidora de precisão de umidade da marca Gehaka (IV 3000, Brasil).

Os gases, após passarem pelo multi-ciclone o podem perder cerca de 99% do material sólido, são conduzidos através de dutos metálicos para a atmosfera.

Todo o sistema de operação e controle é montado em um único painel compacto, vedado contra pó, com um Controlador Lógico Programável (CLP), que através de sensores de temperatura, pressão, vazão e carga gerencia a rotina de secagem, permitindo a operação manual ou automática deste sistema.

A operação do equipamento de secagem ficou com a responsabilidade da SANEPAR, que diariamente tinha o compromisso de ligar o disjuntor na casa de máquinas. Na sequência, o operador abria o registro do gás e ligava o secador, sendo o primeiro equipamento o exaustor, seguida pela válvula rotativa, a alimentação e por fim o queimador.

O secador entrava em funcionamento quando atingisse *setpoint* da temperatura de saída, sendo que para desligar o equipamento, o operador devia seguir a sequencia inversa.

Quando atingisse a temperatura de saída, poderia iniciar a alimentação com o lodo em torno de 2 kg/min.

Os parâmetros de operação que o técnico deveria observar foram: temperatura de saída *setpoint* igual a 130° C; temperatura de entrada, próxima de 280°C, atender as velocidades do exaustor igual a 60% Hz, tambor na frequência de 30% Hz e a alimentação de 40% Hz.

Para encerrar a operação, o operador deveria observar duas situações: primeiro parar a alimentação e deixar o tambor funcionado por 30 minutos com a rotação de 80% Hz até desligar, podendo ser observado na válvula rotativa. Segundo, desligar o queimador e fechar o gás, deixando o tambor e exaustor ligados até a temperatura de saída baixar de 80 °C.

Após o lodo ser processado, foi possível avaliar a eficiência quanto à eliminação de patógenos presente no lodo. Os parâmetros foram analisados conforme Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), sendo analisados os parâmetros de amostras de lodo coletados antes e depois do processamento com o secador.

A análise dos indicadores biológicos foi realizada para ovos viáveis de helminto. A metodologia utilizada foi o método Yanko para Sanidade (ovos viáveis de helmintos) modificado por TOMAZ-SOCO1 e foi realizado pelo laboratório do SENAI-CIC.

As análises foram feitas para a destinação do lodo na agricultura conforme Resolução N° 375, de 29 de agosto de 2006, onde se define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

Para evitar novos custos, admitiu-se que não seriam necessárias novas análises de lodo secos dos parâmetros de metais pesados (cádmio, cobre, cromo, chumbo, mercúrio, níquel e zinco), de valor agrônômico (nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio, carbono, relação carbono e nitrogênio, cinzas, potencial de hidrogênio), e de coliformes fecais, salmonela, vírus e contaminantes orgânicos.

As análises foram realizadas com lodo caleado coletados no período de 30/07 a 02/08/10 dos lotes A29, A30, A31 e A32.

O Quadro 5 apresenta o método para avaliação dos parâmetros do lodo:

Norma ou Método	Sigla	Parâmetro
APHA et al., 2005	DQO, mg/l	Demanda química de oxigênio
	DBO5, mg/l	Demanda bioquímica de oxigênio
	A, mg/l	Alcalinidade
	PH	Potencial hidrogeniônico
	Q l/s	Vazão de efluente
	Q Nm3/h	Vazão de biogás
	T °C P mmca CH4 Mi % Frm	Temperatura do biogás Pressão do Reator UASB Teor de metano Massa de entrada no secador Fator de redução de massa
US EPA/625/R-92/013/2003 Appendix	VMP ovo/g ST	Viabilidade de ovos de helmintos (As.)
	ST	Sólidos totais
	SV	Sólidos voláteis
	Umidade	
	CH4	Guardian

QUADRO 5 – MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LODO  
Fonte: O autor (2012)

### 3.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DA ETE ATUBA SUL

A análise econômica do empreendimento se fundamenta no cálculo do Valor Presente Líquido – VPL, do fluxo de caixa, custo x receita, descontado de uma taxa de atratividade, no período definido de operação do projeto. Este VPL deve ser maior ou igual a zero para identificar o retorno do investimento, ainda dentro deste período de operação analisado.

São considerados custos, os investimentos necessários à implantação do empreendimento, neste caso, no sistema de secagem térmica, bem como as despesas decorrentes da operação e manutenção do mesmo no período de operação considerado, acrescidas dos custos de depreciação do patrimônio implantado. Para o investimento, já incluído o valor de 5% referente aos custos de projetos, definindo-se o agente financeiro, determina-se o valor anual que deve ser pago ao mesmo, baseado nas condições financeiras do empréstimo, como taxa de juros, contrapartida, carência e prazo de amortização. No cálculo da depreciação foram excluídos do valor dos investimentos os custos de projetos, *start up* e geração assistida.

Na consideração das receitas, como o sistema de secagem térmica não terá receitas diretas na sua operação, considera-se a receita auferida, ou seja, os custos de investimento e de operação e manutenção, acrescidos de depreciação, que deverão ser poupados quando se compara tal sistema com o sistema atual de calagem. Os investimentos e depreciação são calculados com os mesmos critérios explicitados no parágrafo anterior. Esse tipo de análise de viabilidade econômica é denominado de Análise Incremental de Viabilidade Econômica, que é aplicada na análise de alternativas de investimento mutuamente exclusivas.

Sendo assim, o VPL do fluxo de caixa de cada alternativa, foi calculado utilizando-se como ferramenta o software Excel do MS Office 2012, descontado o fluxo, em uma taxa de atratividade de 12% ao ano, para um período de operação do empreendimento de 20 anos, verificando-se o retorno dos investimentos ainda dentro deste período para os casos do VPL, apresentar valor igual ou maior que zero no ano 20.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO ATUBA SUL

#### 4.1.1 Descrição Geral da ETE Atuba Sul

Esta ETE iniciou sua operação em 1998 e atende 171.909 economias totais. Destas, 160.255 são residenciais e as demais industriais e comerciais. Ela opera ininterruptamente (SANEPAR, 2012b). É uma unidade de tratamento baseada em 16 reatores anaeróbios tipo RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado), também denominado tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Cada reator apresenta um volume de 2.000 m<sup>3</sup> (FIGURA 2). O projeto inicial previa a operação de um sistema aeróbio consecutiva, mas que se encontra fora de operação no momento.

A ETE foi dimensionada para uma vazão de 1.120 l/s. A vazão variou entre 755 l/s e 1.181 l/s no período de janeiro de 2010 a maio de 2012 (FIGURA 8) e apresentou um valor médio de 949 l/s. A média de 2010 (889 l/s) foi menor que a de 2011 (995 l/s), sendo esta similar a 2012 até o mês de abril (991 l/s). Em julho de 2011, um pico de volume de esgoto pode ser observado. Este valor foi superior ao valor nominal da ETE, o que pode ser justificado a infiltração ou, eventualmente, outra inconformidade (SANEPAR, 2012b).

#### 4.1.2 Parâmetros Operacionais da ETE Atuba Sul

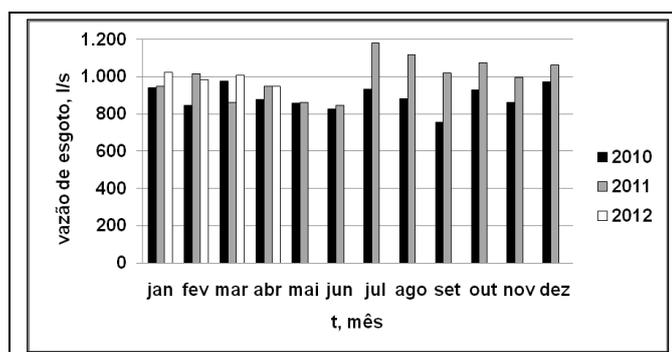


FIGURA 8 - VOLUME DE ESGOTO TRATADO ENTRE JANEIRO DE 2010 E ABRIL DE 2012  
 FONTE: O autor (2012)

A variação da vazão depende da hora, do dia e do mês decorrente da sazonalidade de uso. A vazão também depende da precipitação pluviométrica. Esta última é uma consequência de valores muito superiores das vazões de infiltração teórica. A NBR 9649 (1986), estabelece as taxas de infiltração para as redes coletoras, sendo admissível de 0,05 a 1,0 l/s por km) (COMPARINI; SOBRINHO,1992). A rede coletora que alimenta esta ETE apresenta uma extensão em junho/12 de 2.252.508 metros (SANEPAR,2012c). Logo, se a infiltração atual for estimada utilizando essa Norma, ela estaria entre 112,62 l/s à 2.252,51 l/s. Assim, a vazão apresentaria uma variação muito alta. Por outro lado, a SANEPAR adota índices de 0,0001 l/s.m para a junta elástica e 0,0005 l/s.m para a junta de argamassa. Com isto, as vazões de infiltração totalizam 499,30 l/s, que somados a vazão sanitária perfaz uma vazão de 1.251,11 l/s; o que é compatível com os valores observados.

Esta vazão reflete a atual situação da Estação de Tratamento de Esgoto. Entretanto, a vazão atinge níveis bem superiores em dias de grandes precipitações pluviométricas. Para evitar o transbordamento e o carreamento da manta de lodo, um *by-pass* é realizado no PV (poço de visita) antes da ETE; lançando o efluente diluído diretamente no corpo receptor do rio Iguaçu.

Os fatores para o aumento da infiltração são atribuídos a: falta de educação ambiental dos usuários que interligam o sistema de água de chuva indevidamente ao sistema de esgotamento sanitário; falta de um projeto de engenharia compatível com a baixa qualidade de mão de obra dos prestadores de serviços quando da execução das obras; materiais hidráulicos com especificação inadequada quanto a esforços mecânicos e interferências decorrente de ação de má-operação de outras empresa e de usuários que não obedecem as normas previstas da NBR 7362 para tubo de PVC rígido com junta elástica.

É importante também salientar que o índice de cobertura de esgoto na Bacia do Atuba atinge a 84,28% (SANEPAR, 2012c), com isto para se atingir o índice de 100%, inclusive com a saturação da bacia e a possível mudança de zoneamento, está previsto uma ampliação de 50% na capacidade volumétrica dos reatores. Esta abordagem revela a importância de transformar o lodo a ser gerado em uma forma mais conveniente de ser transportada e disposta. O valor médio de efluente

observado (976 l/s) será considerado para estimar a quantidade de matéria com potencial de bio-transformação em biogás.

#### 4.1.3 Aspectos legais referentes aos parâmetros operacionais da ETE Atuba Sul.

A operação na ETE deve respeitar o limite máximo aceitável de diversos parâmetros:  $DBO_5 = 90$  mg/l;  $DQO = 225$  mg/l; sólidos sedimentáveis = 1,0 mg/l; pH entre 5,0 e 9,0 e temperatura  $< 40$  °C (SEMA, 2009). A Licença de Operação atual (nº 11.121, com validade até 05/06/2015) foi emitida pelo IAP e tem o protocolo nº 98.673.911. O instrumento usado para operação é renovado periodicamente.

No entanto, para lançamento do efluente tratado no corpo receptor o Instituto das Águas do Paraná estabelece as concentrações máximas dos parâmetros para lançamento do efluente tratado no corpo receptor mais restritivas. A  $DBO$  máxima para lançamento é de 50 mg/l;  $DQO = 125$  mg/l e sólidos suspensos de 50 mg/l. A frequência de avaliação é semanal, e obedece a Portaria nº 732/2010. A dificuldade de cumprir os padrões de lançamento no corpo receptor fez com que a SANEPAR e o órgão ambiental estabelecesse metas progressivas para se atingir essa exigência.

A redução da  $DQO$  na operação da ETE Atuba Sul tem sido cumprida de acordo com o Instituto Ambiental do Paraná. Quanto ao lançamento do efluente tratado no Rio Atuba, a SANEPAR não atende a Resolução de Outorga do Instituto das Águas do Paraná. A  $DQO$  de entrada atinge valores médios de 400 mg/l (FIGURA 12). Por exemplo, a remoção média de  $DQO$  no período de janeiro 2010 a maio de 2012 atingiu uma eficiência de 62,61%, o que equivale à remoção de 244,73 mg/l, sendo 390,83 mg/l para a afluente e 146,10 mg/l para a efluente.

Assim, pode ser observado que o valor da  $DQO$  de entrada está bem abaixo do valor descrito na literatura de 600 mg/l (PROSAB, 2009). A informação é essencial para o dimensionamento teórico de produção de biogás no projeto de implantação do sistema de secagem térmico com uso de biogás produzido nos reatores UASB.

O percentual desejado de remoção de  $DQO$ , ou seja, em torno de 70% nos reatores e 90% com o pós-tratamento, não estão sendo atingidos. Isto, mesmo com

a entrada em operação do pós-tratamento da ETE Atuba Sul em 2009. Os problemas foram identificados desde a pré-operação e não solucionados até o momento.

## 4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO NA ETE ATUBA SUL

### 4.2.1 Produção teórica de metano – Dados iniciais

O valor teórico de produção de metano foi calculado com uso das equações descritas na (seção 3.2) e com os dados de vazão e de análises laboratoriais de DQO da ETE Atuba Sul (dados médios de janeiro de 2010 a maio de 2012) (SANEPAR, 2012b):

$$DQO_{\text{entrada}} = 0,391 \text{ g/l} \quad (11)$$

$$DQO_{\text{saída}} = 0,146 \text{ g/l} \quad (12)$$

$$Q = 976 \text{ l/s} \quad (13)$$

Onde:

$$\text{Remoção de DQO (entrada – saída)} = DQO_{\text{CH}_4} = 0,245 \text{ g/l (62,7\%)}$$

$$\text{Vazão do efluente} = Q = 976 \text{ l/s} \times 3.600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h} = 84.326.400 \text{ l/dia.}$$

#### 4.2.1.1 Produção teórica de metano – CNTP

Nas condições normais de temperatura e pressão, CNTP, o fator de temperatura e a vazão são dados pelas expressões abaixo:

$$K(0^\circ\text{C}) = 1 \text{ atm} \cdot 64 \text{ gDQO} \cdot \text{mol}^{-1} / [0,08206 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} \cdot \text{K} \cdot (273 + 0) \text{K}] = 2,86 \text{ g/l} \quad (14)$$

$$Q_{\text{CH}_4} = DQO_{\text{CH}_4} \times Q / k(0^\circ\text{C}) \quad (15)$$

$$Q_{\text{CH}_4} = (0,391 - 0,146) \text{ g/l} \times 84.326.400 \text{ l/dia} = 2,86 \text{ g/l} \quad (16)$$

O que corresponderá a uma produção de metano de  $7.223,76 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  para  $0^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.1.2 Produção teórica de metano – Condições ETE Atuba Sul

Nas condições médias de operação da ETE Atuba Sul, ou seja a temperatura ambiente média é de  $20^\circ\text{C}$ , os valores de  $K(T)$  e  $Q(\text{CH}_4)$  ficam:

$$K(20^\circ\text{C}) = 1 \text{ atm} \cdot 64 \text{ gDQO}.\text{mol}^{-1} / [0,08206 \text{ atm}.\text{l}/\text{mol}.\text{K} \cdot (273 + 20) \text{ K}] = 2,66 \text{ g/l} \quad (17)$$

$$Q_{\text{CH}_4} = \text{DQO}_{\text{CH}_4} \times Q / k(0^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 0,245 \text{ g/l} \times 84.326.400 \text{ l/dia} / 2,66 \text{ g/l} \quad (18)$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 7.766,90 \text{ m}^3(\text{CH}_4)/\text{dia}. \text{ (Vazão média de } 976 \text{ l/s)}$$

Se adotarmos a vazão para final de plano, ou seja  $1.680 \text{ l/s}$  ( $145.152.000 \text{ l/dia}$ ) teremos um volume de metano de  $13.369,26 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Pois:

$$Q_{\text{CH}_4} = 0,245 \text{ g/l} \times 145.152.400 \text{ l/dia} / 2,66 \text{ g/l} = 13.369,26 \text{ m}^3/\text{dia} \quad (19)$$

Estes valores de produção de metano se baseiam na produção teórica de  $350 \text{ ml/g(DQO)}$  (CHERNICHARO, 1997).

Sprenger (2009) calculou em seu experimento, utilizando as mesmas equações de Chernicharo, resultando em uma vazão de  $22.092 \text{ m}^3/\text{dia}$  de metano. O fator principal da diferença do valor é o percentual de remoção de DQOr, sendo utilizado o valor teórico da DQO do afluente de  $600 \text{ mg/l}$  e a eficiência do tratamento dos reatores em  $70\%$ .

Utilizando as equações de Mendonça e Campos (2007), se obtêm a vazão de  $9.945 \text{ m}^3/\text{dia}$  de biogás

### 4.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS REAIS DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

#### 4.3.1 Parâmetros físico-químicos do esgoto

Os parâmetros mostrados são importantes para revelar a quantidade de matéria orgânica e suas propriedades relevantes para que se transforme em biogás, bem como se é perene ao longo da operação da estação de tratamento de esgoto.

As características físico-químicas do esgoto sanitário que entra nos RALFs da ETE Atuba Sul variam de acordo com o horário do dia. A vazão (Q), o potencial de hidrogeniônico (pH), a alcalinidade (A), e a demanda química de oxigênio (DQO) são acompanhadas continuamente. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO5) foi acompanhada neste estudo em menor espaço de tempo devido a dificuldade inerente da análise laboratorial, mais complexa e lenta, embora potencialmente revele com melhor qualidade o potencial de produção de biogás. O valor dos parâmetros citados acima foi determinado em três dias de estagem para ilustrar as características típicas para a ETE Atuba Sul, com início as 8h00 do dia 29/01/2012 e término as 8h00 do dia 01/02/2012.

Os parâmetros físico-químicos do esgoto sanitário avaliados, apresentaram um comportamento cíclico (FIGURA 9). Logo, é de se esperar que a produção e o desprendimento do biogás também sejam (FIGURA 18).

