



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

LUDIMILA MARVILA GIRONDOLI

**DESIDRATAÇÃO TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO ATRAVÉS DA
QUEIMA DE BIOGÁS: METODOLOGIA PARA ETE's DE PEQUENO
PORTE**

**VITÓRIA/ES
2015**

LUDIMILA MARVILA GIRONDOLI

**DESIDRATAÇÃO TÉRMICA DO LODO DE ESGOTO ATRAVÉS DA
QUEIMA DO BIOGÁS: METODOLOGIA PARA ETE's DE PEQUENO
PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Saneamento e Saúde Pública.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini

VITÓRIA/ES
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

G527d Girondoli, Ludimila Marvila, 1984-
Desidratação térmica de lodo de esgoto através da queima do
biogás : metodologia para ETE's de pequeno porte / Ludimila
Marvila Girondoli. – 2015.
112 f. : il.

Orientador: Sérgio Túlio Cassini.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento
Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro
Tecnológico.

1. Biogás. 2. Lodo residual – Desidratação. 3. Água – Estações
de tratamento – Esgotos. 4. Sustentabilidade. 5. Controle de custo.
I. Cassini, Sérgio Túlio. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

LUDIMILA MARVILA GIRONDOLI

**DESIDRATAÇÃO TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO
ATRAVÉS DA QUEIMA DE BIOGÁS: METODOLOGIA PARA
ETE's DE PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Aprovada em 10 de fevereiro de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. DSc Renato Ribeiro Siman
Examinador Interno (PPGES / UFES)



Prof. DSc Bruno Coraucci Filho
Examinador Externo (FEC / UNICAMP)



Prof. DSc Sérgio Túlio Alves Cassini
Orientador (PPGES / UFES)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Celi e Adelson Girondoli, e a minha irmã, Yassana M. Girondoli, pelo apoio e incentivo dado a todas as minhas escolhas e decisões;

Ao meu namorado, Tiago Lamas, pelo companheirismo e paciência ao longo desse trabalho;

Às minhas amigas, Edvânia Queiroz e Vivian Linhalis, por me apoiar na realização desse trabalho e compreender minha ausência durante esse período;

Ao meu orientador, Sérgio Túlio, pela confiança no meu trabalho e pelas importantes orientações dadas;

Ao professor e examinador interno, Renato Siman, pelas contribuições e colaborações dadas;

Aos meus colegas do mestrado, por compartilharem comigo as dificuldades e as alegrias nesse período;

Ao examinador externo, Dr. Bruno Coraucci Filho, por ter contribuído imensamente para a melhoria deste trabalho, mesmo em um momento de tantos imprevistos;

À CESAN pela liberação das horas necessárias para eu cursar o mestrado profissional e pelo apoio técnico e financeiro;

Ao técnico ambiental responsável pela ETE Piaçu, Vinícius Mattos Fabris, por todo profissionalismo, apoio e empenho a essa pesquisa;

Ao operador da ETE Piaçu, Jurandyr Santesso, pelo excelente trabalho e empenho nessa pesquisa;

As minhas gestoras, Karina Luna Moura e Maria Helena Alves, por acreditarem na minha capacidade e sempre incentivarem e apoiarem os projetos que eu me proponho a desenvolver;

Aos meus colegas da CESAN que de alguma forma contribuíram para o sucesso desse trabalho: André Sefione, Joãozito Amorim, Elza Abreu, Juciane Motta, Karine Rubim, João Elias Colodetti, Aloísio Palma Júnior e Deoclécio Zanotti;

À empresa Sanevix Engenharia pela parceria e presteza nos serviços realizados e

À Marluce e à Berenice pela companhia durante esse período de intenso estudo e dedicação.

RESUMO

Na perspectiva de que, na atualidade, a escolha da tipologia para a estação de tratamento de esgoto (ETE) deve se considerar as exigências tecnológicas, de economia e os anseios da comunidade, é necessária a pesquisa de soluções que busquem a sustentabilidade no processo do tratamento do esgoto, principalmente relacionada aos resíduos gerados nesse processo. Nessa concepção, a associação do biogás como fonte de calor para o tratamento do lodo, ambos resíduos gerados em UASB, passa a ser uma alternativa a ser explorada uma vez que não se verifica a aplicação efetiva dessa associação em companhias de saneamento brasileiras, principalmente quando se trata de estações de pequeno porte. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar a viabilidade da desidratação térmica, através da queima do biogás sobre o leito de secagem, para redução da umidade e da concentração de patógenos do lodo biológico produzido em ETEs de pequeno porte, tendo como estudo de caso a ETE Piaçu. Para tal, foram coletadas e analisadas amostras de lodo, secadas ao longo de 21 dias, para os parâmetros umidade, sólidos totais, sólidos voláteis, coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella sp*, durante os meses de junho a setembro de 2014. Em relação aos teores de umidade do lodo, os valores encontrados para o leito com queima do biogás (média de 15%) foi significativamente menor que os do leito sem queima (média de 28,3%). Para os parâmetros microbiológicos, verificou-se a inativação dos ovos viáveis de helmintos, atendendo ao padrão limitado pela Resolução CONAMA nº 375/2006. Contudo, para os parâmetros *Salmonella sp* e coliformes termotolerantes, o calor proveniente da queima do biogás não foi suficiente para elevar a temperatura da massa do lodo e promover a letalidade desses microrganismos de forma a atender a Resolução. Verificou-se que, com a metodologia adotada, haveria uma redução de cerca de 80% dos custos com disposição adequada do lodo da ETE Piaçu e que o retorno financeiro do investimento seria obtido em aproximadamente 4 anos. Assim, a metodologia adotada neste trabalho para a desidratação do lodo através do calor proveniente da queima do biogás, apresentou resultados satisfatórios sendo uma alternativa técnica, ambiental e economicamente viável de utilização energética do biogás para ETEs de pequeno porte.

Palavras-chaves: Biogás, lodo de esgoto, desidratação térmica, sustentabilidade.

ABSTRACT

Currently the choice of Sewage Treatment Plant (STP) typology should consider the technological, economic and community requirements. Research solutions that seek sustainability is required in the process of sewage treatment, mainly related to waste generated in the process. In this conception, the association of biogas as a heat source for the treatment of sludge, both waste generated in UASB, becomes an alternative to be explored since there is no effective application of this association in Brazilian sanitation companies, especially in small STP. The objective of the study was to evaluate the feasibility of thermal dewatering through burning biogas on the drying bed, to reduce moisture and pathogen's concentration of biological sludge made in small STP. Having as