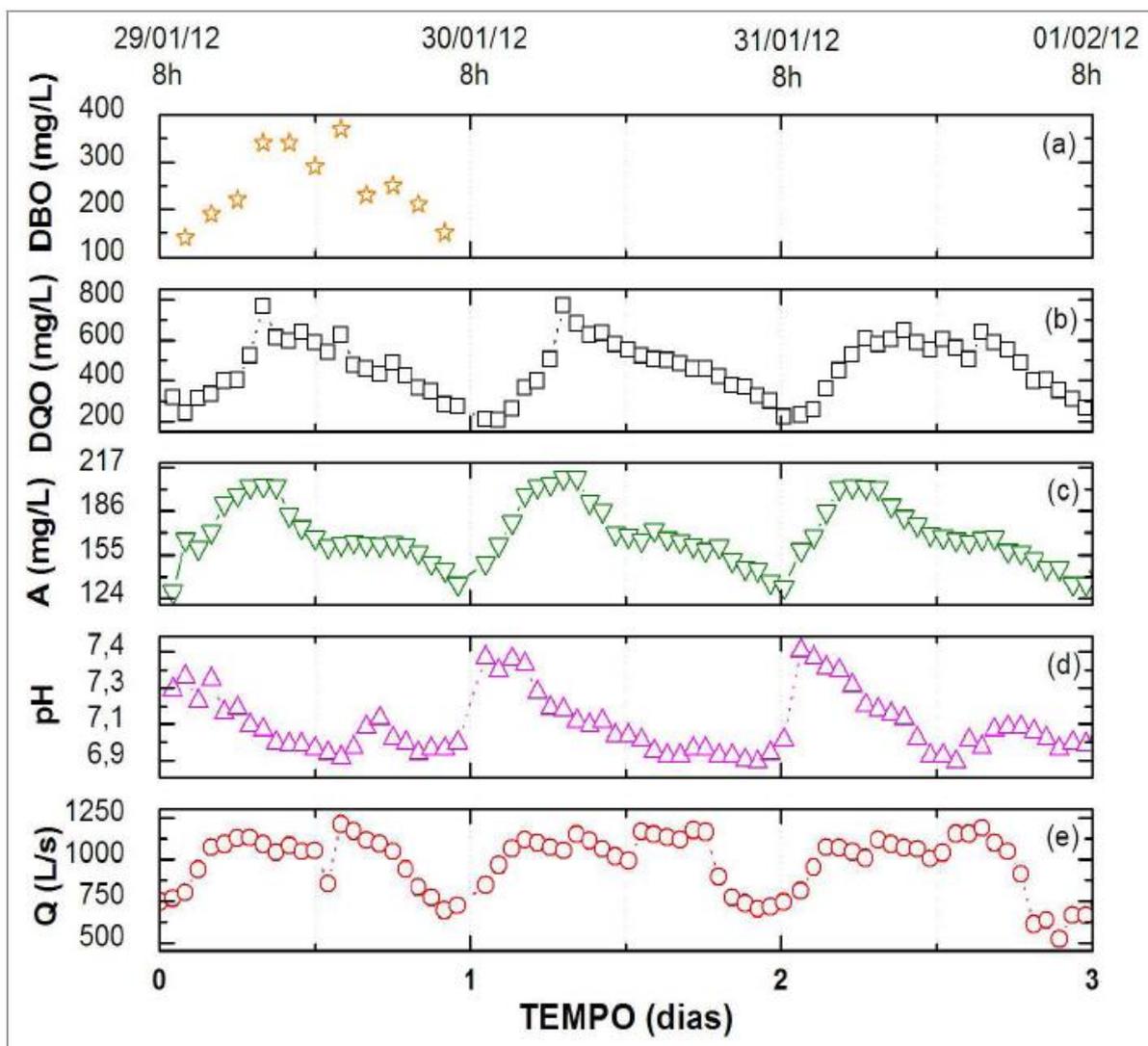


FIGURA 9 - PERFIL DE DBO (A), DQO (B), ALCALINIDADE (C), PH (D) E VAZÃO (E) DO ESGOTO SANITÁRIO QUE ENTRA NOS RALFS PARA UM INTERVALO DE 3 DIAS SEM CHUVAS  
 FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.3.1.1 Comportamento diário da vazão

A vazão revela um aumento e se estabiliza a partir da quarta hora do estudo (cerca de 10 horas da manhã) e permanece assim até a 17-18ª hora de estudo (cerca de 1 hora da manhã; o que pode ser atribuído a sazonalidade típica das atividades humanas. Assim, o valor médio foi similar para os três dias: 976 l/s (dp =160 l/s), 1.000 l/s (dp = 162 l/s) e 946 l/s (dp = 200 l/s), mas revelou uma diferença importante entre o valor mínimo e máximo: 694 e 1.210, 703 e 1.172, e 521 e 1.186. Isto revela uma amplitude entre 469 a 665; o que deve ser considerada para

operação da planta. Principalmente, para captação de gases de exaustão decorrente de bio-processos que estão em desenvolvimento.

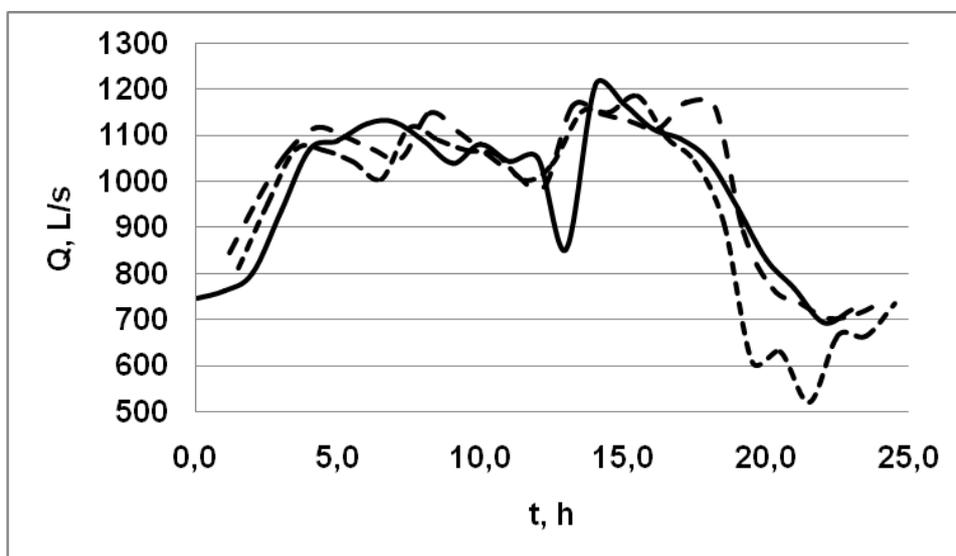


FIGURA 10 - PERFIL DA VAZÃO AO LONGO DE 24HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL, SENDO O INÍCIO AS 8:00h, PARA TRÊS DIAS COM ESTIAGEM  
 FONTE: O autor (2012)

#### 4.3.1.2 Comportamento diário do pH

O pH nos três dias avaliados mostra também comportamento cíclico (Figura 10).

As 08:00 da manhã apresenta o maior valor em torno de 7,3, caindo até as 22:00 horas para 6,9, sendo que no dia seguinte apresenta o mesmo ciclo. O valor médio do pH variou entre 7,14; 7,23 e 7,22 entre janeiro de 2010 e maio de 2012, valores aceitáveis conforme preconiza a resolução SEMA 21/2009, na faixa entre 5,0 e 9,0.

Esses resultados foram compatíveis com os valores frequentemente observados pela SANEPAR. Ao analisarmos os dados da ETE Belém encontramos um pH médio de 7,15.

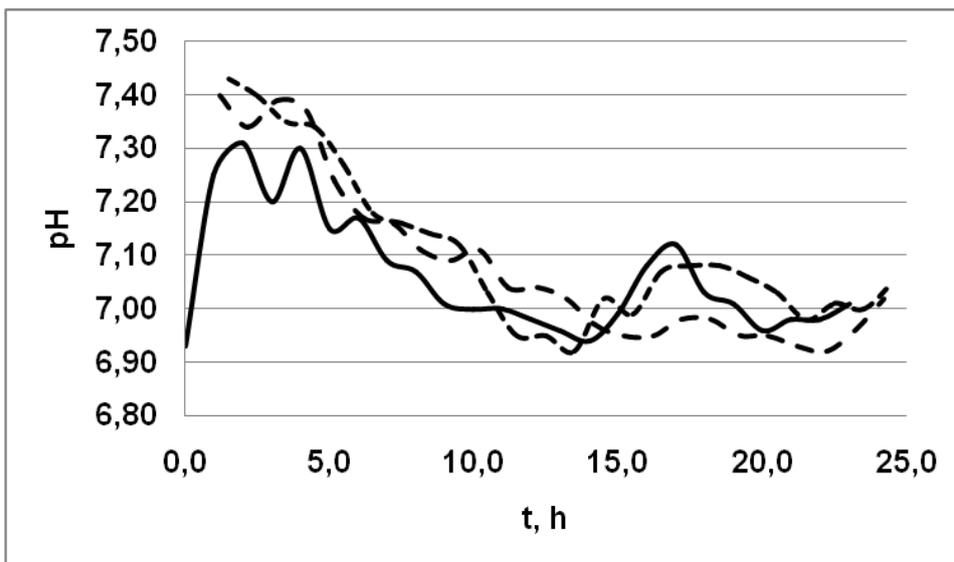


FIGURA 11 - PERFIL DO pH AO LONGO DE 24 HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL, SENDO O INÍCIO AS 8:00h, PARA TRÊS DIAS COM ESTIAGEM  
 FONTE: O autor (2012)

#### 4.3.1.3 Comportamento diário da alcalinidade

A alcalinidade representa a capacidade que um sistema aquoso tem para neutralizar ácidos sem perturbar de forma extrema as atividades biológicas que nele decorrem. A Resolução SEMA nº 21 não define este parâmetro (SEMA, 2009).

Ao analisarmos o gráfico observamos que as 08:00 apresenta o menor valor, 124 mg/l e entre as 14:00 e 17:00 o maior valor 196 mg/l. Sendo que nos 03 dias consecutivos apresentava a mesma tendência. A manutenção de alcalinidade ideal deve estar entre 2.000 e 4.000 mg  $\text{HCO}_3^-$  /l para manter o pH neutro ou perto disso durante a fase acetogênica (METCALF; EDDY, 2003). Logo, esse parâmetro pode ser crítico para um rendimento máximo de metano.

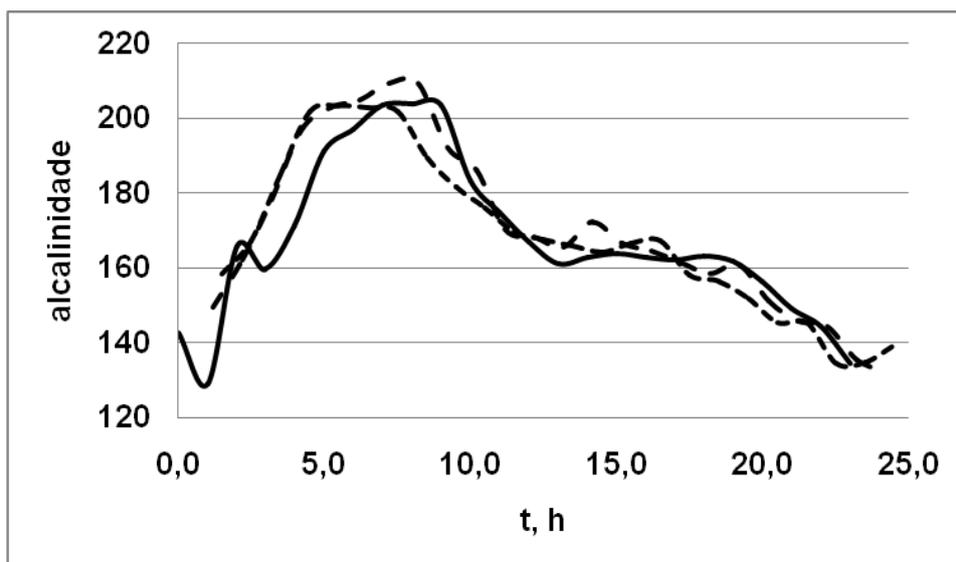


FIGURA 12 - PERFIL DA ALCALINIDADE AO LONGO DE 24HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL, SENDO O INÍCIO AS 8:00h, PARA TRÊS DIAS COM ESTIAGEM  
 FONTE: O autor (2012)

#### 4.3.1.4 Comportamento diário da DQO

O valor da DQO revela o potencial de produção de biogás. Pode ser observado que a produção máxima ocorre entre as 09:00 as 15:00 horas. A partir das 15:00 horas a DQO baixa até as 24:00 horas. Podemos concluir que a DQO média esta em torno de 400 mg/l, valor bem abaixo do valor encontrado na literatura de 600 mg/l. A este fato pode ser atribuído a grande infiltração nas redes coletoras de esgoto e principalmente nos poços de visita em concreto, ocasionadas principalmente pela condição do lençol freático.

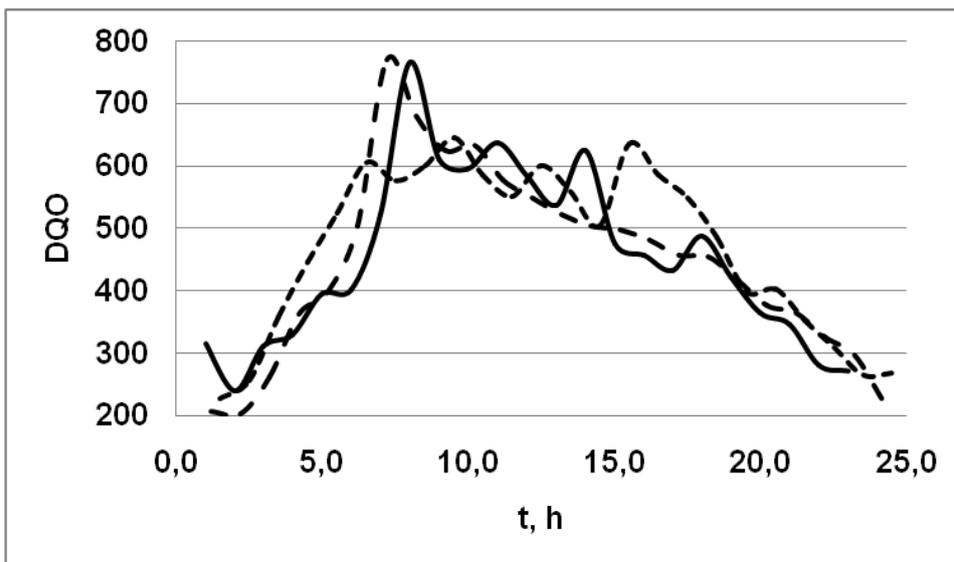


FIGURA 13 - PERFIL DA DQO AO LONGO DE 24 HORAS DE OPERAÇÃO DA ETE ATUBA SUL  
 FONTE: O autor (2012)

#### 4.3.1.5 Relação entre a DQO e a DBO

Os parâmetros físico-químicos do esgoto sanitário apresentam um comportamento temporal variável, periódico e não estacionário (FIGURAS 9,10,11,12, 13 e 17), assim como aquele inerente à produção e ao desprendimento do biogás (FIGURAS 18 e 19). Por outro lado, a correlação entre esses parâmetros e o nível de significância não são conhecidos. O que se pode afirmar, em um primeiro momento, é que os parâmetros do meio líquido e a curva de produção de biogás possuem componentes temporais semelhantes, o que, descontado o tempo de retenção hidráulico, podem ser utilizados para prever a produção de biogás.

Von Sperling (2005) afirma que se a relação DQO/DBO for inferior a 2,5, há uma fração biodegradável elevada, com indicação para tratamento biológico. A relação da DQO/DBO apresentada na Figura 14 está na ordem de 2,0, valor esperado para esgoto doméstico. Logo, existe um bom potencial para biodegradação e, conseqüentemente, produção de biogás.

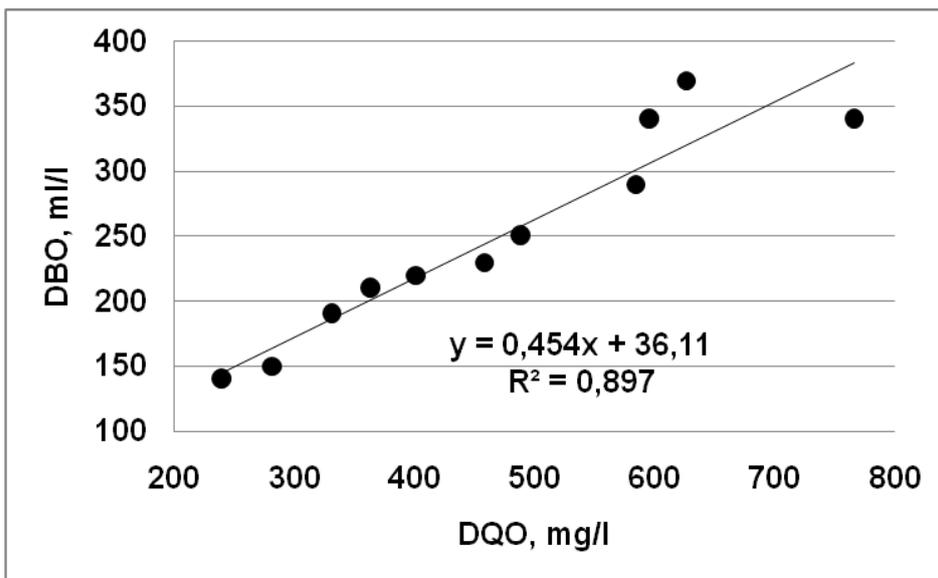


FIGURA 14 - RELAÇÃO ENTRE DBO E DQO  
 FONTE: O autor (2012)

#### 4.3.1.6 Relação entre o pH e a alcalinidade

O pH revela a concentração hidrogeniônica, enquanto que a alcalinidade traduz a estabilidade de alteração do pH, ou seja, o tamponamento produzido pelos íons da solução (CHERNICHARO, 2008). A relação entre o pH e a alcalinidade foi avaliada. Não foi observada uma relação entre esses dois parâmetros (FIGURA 10), sendo que o valor de  $R^2$  próximo, descreve esse fato.

O parâmetro fundamental no processo anaeróbio é a acidez volátil. Quanto maior o seu valor, maior a produção de ácidos orgânicos (ácido acético e propiônico) gerados pelas bactérias acidogênicas. Um valor muito elevado significa desequilíbrio entre as bactérias geradoras de ácidos orgânicos e as transformadoras destes ácidos em gás metano, as bactérias metanogênicas. Este desequilíbrio pode ocorrer em função de diversos fatores, tais como o tipo de cargas tóxicas que inibem o crescimento das bactérias metanogênicas, ou a baixa temperatura. O aumento de ácido no sistema também provoca o consumo da alcalinidade e por consequência a diminuição do pH. O valor ideal para formar metano é próximo ao neutro, ou seja, pH igual a 7. O aumento excessivo de alcalinidade pela adição de cal também é prejudicial, provocando a inibição do processo (SANEPAR, 2012d).

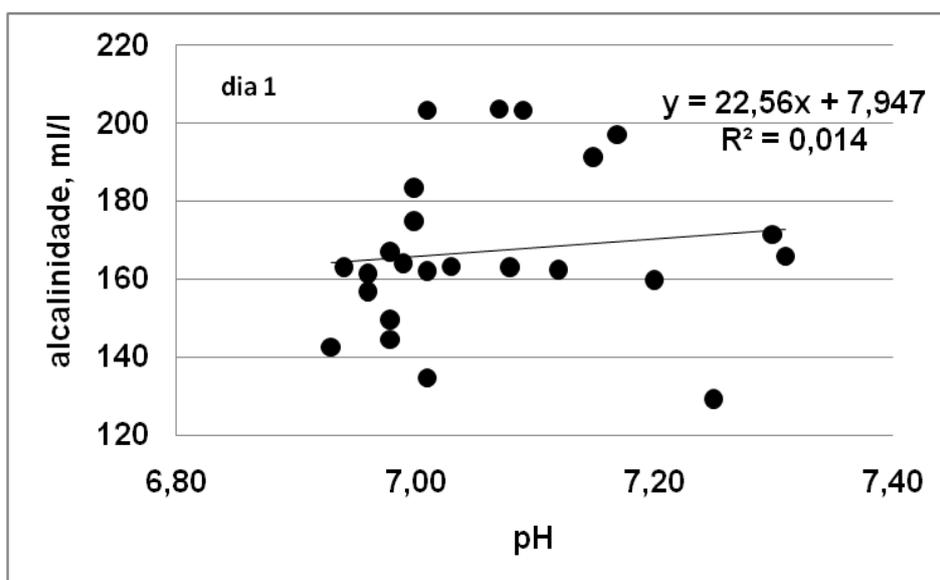


FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE PH E ALCALINIDADE DO DIA 1.  
 FONTE: O autor (2012)

Na Figura 16 foi analisado o comportamento do segundo dia. Também não foi observada uma correlação entre o pH e a alcalinidade.

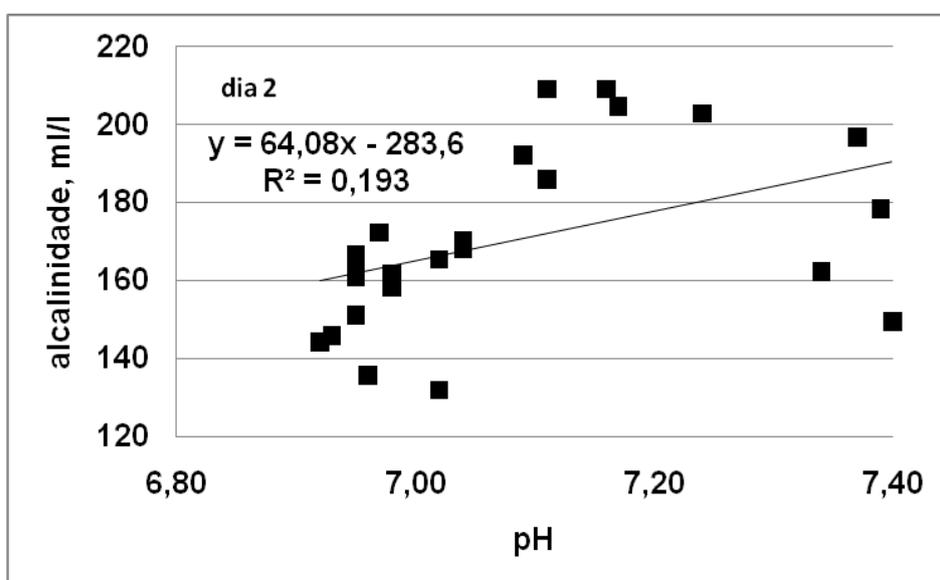


FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE pH e ALCALINIDADE DIA 2.  
 FONTE: O autor (2012)

#### 4.3.1.7 Perfil da DBO ao longo de 24 horas de operação da ETE Atuba Sul

O valor da DBO revela o potencial de biodegradação da matéria orgânica presente no esgoto (METCALF; EDDY, 2003). O cálculo da DBO foi realizado somente num único dia pela dificuldade de análises, da necessidade de número de frascos e pelo tempo necessário para realizar os ensaios. Outro fator a se considerar é que a rapidez de realizar os ensaios de DQO, que representam a condição de operação dos reatores, também é o parâmetro escolhido para se estimar a produção de biogás (CHERNICHARO,1997).



FIGURA 17 - PERFIL DA DBO ENTRE 29/01/12 À 30/01/12  
 FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.3.1.8 Curva de vazão de biogás em função do tempo

A vazão de biogás também segue um comportamento temporal, variável, periódico e não estacionário (Figura 18 e 19). A produção diária correspondente ao despreendimento de biogás produz um padrão de comportamento com vazões máximas, que ocorrem tipicamente entre as 0 e 2 horas, e as vazões mínimas, entre 12 e 14 horas (ver ampliação da imagem mais condensada da Figura 19, do dia 8 ao 11).

Como mostra a Figura 18, a vazão típica de biogás em função do tempo entre os dias 9/11/2011 (15h41) e 02/12/2011 (14h38), quase um intervalo de 30

dias, é muito variável. Esse comportamento deve ser considerado no cálculo da estimativa de produção, bem como nas operações unitárias do processo. A vazão média observada foi de 19,38 Nm<sup>3</sup>/h, variando entre 5,62 e 34,38 Nm<sup>3</sup>/h, e desvio padrão de 5,48 Nm<sup>3</sup>/h durante essas 546 horas de operação.

Uma série de dados de vazão em um grande período, ao longo de seis meses, permite afirmar que a vazão do biogás disponibilizada pelo sistema de coleta dos quatro RALFs da linha 2 apresenta média de 21,56 Nm<sup>3</sup>/h e desvio padrão de 6,45 Nm<sup>3</sup>/h. Este valor é aproximadamente 54% menor do calculado com base nas propriedades físico-químicas do meio líquido, considerando a perda do biogás no efluente tratado e no meio ambiente. Utilizando esta vazão de 21,56 Nm<sup>3</sup>/h, e multiplicarmos pelas seis linhas e no período de 24 horas teremos uma produção diária estimada em 130 Nm<sup>3</sup>/h, ou 3.120 Nm<sup>3</sup>/dia.

Duas hipóteses podem ser propostas para explicar o baixo rendimento. Pode se concluir que boa parte do biogás produzido nos RALFs, provavelmente permanece dissolvida no meio líquido ou no lodo é perdida por meio de fissuras e pela superfície dos reatores, por falta de adequada vedação do sistema.

Sprenger (2009), realizou um experimento na ETE Atuba SUL através da medição em quatro linhas nos 16 reatores utilizando um anemômetro digital chegou a uma vazão de 2.800 Nm<sup>3</sup>/dia de biogás. Usando os dados dos ensaios de caracterização do biogás, em que o metano representa em média 60,6% em volume de biogás, resulta em 1.700 Nm<sup>3</sup>/dia de metano. Extrapolando para a ampliação dos oito novos reatores ter-se-á uma vazão de 2.550 Nm<sup>3</sup>/dia de metano, e de 4.200 Nm<sup>3</sup>/dia de biogás.

Segundo Sprenger (2009), os seguintes fatores podem ter levado a diferença entre o valor medido e o teórico: perdas de biogás na tubulação, perdas de biogás nos reatores, perda de parte de metano por estar solubilizado no efluente, bactérias acidogênicas e metanogênicas, e o equipamento de medição.

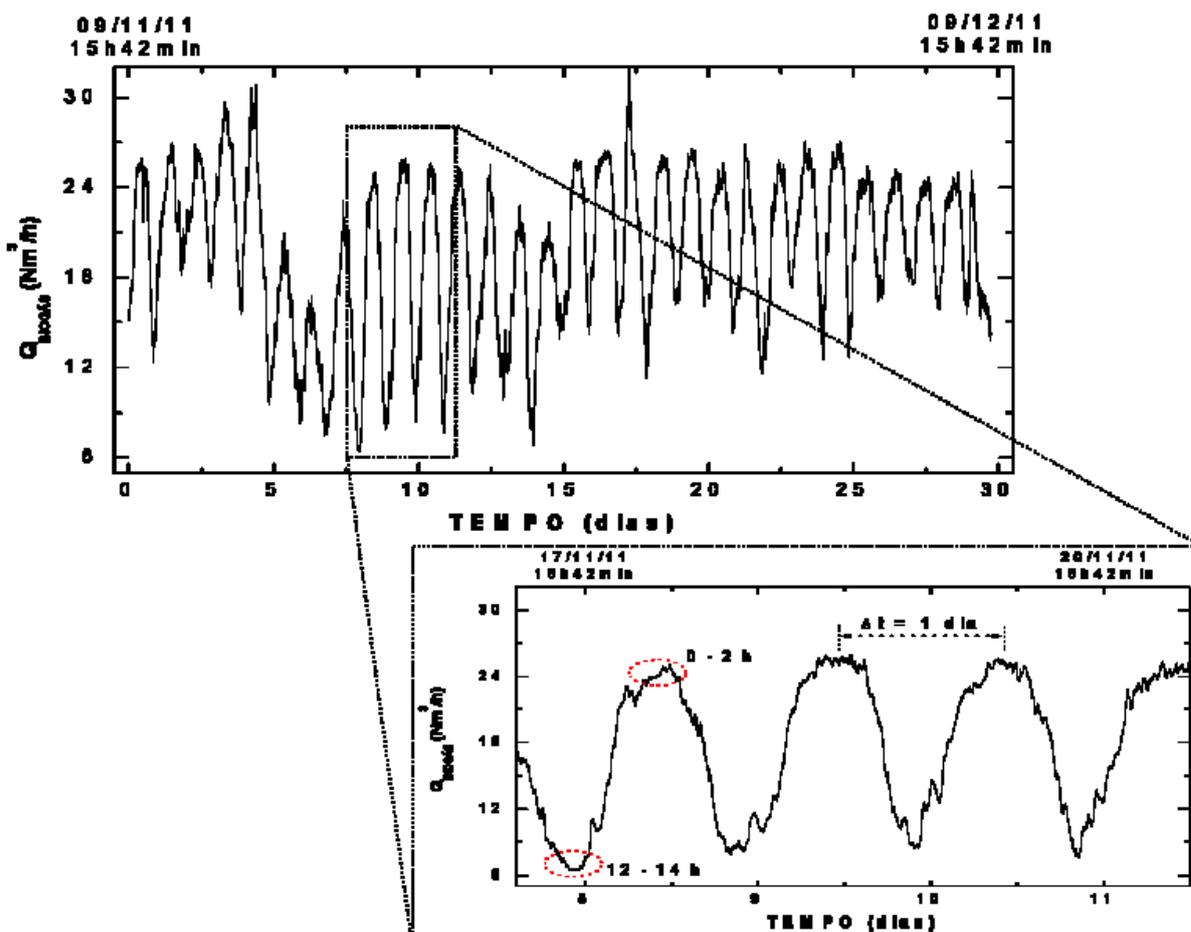


FIGURA 18 - VAZÃO DE BIOGÁS PRODUZIDA EM 30 DIAS COM DESTAQUE PARA UM INTERVALO DE 4 DIAS  
 FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.3.1.9 Curva de vazão em função do tempo com elevados índices de chuva

Eventos de chuva provocaram diminuição na produção de biogás, provavelmente por conta da diluição da matéria orgânica disponível para degradação. Ausência de biogás foi observada em semanas com elevados índices pluviométricos (Figura 19). Modificações na amplitude e no nível médio do padrão de vazão de biogás também podem ser destacados. A precipitação foi de aproximadamente 138 mm no intervalo entre os dias zero e dois de acordo com os dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Metrologia instalada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

Este tipo de fenômeno é de suma importância pelo risco de se ter um sistema de secagem inoperante, não dispondo do insumo de biogás em algumas

horas do dia para o sistema projetado. Assim, o projeto deverá prever a instalação de outra fonte de energia alternativa, além de prever no dimensionamento o gasômetro com maior capacidade de armazenamento.

Como resultado, nos dois dias que tiveram altos índices pluviométricos a vazão média ficou na faixa de 6,16 Nm<sup>3</sup>/h, projetando para a vazão final de plano teremos um volume de 3.552 Nm<sup>3</sup>/dia.

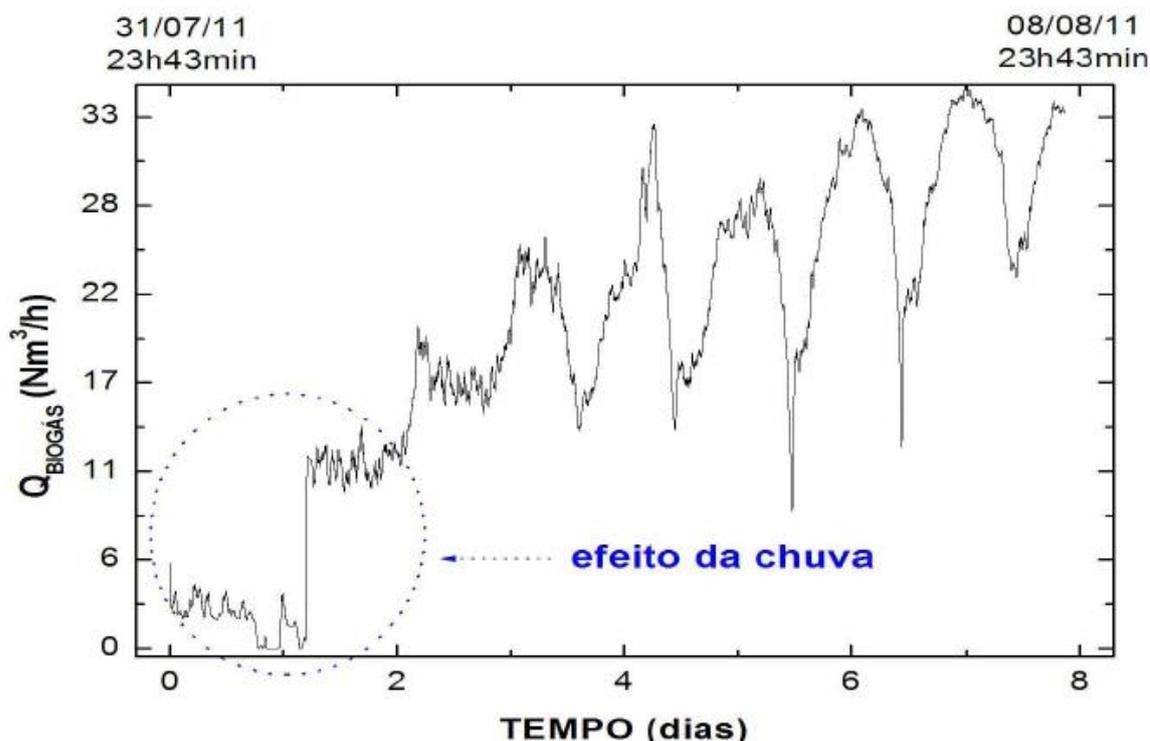


FIGURA 19 - CURVA DE VAZÃO DE BIOGÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA UM INTERVALO DE 8 DIAS  
 FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.3.1.10 Teor de metano, temperatura e a pressão manométrica do biogás

O teor de metano, a temperatura e a pressão manométrica do biogás mostraram um perfil cíclico (Figura 20). De um modo geral, a temperatura do biogás foi similar à temperatura ambiente, apresentando um valor pouco superior ao ar do ambiente, provavelmente pela oxidação da matéria orgânica, e obedecendo a mesma curva de temperatura.

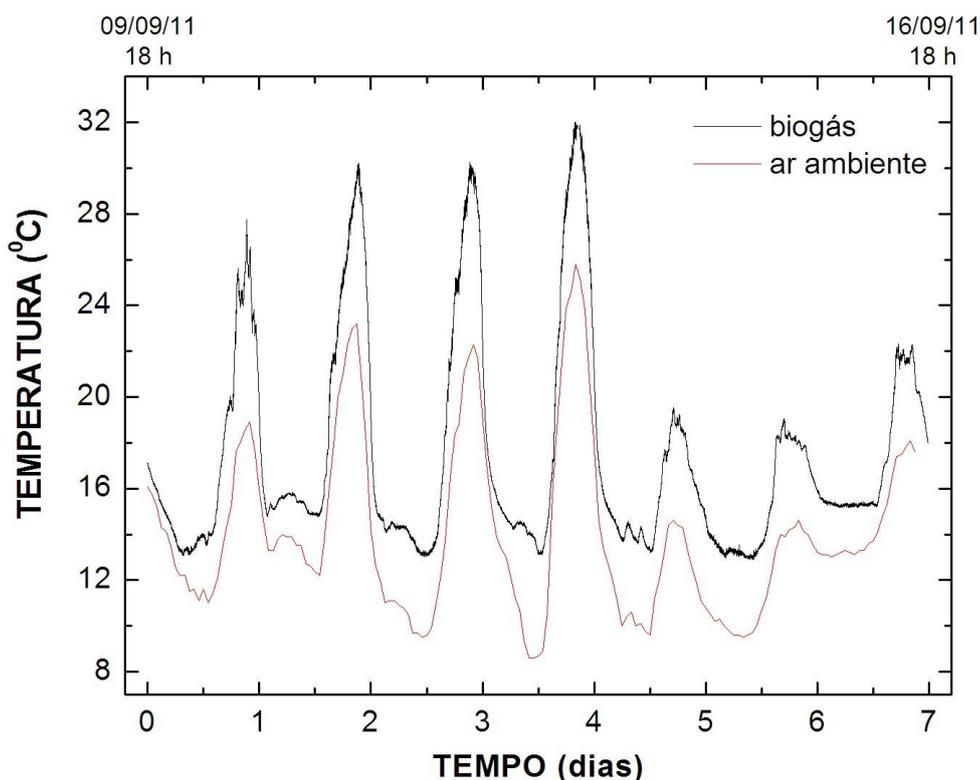


FIGURA 20 – TEMPERATURA DO BIOGÁS NO REATOR E DA TEMPERATURA DO AR AMBIENTE AO LONGO DO TEMPO  
 FONTE: SANEPAR (2012)

A amplitude foi bastante variável, mas os valores máximos ocorreram nas proximidades das 12 horas e mínimo por volta das 5 horas. A pressão manométrica do biogás nos dutos de condução foi, em média, menor de 1 mmca e, portanto, aproximadamente igual à pressão atmosférica. Esse comportamento também foi observado na câmara de gás de um dos RALFs, a qual foi monitorada por um intervalo de aproximadamente 3 meses. Entretanto, há uma zona de depleção com valores da ordem de  $-0,5$  mmca nas proximidades do queimador.

A média do teor de metano foi de 59,76 % (v/v) e o desvio padrão de 4,48 %. Apesar deste valor também ser inferior ao encontrado na literatura (entre 70% a 80%) (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; NOYOLA; SAGASTRUME; HERNANDEZ, 2006). Essa concentração de metano possibilitou atingir o poder calorífico de  $5.100$  kcal/m<sup>3</sup>. Espera-se que o processo possa ser otimizado para atingir 75% de metano, ou seja, um poder calorífico de  $6.500$  kcal/m<sup>3</sup> (Figura 2). Este valor fica entre o poder calorífico do biogás e do gás natural. Dessa forma, recomenda-se que os resultados

aqui apresentados sejam considerados na concepção e na implementação de projetos de aproveitamento energético de biogás, sobretudo porque os resultados do teor de metano expressam em tempo real a situação de operação dos reatores.

A temperatura e a pressão manométrica do biogás também descrevem um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário (Figura 21).

Os dados experimentais revelam que o volume de biogás atualmente disponível na ETE Atuba Sul é menor do que o calculado usando as fórmulas de Chernicharo (1997). Assim, para obtenção do máximo potencial produtivo, esses projetos devem considerar a melhor vedação dos reatores e o sistema de transporte de gás, de modo a evitar perdas de biogás; além de etapas de desprendimento da parcela de biogás que é produzida e fica retida no meio líquido. Adicionalmente, sugere-se que as medições de biogás sejam utilizadas como parâmetro de monitoramento do processo de tratamento de esgoto. A justificativa principal é que se não há produção de biogás a consequência é a não operação correta do reator.

O projeto de ampliação com uso dos 8 novos reatores teve inovações dos atuais projetos UASB para melhorar a operação dos reatores e por consequência a produção de biogás.

A remoção de lodo será realizada através de um sistema SIDERAL – Sistema de Remoção Automático de Lodo. O sistema é constituído de um conjunto de tubos e caixas de coleta e transporte de lodo, que permitem a sucção de lodo através de uma bomba helicoidal, que quando acionada, retira parcelas iguais de lodo do fundo do tanque do reator. Este acionamento é automático mediante a programação de um temporizador que é acionado sem a necessidade de intervenção do operador. Diariamente, o lodo é removido em cada reator, podendo se controlar a vazão, o volume e a qualidade de lodo removido.

Um Tanque Multi-Função também será construído visando melhorar a produção de biogás, e por consequência a perda do metano para a atmosfera e minimizando os efeitos desagradáveis de odor na comunidade. Para tal, cortinas de retenção de espuma serão eliminadas para que a espuma seja removida junto com o efluente, e separada e descartada automaticamente no Tanque Multi-Função. Com estas modificações propostas, a vedação hermética total do tanque é viabilizada. Com o projeto anterior, o operador necessitaria diariamente retirar a espuma, e por consequência o desprendimento do biogás e H<sub>2</sub>S a atmosfera. Cada gasômetro terá uma única saída de biogás que será conduzido para um gasômetro principal, o qual

será dimensionado para estocagem de gás para pelo menos duas horas do consumo do sistema de secagem térmica do lodo.

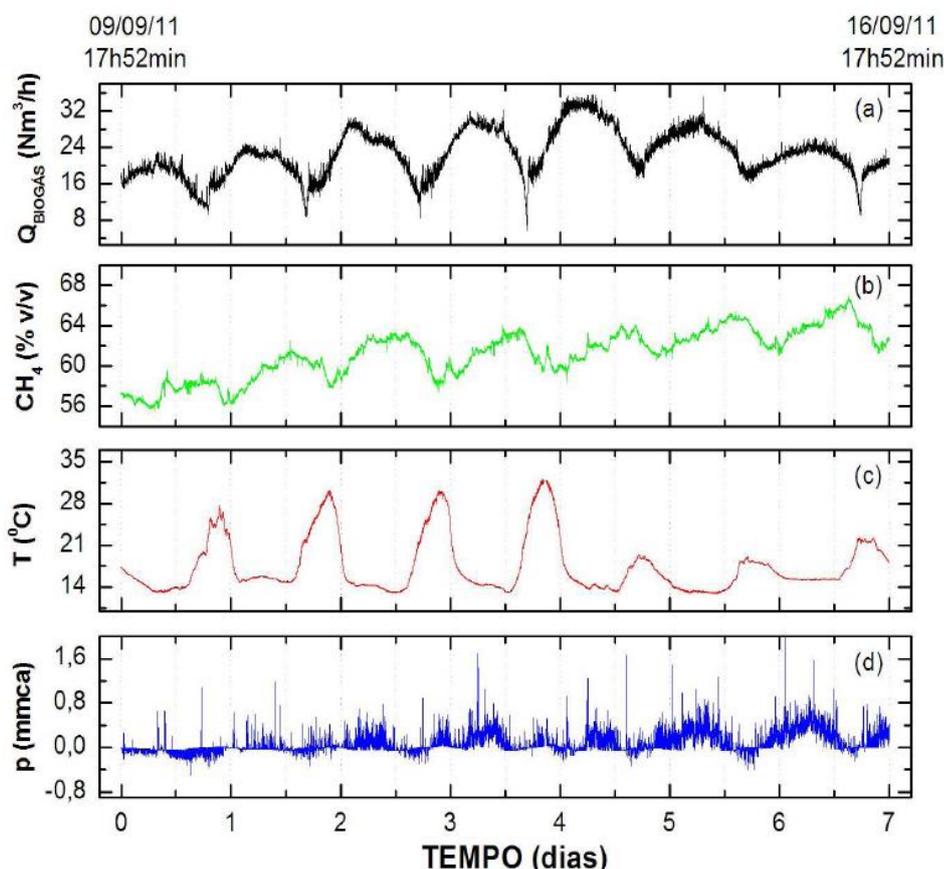


FIGURA 21 - CURVAS DE VAZÃO (A), TEOR DE METANO (B), TEMPERATURA (C) E PRESSÃO MANOMÉTRICA (D) DO BIOGÁS DO REATOR EM FUNÇÃO DO INTERVALO DE 7 DIAS

FONTE: SANEPAR (2012)

Os efluentes coletados nos reatores serão conduzidos por uma tubulação para o Tanque Multi-Função onde será realizada a remoção automática de espuma, remoção de lodo excedente sedimentado no tanque, captação de biogás dissolvido no efluente e permitira a equalização do efluente que provem dos 16 reatores em operação. Além destas funções, a aplicação de produtos químicos pode ser realizada visando uma pré-decantação.

A remoção de espuma será realizada por meio de flutuadores instalados na superfície do tanque que tem a função de coletar, succionar e recalcar o sobrenadante 24 horas por dia para uma caixa equipada com uma peneira rotativa com espaçamento de 0,25 mm prevista para reter a espuma mais densa e

descarregar em uma caçamba para posterior envio para o aterro sanitário (SANEPAR, 2012e).

#### 4.3.1.11 Teor de metano antes e depois da interrupção de vazamentos em válvulas hídricas

O teor de metano antes e depois da interrupção de vazamentos em válvulas hídricas instaladas na ETE Atuba Sul revela a importância na qualidade e segurança do processo (Figura 22). A contenção de vazamento nesses componentes fez com que o teor de metano aumentasse de aproximadamente 30% v/v para cerca de 60% v/v.

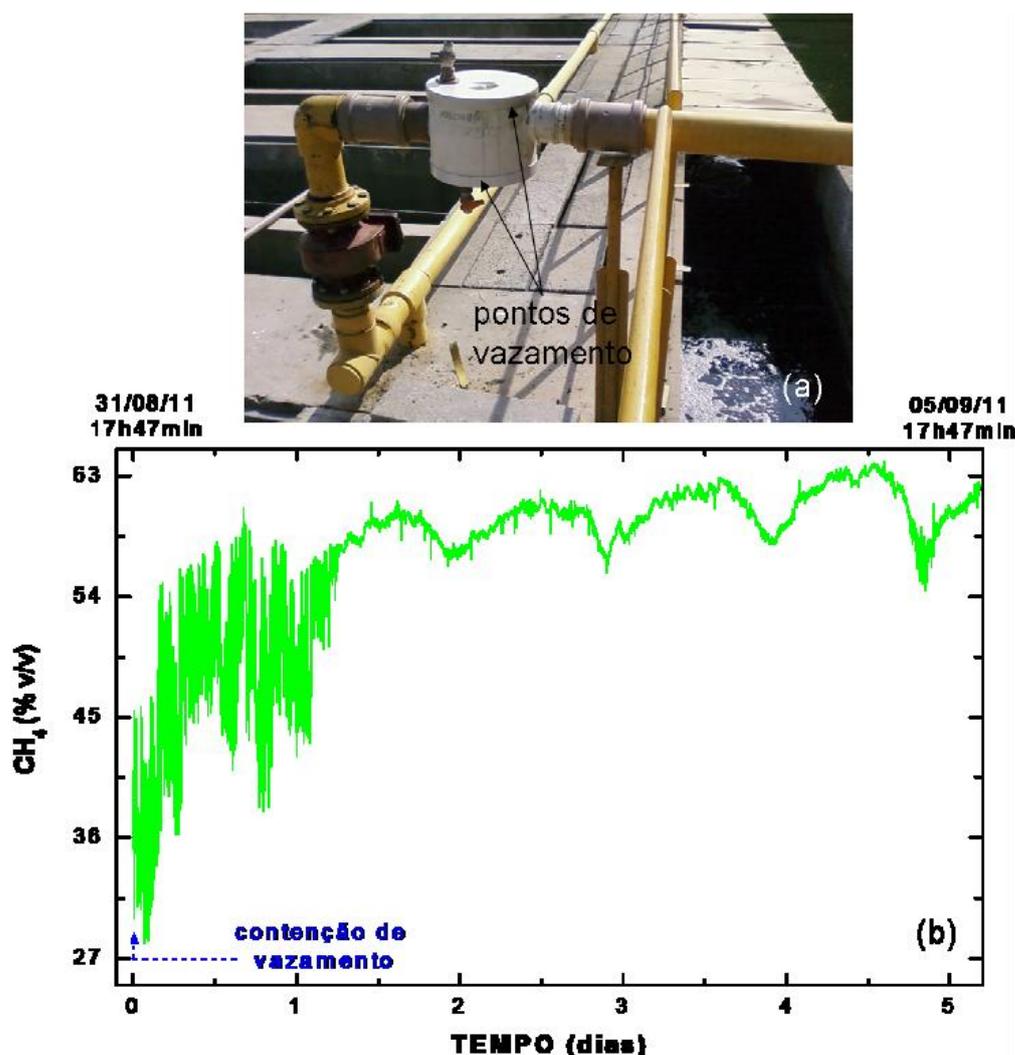


FIGURA 22 - CURVA DE TEOR DE METANO ANTES E DEPOIS DA CONTENÇÃO DE VAZAMENTO DAS VÁLVULAS HÍDRICAS INSTALADAS NA ETE ATUBA  
FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE USO DO SECADOR TÉRMICO TIPO ROTATIVO DA EMPRESA ALBRECHT

O secador rotativo foi avaliado com uso do lodo oriundo da prensa desaguadora da ETE Atuba Sul entre os dias 13/04 a 06/07/10. Foram secos 15.610 kg de lodo com umidade média de 81,9%. Foram gastos 2.571,8 m<sup>3</sup> de biogás para secagem desta massa a 18,1%. Assim, foi encontrada a taxa de 164,71 m<sup>3</sup> de biogás para cada tonelada de lodo.

O controle de temperatura foi por CLP (controlador lógico programável), sendo que na saída do secador a temperatura ficou em torno de 130° C e a temperatura máxima obtida na entrada foi de 450°C.

A maior redução de massa pós-secagem foi no 3º dia (88%), e o pior resultado foi no 7º dia (50%). Neste dia, ocorreu uma falha no sistema, o que ocasionou a sua paralisação (como indica o retângulo pontilhado na Figura 23)

A média de redução de umidade foi de 78,8 %, resultando no % de massa pós-secagem de 21,2, conforme Figura 23.

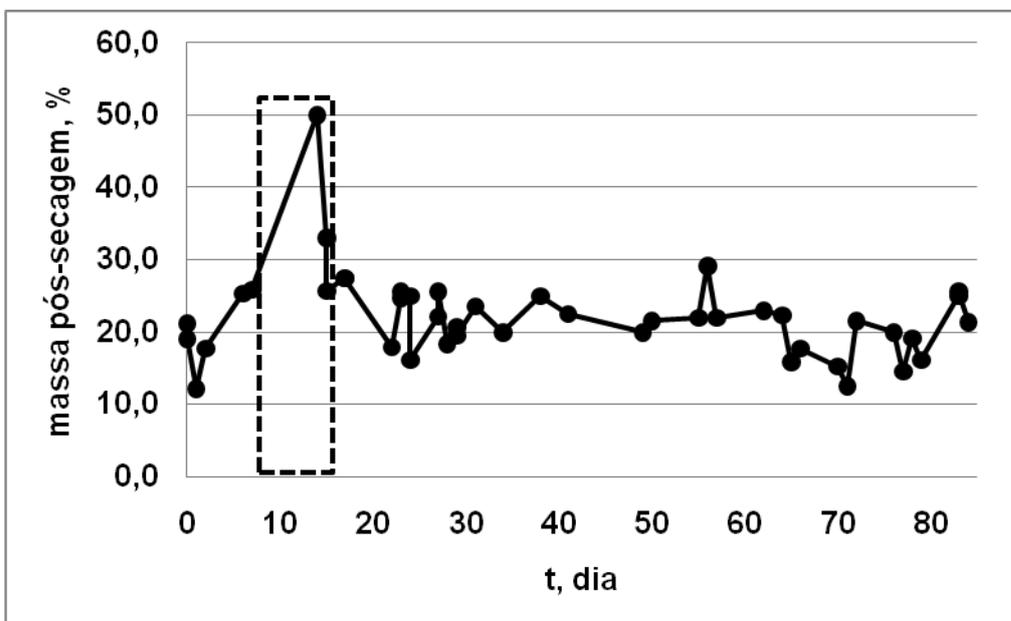


FIGURA 23 - REDUÇÃO DE MASSA PÓS-SECAGEM X DIA  
FONTE: O autor (2012)

Na Figura 24 é apresentado o gráfico de fator de redução de massa, ou seja, a diferença de massa de entrada e saída no secador. O maior fator de redução de massa foi no 3º dia com redução de 8,18 vezes a massa de entrada e o menor no 7º dia com redução de 2,0 vezes; dia em que ocorreu a falha no sistema, ocasionando a sua paralisação. Se for excluído o dado deste dia teremos o maior fator de redução de massa de 6,87 e o menor valor de 3,03.

Na ETE Montes Claros da COPASA, que adota o equipamento de Secagem da Empresa Albrecht, o fator de redução é de 5,0. Neste projeto através de uma análise de laboratório e constatou-se a redução do volume de 54% maior que a redução de massa.

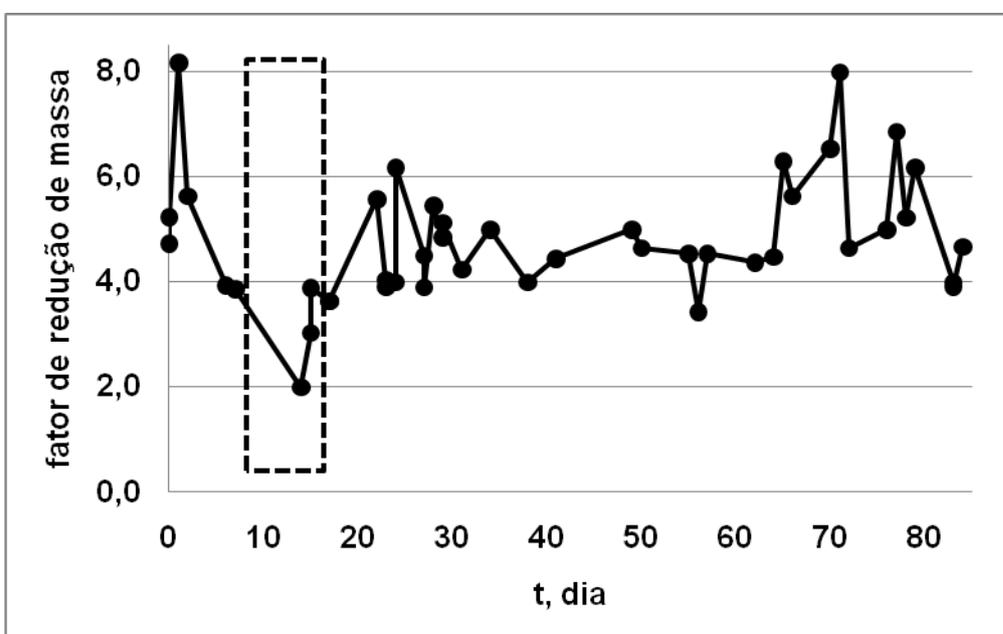


FIGURA 24 - FATOR DE REDUÇÃO DE MASSA X DIA  
 FONTE: O autor (2012)

O maior consumo de biogás foi de 201,51 m<sup>3</sup>/ton (Figura 24), excluindo o dia que ocorreu a falha no sistema e o segundo dia que foi necessário para reiniciar a operação.

No projeto de secagem de lodo em Montes Claros, o consumo de biogás é de 103 Nm<sup>3</sup>/h. E a capacidade de produção do secador é de 1,2 ton/h de torta na alimentação, com taxa de consumo de 85 m<sup>3</sup>/ton de lodo centrifugado (FREIRE, 2012).

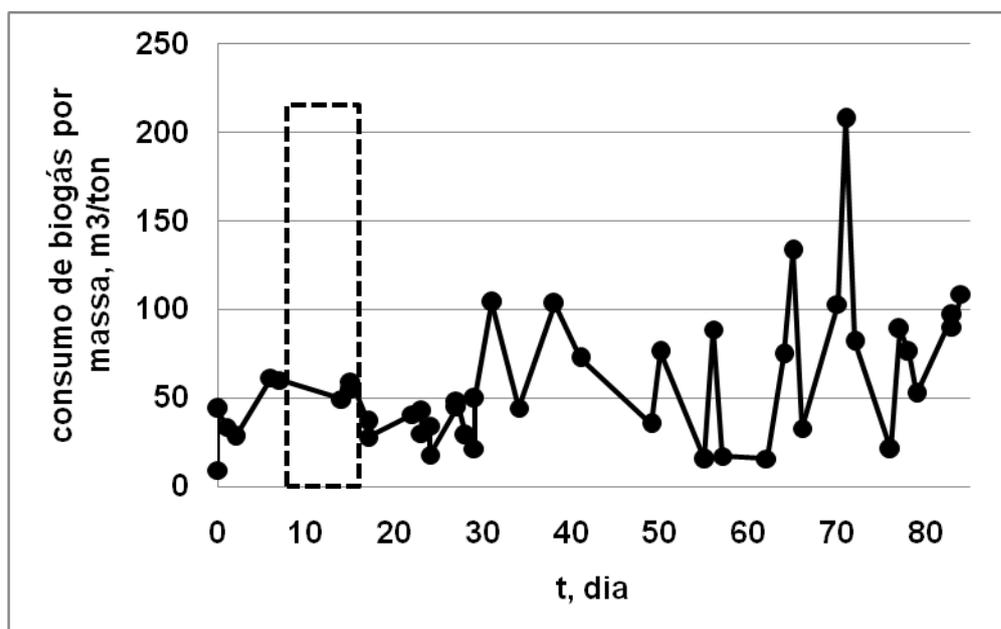


FIGURA 25 - CONSUMO DE BIOGÁS POR MASSA, M<sup>3</sup>/TON DIAS  
 FONTE: O autor (2012)

Em relação à redução de patógenos, o estudo se ateve a análise de sanidade de ovos de helmintos de lodo após o processo de secagem (Tabela 4). Três amostras de lodo com teor de umidade de 20%, 16% e 8% apresentaram ausência de ovos viáveis de helmintos por grama de sólidos totais.

TABELA 4 - VALORES DE OVOS VIÁVEIS DE HELMINTOS DO LODO APÓS O PROCESSO DE SECAGEM E VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS PELO CONAMA 375/06

Amostra	Resultado de Análise SAIDA (ovo/g de ST)	VMP (ovo/g de ST)
Lodo com umidade de 20 %	Ausência	
Lodo com umidade de 16 %	Ausência	
Lodo com umidade de 8 %	Ausência	0,25

FONTE: Laudo Analítico, Laboratório do SENAI-CIC(2010).Anexo 1

Os demais parâmetros foram utilizados os resultados das amostras coletadas dos lotes 29, 30, 31 e 32, do lodo caleado, sendo as análises realizadas no período experimental de secagem térmica.

O quadro abaixo demonstra os parâmetros de metais pesados e valor agrônômico.

Lotes	Amostra i	Amostra f	Coleta	Agronômico	Metais L2
A 29	30/06/10	30/07/10	02/08/10	x	x
A 30	23/07/10	23/08/10	25/08/10	x	x
A31	30/06/10	30/07/10	02/08/10	x	x
A 32	30/06/10	30/07/10	02/08/10	x	x

QUADRO 6 – LOTES DE ESGOTO CALEADO E VALOR AGRONÔMICO DE METAIS PESADOS

FONTE: O autor (2012)

O quadro 7 apresenta os resultados de quatro amostras dos metais pesados, e compara com os valores máximos admitidos dos requisitos legais da Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006.

A análise ocorreu no lodo desaguado no mesmo período que foram feitos os testes com a utilização do secador térmico, e as análises de ovos de helmintos e umidade.

	As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Mo	Ni	Se	Zn
A29	1	143	0,1	16	87	26	0.24	< 10	30	1	1016
A30	< 20	263,56	2	61,38	135	66	0,72	1	49,1	5	323
A31	<20	54,74	2	56,65	108	47,5	0,54	< 10	41,54	5	1054
A32	4,2	10	1,99	41,1	85	44,8	1	< 10	29,5	7,1	679
VPA <sup>4</sup>	41	1300	39	300	1500	1000	17	420	100	100	2800

QUADRO 7 – AMOSTRAS X RESULTADOS METAIS PESADOS X VALORES MÁXIMOS ADMITIDOS

Fonte: O autor (2012)

No Quadro 7 observa-se que os valores das amostras estão abaixo dos valores máximos admitidos.

Em relação aos valores agronômicos é apresentado as análises de laboratório das quatro amostras.

<sup>4</sup> Valor Máximo Admitido

%	CO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nkjel- dal	Namo- niacal	SV	pH	K <sub>2</sub> O	Na <sup>+</sup>	Stotal	CaO	MgO
A29	15,8	1,50	0,89	0,14	40,07	12,0	0,026	0,1	2,03	8,84	5,37
A30	13,0	1,54	0,40	0,05	44,7	10,8	0,021	0,1	1,63	10,3	7,01
A31	13,5	1,44	1,29	0,10	38,9	11,9	0,027	0,1	2,16	8,86	5,98
A32	10,8	1,01	0,50	0,09	40,5	12,5	0,020	0,1	1,89	10,3	6,25

QUADRO 8 – AMOSTRAS X % VALOR AGRONÔMICO

Fonte: O autor (2012)

Pode-se observar no Quadro 8, que os valores também estão abaixo do % estabelecido do valor agronômico.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA

Com a ampliação da capacidade de tratamento da estação da ETE Atuba Sul poderá produzir 90 ton/dia de lodo desidratado. Este volume é gerado através da centrifugação do lodo com a concentração de 20% do volume do esgoto gerado nos reatores e flotadores (450m<sup>3</sup>/dia). Para secar esta quantidade de 90 ton/dia de lodo úmido, provocará uma demanda de 444 m<sup>3</sup>/hora de biogás, ou seja, um consumo de 118,40 m<sup>3</sup>/ton de lodo úmido para o equipamento da empresa Perialise e de 97,33 m<sup>3</sup>/ton de lodo úmido para o equipamento da empresa Andritz que apresenta a maior eficiência.

Outro aspecto importante do impacto ambiental, é a melhor qualidade do lodo obtido. A secagem térmica é um processo que produz redução de patógenos, ou seja, ele elimina drasticamente a quantidade de organismos patogênicos. Assim, o lodo obtido é indicado para produzir biossólido Classe A, que tem restrição de uso na agricultura.

Além dos impactos econômicos, a utilização do biogás tem impactos técnicos, ambientais e sociais. No campo técnico, a secagem térmica, agregara um produto de melhor aparência, sem cheiro, o que possibilitara uma melhor aceitação aos agricultores do lodo seco.

O Quadro 9 apresenta as empresas com os equipamentos de secagem térmica e servirá para balizar a escolha do equipamento que comporá o termo de referência do edital de licitação.

<b>Parâmetros</b>	<b>Pieralise</b>	<b>Andritz</b>	<b>Aqualogy</b>	<b>Albrecht</b>
Método de Secagem	Direto	Indireto	Indireto	Direto
Temperatura de secagem	40°C – 110°C	85°C	60° C – 80 °C	100°C
Quantidade de lodo (kg/h)	3750	3750	3750	3750
Consumo de gás biogás	444 Nm <sup>3</sup> /h	365Nm <sup>3</sup> /h	435Nm <sup>3</sup> /h	400Nm <sup>3</sup> /h
Consumo de energia elétrica	220kW/h	158kW/h	270kW/h	112,5kW
Quantidade de granulado após seco	1040 kg/h	1040 kg/h	1040 kg/h	1040 kg/h
Custo da Implantação	<b>R\$ 8.499.778,00</b>	<b>R\$ 11.500.000,00</b>	<b>R\$ 17.487.000,00</b>	<b>R\$8.000.000,00</b>
Vantagens	(a) Sistema seguro (b) Não há cheiro ou fumaça no processo. (c) Aço inoxidável AISI 316L	(a) Sistema muito seguro (b) Sistema opera em baixa temperatura (c) Opera em várias partes do mundo (d) Consumo de energia	(a) Sistema opera em baixa temperatura (b) Opera em várias partes do mundo	(a) Tecnologia nacional (b) Assistência técnica
Desvantagens	Consumo de energia	Não há	a)Custo da implantação b)Consumo de energia	(a) Sistemas de segurança (b) Sistema de neutralização de gases – há cheiro e fumaça no final do processo. c) Aço carbono SAC300

QUADRO 9 – COMPARATIVO TÉCNICO DE SECADORES TÉRMICOS  
FONTE: O autor (2012)

Ao analisar e comparar os equipamentos das 4 empresas foram identificados sérios problemas no equipamento da empresa Albrecht. Há deficiência no sistema de neutralização de gases, o que resulta em cheiro e fumaça no final do processo, além de apresentar riscos de segurança/explosão.

Outro fator a desconsiderar a utilização do equipamento é a fabricação do equipamento em aço carbono, diminuindo a vida útil do equipamento.

Ao analisar o equipamento da empresa Pieralise, observa-se que o material utilizado é em aço inox, e apresenta um duplo sistema de ciclone para remoção de partículas sólidas contidas nos gases do processo de secagem. Além disso, é observado um sistema auxiliar que elimina todos os gases lançados na atmosfera por meio de torre de lavagem e resfriamento, aumentando a eliminação de odores e eliminação de fumaças e partículas sólidas.

O equipamento da empresa Andritz é em aço inox, o sistema opera em baixa temperatura e por conseqüência, baixo consumo de energia.

O equipamento da empresa Aqualogy é aço inox, porém o seu alto investimento de implantação inviabiliza a adoção da alternativa no estudo econômico.

Diante destas informações, e devido os equipamentos das empresas Andritz e Pieralise serem operados em várias partes do mundo, definiu-se para comporem o termo de referência da especificação técnica, o qual integrará o pedido de licitação.

No estudo de viabilidade, a primeira alternativa a ser avaliada é o equipamento de secagem térmica de contato indireto da empresa Andritz, sendo que está previsto o uso exclusivo de biogás gerado nos reatores RALF.

Na segunda proposta a ser analisada, considera a utilização de uma fonte complementar de combustível gasoso, o gás natural.

A terceira alternativa utiliza uma complementação de gás natural de 235 Nm<sup>3</sup>/h, conforme definições após as medições efetuadas na ETE Atuba Sul.

A quarta proposta utiliza o mesmo equipamento, com utilização de gás natural, entretanto com uma renegociação do preço do gás natural junto a COMPAGÁS.

A quinta proposta é a utilização do equipamento da empresa Andritz, considerando a quantidade máxima de gás natural a ser utilizada para viabilizar o projeto.

As outras cinco propostas a serem analisadas são da empresa Pieralise, sendo adotados os mesmos critérios da empresa Andritz.

#### 4.5.1 Implantação do sistema de secagem térmica na ETE Atuba Sul

##### 4.5.1.1 Investimento

O projeto de geração térmica a ser implantado pela SANEPAR prevê para o ano de 2013:

- a) Implantação do sistema de desidratação de lodo do tipo *decanter centrífugo*, composto de macerador, equipamento preparador/dosador de polímero em emulsão, bomba de alimentação de polímero; bomba de alimentação de lodo; medidor de vazão tipo magnético; transportadores tipo rosca helicoidais para lodo desidratado e o sistema de secagem térmico.
- b) Implantação do sistema de secagem térmica, composto de captação e transporte do biogás; armazenamento do biogás; tratamento do biogás; compressor para biogás; sistema de combustão e o secador de lodo.
- c) Implantação do Sistema de Lavagem dos Gases.
- d) Implantação de Transportadores de lodo seco para o armazenamento de lodo seco.

A SANEPAR elaborou um Termo de Referência para realização da licitação, onde os proponentes deverão atender a especificação técnica para instalação do sistema de desidratação e secagem térmica do lodo.

A previsão de publicação do edital é no início de novembro de 2012, com previsão de início das obras em abril de 2013 e conclusão das obras em maio de 2014.

O empreendimento é financiado com recursos do BNDES, com juros de 3% a.a, carência de 3 anos, percentual de financiamento de 95%, e prazo de amortização de 15 anos.

O projeto citado constitui-se das seguintes unidades construtivas:

Módulo 1 – Sistema de captação, transporte, tratamento e estocagem de biogás;

Módulo 2 – Sistema de desidratação de lodo;

Módulo 3 – Sistema de secagem térmica de lodo;

Módulo 4 – Sistema de lavagem de gases;

Módulo 5 – Testes, treinamento, operação assistida e pré-operação

Para participar da licitação, as empresas proponentes deverão atender as características do lodo bruto, desidratado, e após a secagem térmica os percentuais estabelecidos, conforme Tabela 5.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO LODO BRUTO, DESIDRATADO E APÓS A SECAGEM TÉRMICA

<b>Discriminação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Vazão de lodo a desidratar	m <sup>3</sup> /dia	450
Quantidade de sólidos no lodo úmido a desidratar	%	5
Quantidade de lodo a desidratar	m <sup>3</sup> /h	18,75
Sólidos totais no lodo a desidratar	kg/h	937
Quantidade de lodo desidratado	t/dia	90
Quantidade de lodo a secar	kg/h	3.750
Umidade do lodo seco na saída do secador térmico	%	10
Quantidade de lodo seco na saída do secador	kg/h	1.041
Quantidade de água evaporada	kg/h	2.709
Quantidade de energia para secagem do lodo úmido	kcal/h	2.317.857
Volume de biogás disponível	Nm <sup>3</sup> /h	450

FONTE: SANEPAR (2012)

NOTA: O sistema projetado será contínuo, sincronizado e automatizado em 24horas/dia.

O investimento do projeto adotado é de R\$ 8.509.752,32, orçado através de cotações com as empresas com tecnologia. Para validação dos preços a USAQ (Unidade de Aquisições da SANEPAR), analisou e aprovou os preços.

Os equipamentos da empresa Albrecht com menor valor inicial, bem como o equipamento da empresa Aqualogy, com maior valor foram desconsiderados, conforme descritos no Quadro 9.

Na licitação, a empresas deverão discriminar os custos por item e o valor total da obra, conforme tabela 6.

TABELA 6 – CUSTO TOTAL DE IMPLANTAÇÃO DO PROJETO DE GERAÇÃO TÉRMICA E SECAGEM DO LODO

<b>Unidades Construtivas</b>	<b>Valorização</b>
1 - Projeto Executivo,gerenciamento	8,7%
2 - Secador de Lodo	17,14%
3 - Sistema de tratamento e compressão do biogás	7,33%
4 - Equipamentos auxiliares (roscas, silos, etc)	12,33%
5 – Decanters mais equipamentos auxiliares	15,94%
6 - Obras de montagem eletromecânica	26,43%
7 - Start up e geração assistida	2,95%

8 - Obras civis	9,18%
Total	R\$ 8.509.752,32

FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.5.1.2 Custos

Os custos são referentes à operação e manutenção dos equipamentos e depreciação; além dos custos de consumo de energia elétrica.

##### 4.5.1.2.1 Custos anuais com operação e manutenção

###### 4.5.1.2.1.1

###### 4.5.1.2.1.2

4.5.1.2.1.3 Os custos foram divididos em custos fixos e variáveis. No caso dos custos fixos, foi considerado o custo relativo à mão de obra destinada a manutenção do sistema de secagem. Entretanto, estes custos já estão implícitos na manutenção da própria ETE, ou seja, haverá apenas um aproveitamento do funcionário encarregado do local sem prejuízo da sua atual função. Outro fator é que o sistema a ser automatizado ao sistema supervisor do Centro de Controle Operacional da ETE e a empresa fornecedora do equipamento.

Os custos variáveis estão relacionados à manutenção dos equipamentos, que devem atender as especificações determinadas pelo fabricante. A cada determinado número de horas, peças do secador e do motor devem ser substituídas. Isto significa que, quanto maior o uso, mais frequente serão as trocas e reparos.

Conforme orientações do fabricante e da área de manutenção da SANEPAR, o equipamento deverá sofrer uma parada preventiva por um período de uma semana do ano, com isto deverá ser previsto uma fonte alternativa de energia, com a utilização do gás natural.

A Tabela 7 descreve os custos variáveis.

TABELA 7 – CUSTOS VARIÁVEIS

Descrição	Frequência Anual	Custos (R\$)	% Sub Total
Revisão do Secador	1	20.000,00	10
Manutenção do Secador	3	10.000,00	5
Troca dos componentes eletrônicos	5	20.000,00	10
Mão de Obra (10h)	120	10.000,00	5
<b>Sub-Total</b>		<b>60.000,00</b>	<b>30</b>

Consumo de GN (1x ano por 7 dias)	1	132.027,84	70
<b>Total</b>		<b>198.000,00</b>	<b>100</b>

FONTE: SANEPAR (2012)

#### 4.5.1.2.2 Custo de depreciação

A tabela da Unidade de Serviços de Contabilidade (USCT) da (SANEPAR, 2012c) foi utilizada para o cálculo da depreciação; consistindo na aplicação de taxas constantes durante o tempo de vida útil estimado para o bem.

A exceção é o valor do secador térmico. O percentual de depreciação adotado foi o índice da COPASA, já que é o único equipamento em operação no Brasil, que utiliza o biogás como o insumo.

Outro critério foi através de consulta a empresa Perialise que tem os equipamentos em operação no CEDAE no Rio de Janeiro, porém apresentam problemas nas plantas pela falta de lodo originado por falha no dimensionamento. Entretanto operam em vários países na Europa e utilizam o mesmo percentual de depreciação da COPASA.

A Tabela 8 explicita os valores da depreciação.

TABELA 8 - VALORES DE DEPRECIAÇÃO

Descrição	Valores (R\$)	Vida útil (anos)	% a.a.	Valores ao ano (R\$)
Secador de lodo	1.203.278,90	10	10	120.327,89
Sistema de tratamento e compressão do biogás	623.764,84	10	10	62.376,48
Equipamentos auxiliares (roscas, silos)	1.049.252,50	17	5,88	57.708,88
Decanters mais equipamentos auxiliares	1.356.454,50	17	5,88	79.759,52
Obra eletromecânica/materiais	2.249.127,50	17	6,66	149.798,89.
Obras civis	781.195,00	50	2,00	15.623,90
<b>Total</b>	<b>7.518.369,50</b>			<b>485.595,56</b>

FONTE: O autor (2012)

NOTA: O valor do investimento totaliza R\$ 8.509.752,32, sendo descontado o montante de R\$ 991.383,78 relativo aos projetos, *start-up* e geração assistida.

#### 4.5.1.2.3 Custo de Energia consumida pelo secador térmico

A potência instalada de secador térmico é de 120 kW, sendo que a energia consumida de 84 kW/h, ou seja, 735.840 kW/ano, revertendo na sua totalidade como custo para a alternativa de secagem térmica. O custo de kW/h foi considerado em 0,21695, sendo 1,06832 no horário de pico, através do contrato de demanda com a COPEL. O projeto prevê o funcionamento do sistema em 24 horas. Com isto o custo anual é de **R\$ 240.353,21 /ano**.

#### 4.5.1.3 Receita Auferida

Este tópico abordara as receitas auferidas pelo projeto de secagem térmica, em relação ao sistema atual de caleação.

##### 4.5.1.3.1 Pátio de Cura

No novo sistema projetado, cada reator será equipado com uma bomba tipo helicoidal que fará a remoção diária de 9,67 m<sup>3</sup>/dia de lodo e recalcará o lodo para o adensador existente através de uma linha de recalque.

A quantidade de lodo produzida nos reatores anaeróbios será de 232,08 m<sup>3</sup>/dia, dos quais, 77,33 m<sup>3</sup>/dia são produzidos pelos 8 novos reatores.

Uma quantidade adicional de lodo de 210 m<sup>3</sup>/dia será produzida pelos flotadores, o que perfaz um total de 442 m<sup>3</sup>/dia, sendo adotado a quantidade de 450 m<sup>3</sup>/dia de lodo na ETE Atuba Sul. Esse lodo é concentrado através da desidratação com a utilização do *decanter* centrífugo a 25%. Logo, a quantidade de de lodo

desidratado será de 90 ton/dia e a quantidade de sólidos totais presentes será de 22,5 ton/dia.

A massa de 50% de cal deve ser adicionada em relação a quantidade de sólidos totais para que se realize a sanitização. Assim, ter-se-á um total de 101,25 ton/dia de lodo caleado, passando para uma concentração de 33,75% de sólidos totais ou massa seca.

A vazão de lodo caleado gerado será de 101,25 t/dia a ser disposto nos pátios de cura. O pátio de cura existente na ETE ATUBA SUL constitui-se de 4 módulos de 16m x 16m, com uma área de 256 m<sup>2</sup>. Ainda, uma área descoberta de 2.048 m<sup>2</sup> é utilizada para estocagem de lodo caleado. As diretrizes da SANEPAR estabelecem que a altura máxima de lodo deve ser de 0,7 m e um período de acúmulo médio de 120 dias. Logo, o número de módulos será de:

$$\text{Volume seco em 120 dias: } 101,25 \text{ m}^3/\text{dia} \times 120\text{dias} = 12.150 \text{ m}^3$$

$$\text{Área de pátio para cada módulo} = 256\text{m}^2 \times 0,7\text{m} = 179, 2\text{m}^3$$

Número de módulos necessários: 68.

Descontando os 04 módulos existentes, será necessário construir 64 novos módulos, com um total de 16.384 m<sup>2</sup>.

Considerando o aproveitamento da área de pátio descoberto, será necessário construir 58 novos módulos.

O investimento necessário considerando os valores da área e da construção civil, incluindo vias de acesso asfaltado somam:

Custo da área: R\$ 93,00/m<sup>2</sup> x 14.848 m<sup>2</sup> = R\$ 1.380.864,00 (SANEPAR, 2012)<sup>5</sup>.

Custo de construção do pátio: R\$ 147,00/m<sup>2</sup> x 14.848 m<sup>2</sup> = R\$ 2.182.656,00 (SANEPAR, 2012)<sup>6</sup>

Custo de construção de vias de acesso asfaltado: R\$ 330,00/m<sup>2</sup> x 1.781,76 m<sup>2</sup> = R\$ 587.980,00(SANEPAR,2012)<sup>7</sup>

**Custo total do benefício: R\$ 4.151.500,00.**

Uma área de lodo seco oriundo do secador térmico é necessária como contrapartida. O teor de sólido considerado para esta previsão foi de 90% e o peso específico de 1.400 kg/m<sup>3</sup>. Logo, a produção de lodo seco será de 24,98 ton/dia, ou

<sup>5</sup> O valor foi orçado pela CLI/SANEPAR

<sup>6</sup> O valor calculado foi da utilização do orçamento do pátio de cura na ETE Belém.

<sup>7</sup> Utilizado a mesma fonte do item 2.

seja uma diminuição de 4,05 do volume de lodo; o que é compatível com dados apresentados anteriormente.

Dois módulos do pátio de cura com área de 512 m<sup>2</sup> serão utilizados para armazenamento do lodo. Depositando em uma altura de 2 metros, logo ter-se-á uma capacidade de armazenamento de 40 dias.

O lodo seco deverá ser transportado e descarregado em caçambas tipo *Brooks* com tampas, para capacidade manual de 7 m<sup>3</sup> cada uma, confeccionadas em chapas de aço ASTM – A 36. Válvulas tipo guilhotina com acionamento pneumático serão instaladas para descarga de lodo seco nas caçambas.

O custo da compra das caçambas (R\$ 90.000,00/caçamba, sendo necessárias 6 caçambas), somados as melhorias do pátio de existente, resulta em **R\$ 190.000,00** (R\$ 90.000,00 + R\$ 100.000,00). Portanto, o benefício oriundo da utilização do secador térmico é de **R\$ 3.961.500,00** (R\$ 4.151.500,00 – R\$ 190.000,00).

#### *4.5.1.3.2 Sistema de Cal*

O sistema atual de silos não teria capacidade de estocagem de cal, bem como a vazão das roscas transportadoras e o misturador. Um novo sistema deveria ser previsto. Entretanto, mesmo após a instalação do sistema de secagem térmica, o sistema de adição de cal existente deverá permanecer em prontidão para situações de emergência no sistema de secagem térmica.

O valor a ser investido no novo sistema será de R\$ 1.200.000,00 (SANEPAR,2012), descontado do valor já amortizado de R\$ 600.000,00 (SANEPAR,2012), resulta em uma receita auferida **de R\$ 600.000,00**.

#### *4.5.1.3.3 Sistema de Desidratação de Lodo*

O sistema atual de desidratação de lodo composto da prensa desaguadora, equipamentos periféricos-macerador, equipamento preparador e dosador de

polímero em emulsão, bombas de alimentação de polímero e lodo, medidor de vazão, transportadores tipo roscas helicoidais para lodo desidratado no sistema atual não comportariam a quantidade de lodo a ser caleado após a ampliação. Assim, um novo investimento de R\$ 1.356.454,50 seria necessário (SANEPAR, 2012).

Neste caso o sistema atual das prensas desaguadoras deverá ser mantido para ser utilizado para desague do lodo em caso de manutenção dos equipamentos de desidratação projetados. O pátio de cura de saibro será utilizado para destinação deste material. Adotando o mesmo cálculo do sistema de cal, o valor de R\$ 500.000,00<sup>8</sup> pode ser descontado. Portanto, a redução de custos será de **R\$ 856.454,50**

#### *4.5.1.3.4 Economia com equipamentos que deixam de ser necessários*

A geração de lodo seco reduz drasticamente a necessidade de equipamento de transporte tanto interno como externo, devido a diminuição no volume pela retirada da água no lodo.

##### ***4.5.1.3.4.1 Transbordo interno: transporte de caçambas da prensa desaguadora para o pátio de cura***

O custo é de R\$ 5,54 /ton segundo dados registrados no controle de custos do serviço terceirizado da SANEPAR da ETE Atuba Sul. Para movimentação diária de 3.750 kg/h x 24 h = 90.000 kg/dia, o custo diário é de R\$ 498,60 e anual de R\$ 181.989,00 Alternativamente, o transporte interno do lodo produzido pela secagem térmica, com volume e massa reduzidos, é de 24.980 kg/dia resultando em custo diário de R\$ 138,38 ou anual de R\$ 50.662,00. Portanto o benefício obtido é de **R\$ 131.327,00 /ano.**

---

<sup>8</sup> Cálculo da USCT/SANEPAR

#### **4.5.1.3.4.2 Carregamento do lodo, transporte agricultura e espalhamento**

Os serviços de carregamento do lodo tratado por caleação no caminhão e seu transporte desde o pátio de cura da ETE para as áreas agrícolas e o espalhamento é de R\$ 73,23/ ton de lodo úmido. Para transporte diário de 70.870 kg, o custo é de R\$ 5.189,80 /ton de lodo, ou seja, de R\$ 1.894.280,50 por ano.

Alternativamente, o transporte do lodo após a secagem térmica é de 24.980 kg/dia, resultando em custo de R\$ 1.829,28 ou R\$ 667.689,17 por ano. Assim, o benefício obtido é de **R\$1.226.591,40**.

#### **4.5.1.3.4.3 Consumo de Cal Virgem**

No sistema atual, cal virgem (adição de 50% de cal por matéria seca) tem um consumo diário de 11,25 ton/dia a um custo de R\$ 250,00 por tonelada. Logo, existe um gasto diário de R\$ 2.812,50 ou seja, um gasto anual de **R\$ 1.026.562,50**.

Com visto anteriormente, não há necessidade de aplicação de cal para sanitização do lodo seco por secagem térmica. Assim, o valor acima é considerado o benefício.

#### **4.5.1.3.5 Benefícios adicionais**

Não foram considerados outros benefícios oriundos da secagem térmica em relação ao sistema atual.

- a) a diminuição do volume de transporte tanto interno quanto externo, o que resulta em menor tempo de utilização dos equipamentos de transporte, ou seja, redução de volume de gases poluentes na atmosfera;

- b) a diminuição do volume de transporte externo, a qual traz benefícios indiretos como menor desgaste nas vias utilizadas para o transporte de lodo, resultando em menor incidência de manutenção das vias economizando em equipamentos, combustíveis e diminuição de gases poluentes na atmosfera;
- c) eliminação da aplicação de cal, o que resulta também em benefícios indiretos por reduzir a exploração do minério bem como eliminar o transporte, beneficiando o meio ambiente.

#### 4.5.1.4 Resumo do Custo *versus* Receita Auferida pelo projeto

A Tabela 9 mostra todos os custos e despesas por unidade construtiva, contra a receita auferida.

TABELA 9 - DISCRIMINAÇÃO DOS CUSTOS E DAS RECEITAS AUFERIDA PELO PROJETO

Discriminação	Valores pontuais (R\$)		Valores anuais (R\$/ano)	
	Custo de investimento	Receita auferida	Custos operacionais	Receita auferida
Investimento Inicial	8.509.752,32			
Pátio de Cura		3.961.500,00		
Sistema de Cal		600.000,00		
Sistema de desidratação		856.454,50		
Transporte interno				131.327,00
Transporte externo				1.226.59,40
Consumo de cal				1.026.562,59
Energia elétrica para secagem			240.353,21	
Manutenção/operação			198.000,00	
Depreciação			485.595,56	
Resultado Final	8.509.752,32	5.417.954,40	923.948,77	2.384.480,59

FONTE: O autor (2012)

4.5.2 Estudo de viabilidade econômica dos secadores térmicos das empresas Pieralise e Andritz através da utilização da ferramenta em Excel para calcular o VPL no ano 20

No estudo de viabilidade econômico-financeira a implantação do sistema de secagem térmica não terá uma receita própria. Será computado a receita auferida, que é o valor dos custos de investimento e os custos de operação/manutenção e de depreciação que se deixará de ser investido no atual sistema de calagem.

O investimento necessário para a instalação do sistema é de R\$ 8.509.752,32, financiados com juros de 3% a.a, carência de 3 anos, e contrapartida de 5%. No cálculo de depreciação foram excluídos os custos de gerenciamento, projeto, start up e geração assistida.

O custo de fiscalização da obra é de 5%, valor definido pelo porte da obra. A análise do fluxo de caixa do projeto será por um período de operação de 20 anos, utilizando uma taxa de atratividade de 12% a.a, descontando do fluxo de caixa teremos o VPL. Caso o resultado for igual ou maior que zero ter-se-á o resultado positivo.

Nas alternativas A e F será analisado a viabilidade considerando a utilização de 100% de biogás, nas alternativas B e G, será analisado com utilização de 100% GN, C e H, considerar-se-á o uso parcial do biogás, com complementação de outra fonte de energia, o gás natural.

Nas alternativas D e I, a análise considera a renegociação do preço com a COMPAGÁS, do gás natural, dos atuais preços, ou seja de R\$ 1,3489/ m<sup>3</sup> para R\$ 1,00/ m<sup>3</sup>.

E nas alternativas E e J analisei qual a quantidade de gás natural máxima que poderá ser utilizado para viabilizar o projeto.

#### **4.5.2.1 Alternativa A - Andritz-Bio**

Nesta alternativa foi analisado o equipamento da empresa Andritz, considerando a utilização de 100% de biogás, com produção de 450 Nm<sup>3</sup>/h nos 24 reatores após as melhorias no sistema de tratamento.

O custo de operação e manutenção adotado foi de 3%. Quanto ao valor de depreciação foi calculado conforme Tabela 7, que resultou em 5,61%.

A receita auferida de investimento e de despesas de operação e manutenção, resultaram em R\$ 5.417.954,40 e R\$ 2.384.480,90, respectivamente, conforme Tabela 8.

Na receita auferida de operação e manutenção foi acrescido o valor de R\$ 874.151,64 relativos a diferença de consumo de biogás dos equipamentos da empresa Andritz em relação a empresa Perialise.

O VPL será considerado como o fator de recuperação do capital inicial, e resultou **positivo em R\$ 16.944.787,70** (Vide Apêndice A).

#### **4.5.2.2 Alternativa B - Andritz-GN**

Nesta alternativa será analisado o equipamento da empresa Andritz, utilizando o GN na quantia total de 365 Nm<sup>3</sup>/h. Nesta alternativa será utilizado as informações do item 4.5.2.1, com exceção do custo de operação e manutenção. Neste caso será incluído um percentual de 50% no valor do custo de operação e manutenção, relativos ao pagamento do gás natural a COMPAGÁS.

Considerando o uso de gás natural em 365 Nm<sup>3</sup>/h, multiplicando pelo número de horas do dia e o número de dias do ano, ter-se-á 3.197.400 m<sup>3</sup>/ano de gás natural, que multiplicado o valor por R\$ 1,3484 / m<sup>3</sup>, resulta no valor de R\$ 4.312.972,86. Quanto ao VPL no ano 20 é **negativo em R\$ 12.470.027,02**.

#### **4.5.2.3 Alternativa C - Andritz Bio(medido) e GN**

Neste estudo será analisado a viabilidade utilizando o equipamento da empresa Andritz, que apresenta uma melhor eficiência, principalmente quanto ao consumo de biogás, que é de 365 Nm<sup>3</sup>/h.

A quantidade de biogás considerada é de 129 Nm<sup>3</sup>/h e de GN de 235 Nm<sup>3</sup>/h. Com isto, o custo de operação e manutenção é de R\$ 2.775.816,24. Quanto ao valor do VPL no ano 20 é **negativo de R\$ 3.617.411,09**.

#### 4.5.2.4 Alternativa D - Andritz Bio(medido) e GN renegociado

Neste estudo será analisada a viabilidade utilizando o equipamento da empresa Andritz, com complementação de outra fonte de energia, o gás natural, e renegociando o valor do gás natural a R\$ 1,00/m<sup>3</sup>, resultando no VPL positivo no ano 20 de **R\$ 317.084,88**.

#### 4.5.2.5 Alternativa E- Andritz Bio-GN – linha de corte

Nesta alternativa será avaliado o equipamento da empresa Andritz estabelecendo a quantidade máxima de gás natural que poderá ser utilizada para que o VPL no ano 20 tenha um resultado maior ou igual a zero.

No equipamento da empresa Andritz o custo com gás natural poderá ficar em 25%, ou R\$ 2.552.916,96 a.a. Portanto a quantidade de gás natural que poderá ser utilizada para viabilizar o empreendimento no ano 20 é de **180 Nm<sup>3</sup>/h**.

#### 4.5.2.6 Alternativa F - Pieralise-Bio

Nesta alternativa foi analisado o equipamento da empresa Pieralise, considerando a utilização de 100% de biogás, com produção de 450 Nm<sup>3</sup>/h nos 24 reatores após as melhorias no sistema de tratamento. O custo de operação e manutenção adotado foi de 3,0%. Quanto ao valor de depreciação foi calculado conforme Tabela 7, que resultou em 5,61%.

O VPL será considerado como o fator de recuperação do capital inicial, e resultou em **R\$ 12.120.572,79**.

#### 4.5.2.7 Alternativa G - Perialise GN

Nesta alternativa será analisado o equipamento da empresa Perialise, utilizando o GN na quantia total de 444 Nm<sup>3</sup>/h, e as informações do item 4.5.2.1, com exceção do custo de operação e manutenção. Neste caso será incluído um percentual de 61% no valor do custo de operação e manutenção, relativos ao pagamento do gás natural a COMPAGÁS. Considerando o uso de gás natural em 444 Nm<sup>3</sup>/h, multiplicando pelo número de horas do dia e o número de dias do ano, ter-se-á 3.197.400 m<sup>3</sup>/ano de gás natural, que multiplicado o valor por R\$ 1,3484 / m<sup>3</sup>, resulta no valor de R\$ 5.244.909,84. Quanto ao valor de Fluxo de caixa no ano 20 é **negativo em R\$ 17.879.958,98.**

#### 4.5.2.8 Alternativa H - Bio(medido) e GN.

Neste estudo será analisado a viabilidade utilizando o equipamento da empresa Perialise, sendo que o consumo de biogás é de 444 Nm<sup>3</sup>/h. A quantidade de biogás considerada é de 129 e de GN de 315 Nm<sup>3</sup>/h. Com isto o custo de operação e manutenção é de 46%, resultando num **VPL negativo de R\$ 9.027.343,05.**

#### 4.5.2.9 Alternativa I - Bio(medido) e GN renegociado

Neste estudo será analisado a viabilidade utilizando o equipamento da empresa Perialise, com complementação de outra fonte de energia, o gás natural, e renegociado o valor do gás natural a R\$ 1,00 / m<sup>3</sup>. O resultado foi negativo em **R\$ 3.617.411,09.**

#### 4.5.2.10 Alternativa J - Bio-GN – linha de corte

Nesta alternativa será avaliado o equipamento da empresa Perialise estabelecendo a quantidade máxima de gás natural que poderá ser utilizada para que o VPL no ano 20 tenha um resultado maior ou igual a zero.

No equipamento da empresa Perialise o custo com gás natural poderá ficar em 25%. Portanto a quantidade de gás natural que poderá ser utilizada para viabilizar o empreendimento no ano 20 é de 180 Nm<sup>3</sup>/h.

A tabela 10 mostra todos as alternativas com os respectivos VPL.

TABELA 10 – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONOMICA DOS SECADORES TÉRMICOS DAS EMPRESAS ANDRITZ E PIERALISE

Alternativa	Equipamento	Investimento	VPL
Bio	Andritz	R\$ 8.509.752,32	R\$ 16.944.787,70 (+)
GN	Andritz	R\$ 8.509.752,32	R\$ 12.470.027,02(-)
Bio/GNm	Andritz	R\$ 8.509.752,32	R\$ 3.617.411,09(-)
Bio/GNm e r	Andritz	R\$ 8.509.752,32	R\$ 317.084,88(+)
Bio/GN c	Andritz	R\$ 8.509.752,32	R\$ 174.727,11 (+)
Bio	Perialise	R\$ 8.509.752,32	R\$ 12.120.572,79 (+)
GN	Perialise	R\$ 8.509.752,32	R\$ 17.879.958,98(-)
Bio/ GN m	Perialise	R\$ 8.509.752,32	R\$ 9.027.343,05(-)
Bio/GNm e r	Perialise	R\$ 8.509.752,32	R\$ 3.617.411,09(-)
Bio/GN c	Perialise	R\$ 8.509.752,32	R\$ 174.727,79 (+)

FONTE: O autor (2012)

NOTA: Esse estudo foi feito com utilização da ferramenta *Microsoft Excel* para calcular o VPL no fluxo de caixa estudando as alternativas com uso de biogás e com complementação de gás natural.

#### 4.5.3 Análise de retorno econômico-financeiro

Para complementar o biogás no Secador Térmico esta prevista a instalação de uma segunda entrada, possibilitando receber o gás natural através de uma fonte

externa. A empresa que fornecerá a gás natural é a COMPAGÁS, através de uma tubulação derivada na tubulação existente junto a Rodovia Curitiba/Paranaguá.

Para o fornecimento do gás natural deverá ser elaborado e assinado um contrato de demanda entre as duas empresas, sendo que o custo de fornecimento e assentamento da tubulação ficará a cargo da COMPAGÁS. A empresa deverá disponibilizar o fornecimento de 235 Nm<sup>3</sup>/h de gás natural. O custo por m<sup>3</sup> do gás natural está estimado em R\$ 1,3484/m<sup>3</sup>, podendo ser renegociado à R\$ 1,00/m<sup>3</sup>, conforme preços praticados pelo mercado em outros estados da federação.

A taxa de atratividade (TMA) é utilizada como o parâmetro de retorno exigido do investimento, deve-se ser no mínimo igual a uma taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes de menor risco de investimento.

Com base nos resultados observados, quando o VPL (Valor Presente Líquido) do Fluxo de caixa no ano 20 for maior que zero, ou período de projeção considerado, utilizando uma taxa de atratividade de 12% a.a, comprovam a viabilidade econômico-financeira do projeto. O equipamento da empresa Andritz na alternativa A, apresenta o VPL no ano 20 positivo de R\$ 17.869.506,65, e a empresa Pieralise na alternativa F um valor positivo de R\$ 12.120.572,79. As Companhias de Saneamento no Brasil adotam nos projetos o retorno de investimento de esgoto em 20 anos.

Outro ponto a ser analisado é a disponibilidade de biogás a ser utilizado no sistema de secagem térmica. Caso as projeções sejam inferiores a necessidade de consumo do secador, isto poderá tornar o projeto de sistema de secagem térmica no ano 20, anti-econômico. As alternativas, C, H e I o VPL no ano 20 é negativo.

O uso exclusivo de capital próprio para investimento ou de financiamentos no Brasil, como o BNDES, deve ser avaliado. Alguns Organismos Internacionais tem linhas de financiamento com juros mais baixos, cujo custo é inferior ao verificado com o uso de recursos próprios e BNDES, com taxas de (12% e 3%), respectivamente.

Algumas fontes internacionais oficiais de cooperação técnica, científica e tecnológica e financeira que potencialmente podem vir a financiar projetos ligados à melhoria ambiental, redução de emissão de gás de efeito estufa e uso racional de recursos naturais, são: JICA; GTZ; KFW; BIRD; UNEP; CIDA; ODA; UNDP; ORSTOM; BID e GEF.

Outro ponto importante a considerar é que a partir de 2013, o aproveitamento energético do biogás receberá ainda mais atenção por parte da Cooperação Alemã. A Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e o Banco Alemão para o Desenvolvimento – KfW Entwicklungsbank, duas instituições alemãs, coordenarão um programa de cinco anos de duração. Ela é chamada DKTI Biogás – Iniciativa de Tecnologias Limpas do Governo Alemão, cujo objetivo principal é incentivar o aproveitamento energético do biogás e a difusão de tecnologias limpas neste setor (BMU, 2012).

O estudo utilizando o VPL no Projeto de Secagem Térmica na ETE ATUBA Sul permite afirmar com segurança que o projeto é economicamente e financeiramente viável, desde que a quantidade de biogás fique em torno de 180 Nm<sup>3</sup>/h, ou seja o custo de operação e manutenção em 28% (APENDICE A).

Há também um grande potencial para aumentar a rentabilidade do empreendimento através da possibilidade de diminuir a distância da entrega do lodo seco aos agricultores. Outro aspecto positivo é de agregar valor financeiro ao lodo seco. Por exemplo, através da venda do lodo seco como adubo aos agricultores ou a empresas do ramo de fertilizantes.

## 5 CONCLUSÃO

A ETE Atuba Sul trata efluente de residências, comércio e indústria, sendo que a maioria é das economias residenciais (93%). A vazão efluente entre 2010 e 2012 foi de ordem similar ao seu dimensionamento (1.120 l/s). O fluxo de entrada foi variável e se mostrou crescente. Em alguns momentos, ele ultrapassou o limite máximo de sua capacidade. Assim, esses dados confirmam a necessidade de ampliação prevista em 50% de sua capacidade de operação, somados ao crescimento da população dos municípios. Deste modo, as possibilidades de destinação dos seus produtos finais (biogás, lodo e efluente do tratamento), devem ser exaustivamente avaliadas, pois sua filosofia de operação é baseada em reatores anaeróbios tipo UASB.

A redução de DQO observada na ETE Atuba Sul foi de 62,6%, reduzindo de 390 a 146 mg/L, ou seja tem um potencial máximo de biodigestão para produzir biogás de 245 mg/L com uso da carga orgânica (expressa em DQOr). O potencial de produção de metano atual, baseado nesta redução de DQOr e numa vazão média de 976 l/s, seria de 7.767 m<sup>3</sup>/dia a 20°C e de 12.243,66 m<sup>3</sup>/dia de biogás. Caso atinja a capacidade máxima de expansão (1.680 l/s), produziria 13.369,26 m<sup>3</sup>/dia de metano, mantendo-se similares as demais condições.

O comportamento da sazonalidade diária foi avaliado em três dias de estiagem e revelou que o fluxo de efluente, a DQO, a DBO<sub>5</sub>, o pH e a alcalinidade apresentam grande variação e são cíclicos. A vazão média foi de 976 l/s e oscilou de 521 a 1.210 l/s. O pH foi levemente alcalino e variou entre 6,9 e 7,4. A alcalinidade variou de 129 a 209 mg/l. O pH muito abaixo de 7 ou alcalinidade muito baixa são condições indesejáveis para a etapa fermentativa de produção de metano, e não foram verificadas. A média da DBO<sub>5</sub> revelou valor máximo de 370 mg/l, sendo que corresponde ao material orgânico facilmente metabolizado, enquanto que a DQO, que se correlaciona a toda matéria orgânica, atingiu quase o dobro deste valor (766 mg/l) no mesmo período. A relação DQO/DBO foi inferior a 2,2, o que sugere que há um bom potencial para bio-transformação. Deste modo, a produção de biogás pode ser obtida com sucesso

A produção de metano foi acompanhada na linha dois dos RALF. O valor médio (21,56 Nm<sup>3</sup>/h) foi aproximadamente 54% do previsto teoricamente. Admitindo

que a bio-transformação tenha ocorrido em condições ótimas, essa diferença pode ser atribuída a duas hipóteses: falhas de vedação adequada dos sistemas e falta de desprendimento do gás do efluente tratado e do lodo.

A produção de biogás foi cíclica, o que é compatível com o comportamento cíclico do afluente da ETE. Ela foi maior às 12 h e atingiu o valor mínimo às 5 h. Ela também foi afetada negativamente pela ocorrência de chuva intensa, bem como por vazamento e manutenção não prevista. A vedação do sistema e dispositivos para remoção de biogás do lodo e do efluente deve ser realizada para aumentar a disponibilidade de metano como combustível suficiente para a secagem térmica. Mesmo assim, o sistema de secagem do lodo deve prever uma fonte alternativa de combustível para evitar interrupções do processo. O teor de metano no biogás atingiu cerca de 60%, o que corresponde a 5.100 kcal/m<sup>3</sup>. No entanto, esse valor pode atingir a 6.500 kcal/m<sup>3</sup> caso seja otimizado a 75%.

O potencial de secagem do secador rotativo foi avaliado por 84 dias. O consumo médio foi de 164,71 m<sup>3</sup> de biogás para cada tonelada de lodo. A média de redução de massa foi 78,8%, ou seja, pode reduzir drasticamente o gasto com transporte e de distribuição do lodo aos agricultores. Ovos de helmintos em amostras de lodo com 20,16 e 8% de umidade residual não foram detectados em lodo seco e não caiado. Assim, a secagem pode reduzir o gasto com transporte interno e externo e evitar gastos com adição de cal, que o maior custo no tratamento do lodo, e evitar novos investimentos em construção de pátios de cura, e ampliação no sistema de cal.

O investimento necessário para implantação do sistema de desaguamento e secagem prevê um investimento de R\$ 8.509.752,32, sendo analisadas a viabilidade econômico-financeira dos equipamentos das empresas Andritz e Pieralise. Foi utilizada uma ferramenta do Microsoft Excel para calcular o VPL no ano 20. Como o sistema de secagem térmica não tem receita direta, e como o sistema atual de calagem do lodo necessita de novos investimentos, foi atribuído uma receita auferida através dos valores a serem investidos na construção de pátio de cura, sistema de cal e de desidratação, no valor de R\$ 5.417.954,40 e através de uma receita auferida de custos de operação, manutenção, de depreciação e de energia elétrica, que resulta em R\$ 2.384.480,59. Nas análises das alternativas A e F ter-se-á o resultado positivo no VPL no ano 20 do Fluxo de Caixa de R\$ 17.869.506,65 e R\$ 12.120.572,79. Caso o sistema necessite de energia auxiliar com a utilização de 235

Nm<sup>3</sup>/h e 315 Nm<sup>3</sup>/h o VPL será negativo no ano 20 em R\$ 3.617.411,09 alternativa B e R\$ 9.027.343,05 na H. Nestes dois casos inviabilizará a adoção do sistema de secagem térmica, conforme critérios estabelecidos do retorno de investimento com VPL maior ou igual a zero no ano 20.

E por fim, foi avaliado a quantia máxima de gás natural que poderá ser utilizada, para que o retorno do investimento no ano 20 fique maior ou igual a zero. O valor calculado é de 180 Nm<sup>3</sup>/h, para os equipamentos das empresas Andritz e Pieralise.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Quantificar as concentrações de biogás, presente no meio líquido e estudar a técnica do seu desprendimento;
- b) Definir técnicas para diminuição de infiltrações nas redes coletoras de esgoto e interceptores;
- c) Estudar os processos de combustão do lodo de esgoto com o intuito de avaliar sua eficiência quanto à redução do volume de lodo, emissão de processo de secagem.
- d) Avaliar a potencialidade e geração de energia elétrica a partir do uso do biogás excedente após a otimização da secagem.

## REFERÊNCIAS

AGRAWAL, L.K et al., **Treatment of Dilute Wastewater em a UASB**. Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects, 1997.

ALBRECHT Equipamentos Industriais LTDA. **Bruthus**: secador granulador rotativo de lodos. 2007. Disponível em: <<http://www.albrecht.com.br/pt-br/default.php?go=bruthus>>. Acesso em: 15 set. 2012.

ALVES, João Wagner Silva. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado na digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Internunidades de Pós Graduação da USP – USP/EP/IF/FEA, São Paulo, 2000.

ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; FERNANDES, F. - **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar; Finep, 1999.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEATH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater**. 21.ed. Washington: APHA, 2005.

ASSAF NETO, Alexandre. **Matemática financeira e suas aplicações**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 1988.

ASSESSORIA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. Diretoria de Meio Ambiente e Ação Social. Companhia de Saneamento do Paraná. Testes de Transmissores de Vazão Mássica da Magnetrol na Sanepar em Condições de Guiamento Passivo de Biogás. **Informe Técnico**, n. 1, março 2012.

\_\_\_\_\_. Diretoria de Meio Ambiente e Ação Social. Companhia de Saneamento do Paraná. Testes de Medições em tempo real de biogás na ETE Atuba Sul. **Informe Técnico**, n. 2, março 2012.

AZEVEDO,R.O de et al. **Análise econômica financeira para implantação de centrais termelétricas a gás no Brasil**.

BARÉA,L.C., **RALF, Reator Anaerobio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente reduzindo custos e economizando energia no Tratamento de Esgotos**, março/2006.

BLEY, J.R.C., **Reflexões sobre a economia**. Itaipu Binacional, Nov/2010.

BMU – MINISTÉRIO FEDERAL DO MEIO AMBIENTE DA PROTEÇÃO DA NATUREZA E DA SEGURANÇA NUCLEAR DA ALEMANHA. **Guia da Missão DKTI à Alemanha: Aproveitamento energético de biogás.** Alemanha, 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2006.

CAMPOS, J.R et al., **Tratamento de gases gerados em reatores anaeróbio.** Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro, ABES, 1999.

CAPSTONE. **“Authorized Service Provider Training Manual”** Capstone Turbine Corporation, Los Angeles, 2001.

CENBIO – CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto (ENERG-BIOG). **Relatório Técnico final.** São Paulo: ENER, 2004.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios: Fundamentos da digestão anaeróbia.** Belo Horizonte: UFMG, 1997. v.5.

\_\_\_\_\_. **Reatores Anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** 2º ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 380 p. Vol. 5, 2008.

COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C.; VARKULYA JUNIOR; A.; PECORA, V. Política públicas para a Energia. Desafios para os próximos quadriênio. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **Anais...** Brasília, DF, 31 mai. a 02 jun. 2006.

COMPARINI, J.B., SOBRINHO, P.A. Contribuição ao estudo de vazões de esgoto sanitário em comunidades de pequeno porte. In: Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1, 1992. **Anais...** Rio de Janeiro, v.2, tomo 3.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais, 2010. Disponível em <http://www.copasa.com.br> em 20 de set. de 2012.

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.** 2002. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FORESTI, E. **Determinação de Ácidos graxos voláteis e alcalinidade a bicarbonato para monitoramento de reatores anaeróbios.** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

FROST, R.; POWLESLAND, C.; HALL, J.E.; NIXON, S.C. IOUNG C.P. Review of sludge treatment and disposal techniques. **Report** nº DoE 2306-M/1, Water Research Centre, 1990.

GENOVESE, A.L.; UDAETA, M.E.M.; GALVÃO, L.C.R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 6, 2006. **Anais...** 2006.

GIZ. **A empresa O perfil da GIZ.** Ministério Federal do Meio Ambiente da Proteção da Natureza e da Segurança Nuclear da Alemanha, 1 jul. 2012. Disponível em: <<http://www.giz.de/de/SID-48EF99B9-90DDB1A1/downloads/giz2012-pt-perfil-giz.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2012.

GOLDEMBERG, J; VILLANUEVA, L.D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** 2. ed. Rev. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

HIRSCHFELD, Henrique. **Engenharia econômica e análise de custos:** aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Brasil, 2010. Disponível em: [http:// www.ibge.gov.br/](http://www.ibge.gov.br/) em 20 de out. de 2012.

JORDÃO, E.P; ALÉM SOBRINHO, P. Pesquisa e experiência com pós-tratamento para reatores no Brasil. **Relatório PROSAB/FINEP**, São Carlos: Universidade de São Paulo, USP, 2004.

KATO, M.T.; FLORÊNCIO, L.; ARANTES, R.F.M. Tratamento de esgotos sanitários em reatores tipo EGSB anaeróbio e aeróbio. In: CHERNICHARO, C.A.L. (Org.). **Póstratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: UFMG, 2001. v. 2.

LAMAS, W.Q. **Análise termoeconômica aplicada a uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética.** Tese(Doutorado) – Faculdade de Engenharia Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

LETTINGA, G. et al. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed RALF reactor. In: **Biotechnology and bioengineering**, 1983.

LIMA, F.P. **Energia no tratamento de esgotos:** análise tecnológica e institucional para a conservação de energia e o uso do biogás. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LOWE, P.; FRSC, MBIM(fellow) **Developments in the thermal drying of sewage sludge.** Wakefield, UK, 1995.

MACEDO, M.A.S.; SIQUEIRA, J.R.M. Custo e estrutura de capital – uma abordagem crítica. **Finanças Corporativas: aspecto essencial.** Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2006.

MENDONÇA, L.C; CAMPOS, J.R. **Potencialidade do uso do biogás gerado em reatores UASB na secagem de lodo.** São Carlos: USP, 2007.

METCALF; EDDY. Wastewater Characteristics. In: **Wastewater Engineering: Tratment, Disposal, Reuse.** New York: McGraw-Hill, 2003.

NIELSEN, M.J. **Utilização do Gás Metano proveniente da purificação do gás de esgoto,** Curitiba: SANEPAR, 1983.

NIHON SUIDO CONSULTANTS CO. LTD. **Relatório dos resultados da Avaliação no Brasil do Envio de Peritos para verificar a situação atual do desenvolvimento do sistema de esgoto da República Federativa do Brasil.** Curitiba: NIHON, 2010.

NOYOLA, A; SAGASTUME, J.M.M., HERNANDEZ, J.E.L. Treatment of biogas produced in anoerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. **Reviws em Enviromental Science and Bio/Technology**, v.5, 2006.

PAUSS, A.; ANDRE, G; PERRIEER, M; GUIOT, S.R. **Liquid-to-gas mass transfer in anerobic processes**. Inevitable transfer limitations of methane and hidrogen in the biomethanation process. Appl Environ Microbiol, 1990.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PROSAB – PROGRAMA EM SANEAMENTO BÁSICO. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB, 2009.

QASIN, S.R. **Wastewater treatment plants: Planning, design, and operation**. New York: CBS College Publishing, 1985.

SANEPAR. **Operação & Manutenção do Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado – RALF – ETE Atuba Sul**. POP/250/RALF ATUBA SUL. [s.d.]a.

\_\_\_\_\_. **Procedimento Operacional Padrão para controle de Maus Odores**, POP/250/1.5/022-00. [s.d.]b.

\_\_\_\_\_. **Gestão do Lodo de ETE e Unidades de Gerenciamento de Lodo – UGL**. 2012a.

\_\_\_\_\_. **Relatório de operação da ETE Atuba Sul 2012: Unidade de Serviço e de Esgoto**. Curitiba: Sanepar, 2012b. Relatório Impresso.

\_\_\_\_\_. **Relatório da USEG**. Curitiba, 2012c. Relatório Impresso.

\_\_\_\_\_. **Relatório da DI**. Curitiba, 2012d. Relatório Impresso.

\_\_\_\_\_. **Relatório da DI**. Curitiba, 2012e. Relatório Impresso

\_\_\_\_\_. **Elementos para o Plano de Ação, aplicáveis ao Plano Diretor de Resíduos de Sistemas de Esgotamento Sanitário para o Paraná 2006**. Curitiba: Sanepar, 2006.

\_\_\_\_\_. **Relatório do Teste 2010.** Secagem e Higienização de Lodo de Esgoto com Uso de Biogás Gerado “in loco” na Estação de Tratamento de Esgoto Atuba Sul. Curitiba: Sanepar, 2011.

SAVELLI, C.G. Módulo de Tratamento Anaeróbio de esgotos domésticos com processamento de gás para fins automotivos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 13, 1983. **Anais.** Balneário Camború, nov. 1983.

SEMA – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. Resolução N° 021. **Dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimento de saneamento.** SEMA, 2009.

SILVEIRA, O. **Biodigestor:** Solução energética para o campo. São Paulo: Secretaria da Ciência: Família Crista, 1981.

SPRENGER, Humberto Elias. **Viabilidade de uso de biogás de ETE para alimentação de células a combustível de ácido fosfórico.** Dissertação (Mestrado) -- LACTEC, 2009.

TROCCIOLA, J. C.; HEALY, H.C. **Demonstration of Fuel Cells to Recover Energy from an Anaerobic Digester Gas – Phase I. Conceptual Design, Preliminary Cost, and Evaluation Study.** United States Environmental Protection Agency, Project Summary, EPA/600/SR-95/034, 1995.

TSUTIYA, M.T. - Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. **Revista Sanare**, n. 10, set. 1999.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Anaerobic sewage treatment:** A practical guide for regions with a hot climate. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

VELÁSQUEZ, S.M.S.G et al. **Biogas from sewage treatment uses to electric energy generation, by a 30 kw(iso) microturbine.** 2006.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

WEBER, P; BUSATO, R.; **Contribuição do Saneamento Básico na Redução do Aquecimento Global e na Geração de Energia: um estudo de Caso do Paraná.** In 24° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2007.

## APÊNDICE

## APÊNDICE A – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONOMICO-FINANCEIRA

### CUSTO DE INVESTIMENTOS A PREÇOS FINANCEIROS

TABELA 1 – SECADORES TÉRMICOS

#### Sistema Francês de Amortização (Tabela Price)

**BNDES**

Prazo	<b>15</b> anos	Valor obra	<b>8.509.752,32</b>
Perc. Financ. V. Financiado	<b>95%</b>		
	8.084.264,70		
Juros (a.a.)	<b>3,00%</b> aa		
Carência	<b>3</b> anos		
Nº períodos	<b>12</b> dado órgão financeiro		

Períodos	Sdo. Devedor	Amortização	Juros	Prestação
1	2.694.754,90	-	71.860,13	71.860,13
2	5.389.509,80	-	143.720,26	143.720,26
3	8.084.264,70	-	431.160,78	431.160,78
4	7.658.264,24	426.000,47	646.741,18	1.072.741,64
5	7.198.183,74	460.080,50	612.661,14	1.072.741,64
6	6.701.296,79	496.886,94	575.854,70	1.072.741,64
7	6.164.658,89	536.637,90	536.103,74	1.072.741,64
8	5.585.089,96	579.568,93	493.172,71	1.072.741,64
9	4.959.155,52	625.934,44	446.807,20	1.072.741,64
10	4.283.146,32	676.009,20	396.732,44	1.072.741,64
11	3.553.056,38	730.089,94	342.651,71	1.072.741,64
12	2.764.559,25	788.497,13	284.244,51	1.072.741,64
13	1.912.982,35	851.576,90	221.164,74	1.072.741,64
14	993.279,30	919.703,05	153.038,59	1.072.741,64
15	0,00	993.279,30	79.462,34	1.072.741,64
16				
17				
18				
19				
20				
<b>TOTAL</b>		<b>8.084.264,70</b>	<b>5.435.376,17</b>	<b>9.988.473,04</b>

TABELA 2 – RECEITA AUFERIDA

**Sistema Francês de Amortização (Tabela Price)**Prazo **15** Anos

Perc.

Financ. **95%**

V.

Financiado 5.147.056,68

Juros (a.a.) **3,00%** AaCarência **3** AnosNº períodos **12** dado órgão financeiro**BNDES**Valor Obra **5.417.954,4**

Períodos	Sdo. Devedor	Amortização	Juros	Prestação
1	1.281.578,66	-	34.175,43	34.175,43
2	2.563.157,32	-	68.350,86	68.350,86
3	3.844.735,98	-	205.052,59	205.052,59
4	3.642.137,55	202.598,43	307.578,88	510.177,31
5	3.423.331,25	218.806,30	291.371,00	510.177,31
6	3.187.020,44	236.310,81	273.866,50	510.177,31
7	2.931.804,77	255.215,67	254.961,64	510.177,31
8	2.656.171,85	275.632,92	234.544,38	510.177,31
9	2.358.488,29	297.683,56	212.493,75	510.177,31
10	2.036.990,05	321.498,24	188.679,06	510.177,31
11	1.689.771,95	347.218,10	162.959,20	510.177,31
12	1.314.776,40	374.995,55	135.181,76	510.177,31
13	909.781,20	404.995,19	105.182,11	510.177,31
14	472.386,39	437.394,81	72.782,50	510.177,31
15	0,00	472.386,39	37.790,91	510.177,31
16				
17				
18				
19				
20				
<b>TOTAL</b>		<b>3.844.735,98</b>	<b>2.584.970,57</b>	<b>6.359.420,28</b>

## TABELA 3 – FLUXO DE CAIXA

Investimento obra Sist Sec Termica	8.509.752,32	Receita Auferida - investimento	5.417.954,40
Contra-Partida	5%		
Custo de Gerenciamento e Projeto	730.348,00	Incl. No Invest.Receita Auferida - operação e manutenção	3.258.632,10
Start up e geração assistida	251.037,00	Incl. No Invest.Receita Auferida - depreciação	4% aa do invest.
Custo de Fiscalização	5%		
Custo de Operação e Manutenção	3%	aa do invest.	
Depreciação	6%	aa do invest.	

Taxa de Desconto do Fluxo de Caixa 12%aa

ANO	ALTERNATIVA A					ALTERNATIVA B					A – B FLUXO DE CAIXA INCREMENTAL
	Investimento		Operação e Manutenção	Depreciação	TOTAL	Investimento		Operação e Manutenção	Depreciação	TOTAL	
	Contr. Part	Serv. Dívida				Contr. Part	Serv. Dívida				
1	212.743,81	71.860,13	-	-	284.603,94	202.354,53	34.175,43	-	-	236.529,96	(48.073,98)
2	212.743,81	143.720,26	-	-	356.464,07		68.350,86	3.258.632,50	202.354,53	2.655.186,29	2.298.722,22
3		431.160,78	425.487,62	595.682,66	1.452.331,06		205.052,59	3.258.632,50	202.354,53	2.791.888,01	1.339.556,95
4		1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92		510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
5		1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92		510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
6		1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92		510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
7		1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92		510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
8		1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92		510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81

9	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
10	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
11	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
12	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
13	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
14	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
15	1.072.741,64	425.487,62	595.682,66	2.093.911,92	510.177,31	3.258.632,50	202.354,53	3.097.012,73	1.003.100,81
16		425.487,62	595.682,66	1.021.170,28		3.258.632,50	202.354,53	2.586.835,43	1.565.665,15
17		425.487,62	595.682,66	1.021.170,28		3.258.632,50	202.354,53	2.586.835,43	1.565.665,15
18		425.487,62	595.682,66	1.021.170,28		3.258.632,50	202.354,53	2.586.835,43	1.565.665,15
19		425.487,62	595.682,66	1.021.170,28		3.258.632,50	202.354,53	2.586.835,43	1.565.665,15
20		425.487,62	595.682,66	1.021.170,28		3.258.632,50	202.354,53	2.586.835,43	1.565.665,15
VPL				11.476.670,85				17.869.506,65	16.944.787,70

## **ANEXOS**

## ANEXO A – RELATÓRIOS DE ENSAIOS 2429, 2430 E 2431/2010

LABORATORIOS SENAI CIC  
RELATÓRIO DE ENSAIOS 2430/2010



ANEXO 1

Pag 1/1

Requisitante: **SANEPAR USES - Companhia de Saneamento do Paraná**  
 Endereço: **Rua Antonio Batista Ribas, 151 - Tarumã - Curitiba - Paraná**  
 Identificação da amostra: **Saída do Secador - 84%**  
 Tipo de amostra: **Lodo**  
 Coleta: tipo **Simple** responsável **Requisitante** data **13/07/10** hora **15h30min**  
 Entrada no laboratório: data **15/07/10** horário **10h39min**

Ensaio	Resultado	Unidade	Data Realização	Metodologia
--------	-----------	---------	-----------------	-------------

Ensaio Parasitológicos				
Viabilidade de Ovos de Helmintos (Ascaris)	Ausência	n° em /4g de Sólidos Totais	15/07/10	Deteção, Enumeração e Determinação de Viabilidade

REFERÊNCIAS
1. EPA / 625 / R-92 / 013 / 2003 Appendix I – Viabilidade de Ovos de Helmintos ( Ascaris ).

OBSERVAÇÕES
1. Para os ensaios parasitológicos amostra preservada sob refrigeração.

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS
<p>Analista Téc Junior Carlos R. Dalke CRQ 09902414</p> <p>Analista Téc Pleno Sirley M. Baldim CRB 34965-07</p>

/smb Curitiba 28/07/10

Os resultados contidos nesse relatório referem-se somente à amostra analisada. É permitida a reprodução, desde que integralmente e sem nenhuma alteração

Rua Senador Accioly Filho 298 CEP 81.310-000 Bairro CIC Curitiba/PR Fone :41-3271-7158

Ref: CIC 5007 Rev 07

**LABORATORIOS SENAI CIC**  
**RELATÓRIO DE ENSAIOS 2429/2010**



ANEXO 1

Pag 1/1

Requisitante: **SANEPAR USES - Companhia de Saneamento do Paraná**  
 Endereço: **Rua Antonio Batista Ribas, 151 - Tarumã - Curitiba - Paraná**  
 Identificação da amostra: **Saída do Secador - 80%**  
 Tipo de amostra: **Lodo**  
 Coleta: tipo **Simplex** responsável **Requisitante** data **13/07/10** hora **15h00min**  
 Entrada no laboratório: data **15/07/10** horário **10h39min**

Ensaio	Resultado	Unidade	Data Realização	Metodologia
<b>Ensaios Parasitológicos</b>				
Viabilidade de Ovos de Helmintos (Ascaris)	Ausência	n° em /4g de Sólidos Totais	15/07/10	Deteção, Enumeração e Determinação de Viabilidade

**REFERÊNCIAS**

- EPA / 625 / R-92 / 013 / 2003 Appendix 1 - Viabilidade de Ovos de Helmintos ( Ascaris ).

**OBSERVAÇÕES**

- Para os ensaios parasitológicos amostra preservada sob refrigeração.

**RESPONSÁVEIS TÉCNICOS**

Analista Téc Junior Carlos R. Dalke CRQ 09902414

Analista Téc Pleno Sirley M. Baldim CRB 34965-07

.../smb Curitiba 28/07/10

**LABORATORIOS SENAI CIC**  
**RELATÓRIO DE ENSAIOS 2431/2010**



ANEXO 1

Pag 1/1

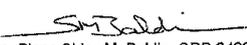
Requisitante: **SANEPAR USES - Companhia de Saneamento do Paraná**  
 Endereço: **Rua Antonio Batista Ribas, 151 - Tarumã - Curitiba - Paraná**  
 Identificação da amostra: **Saída do Secador - 92%**  
 Tipo de amostra: **Lodo**  
 Coleta: tipo **Simple** responsável **Requisitante** data **13/07/10** hora **16h00min**  
 Entrada no laboratório: data **15/07/10** horário **10h39min**

Ensaio	Resultado	Unidade	Data Realização	Metodologia
--------	-----------	---------	-----------------	-------------

Ensaio Parasitológicos				
Viabilidade de Ovos de Helmintos (Ascaris)	Ausência	n° em /4g de Sólidos Totais	15/07/10	Deteção, Enumeração e Determinação de Viabilidade

REFERÊNCIAS
1. EPA / 625 / R-92 / 013 / 2003 Appendix I – Viabilidade de Ovos de Helmintos ( Ascaris ).

OBSERVAÇÕES
1. Para os ensaios parasitológicos amostra preservada sob refrigeração.

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS
<p align="center">             Analista Téc Junior Carlos R. Dalke CRQ 09902414                       Analista Téc Pleno Sirley M. Baldim CRB 34965-07         </p>

.../smb Curitiba 28/07/10

## ANEXO B – CUSTOS DA RECICLAGEM AGRÍCOLA 2011

### CUSTOS DA RECICLAGEM AGRÍCOLA DE LODO DE ESGOTO

32.000,00

2011

PRODUTO	Físico		12 meses	R\$/t	Part %
CAL (ton)	1.703,79		785.000,00	24,53	<b>25,69</b>
POLÍMERO (ton)	2,31		233.000,00	7,28	7,63
TRANSPORTE (ton efetivamente transportadas 20 % red.)	24.460,00		1.358.176,00	42,44	<b>44,45</b>
ANÁLISES LODO	-		105.000,00	3,28	3,44
MANUTENÇÃO (Pá, retro, esparramador, concha, pálio e brooks)	-		123.000,00	3,84	4,03
DIESEL (Litros)(pá e brooks)	7.749,29		21.000,00	0,66	0,69
<b>TOTAL</b>			<b>2.625.176,00</b>	<b>82,04</b>	<b>85,91</b>
		<b>Insumos e contratos</b>	<b>82,04</b>		

custo pessoal (operadores desaguamento/transbordo/carregamento/téc agrícola/estagiário/agronomo)			208.000,00	6,50	6,81
equipamentos (brooks/pá carregadeira/retro/espalhadores/veículo/computador)			222.428,20	6,95	7,28
		<b>Mão de obra e equipamentos (depreciação)</b>		13,45	14,09
		<b>Custo total</b>	<b>3.055.604,20</b>	<b>95,49</b>	<b>100,00</b>

<b>Manutenção máquinas</b>	
<b>Equipamento</b>	<b>Custo</b>
Caminhão Brooks	1.130,00
Prensa (motobomba p/ limpeza)	841,00
Pá carregadeira	28.768,22
Retro escavadeiras	22.340,27
Brooks	6.861,67
Esparramadores	20.992,73
Prensa (tela da esteira)	14.890,05
Coletor de lodo (UI IRAÍ)	367,50
E787	300,00
Análise de Solo	6.000,00
	<b>102.491,44</b>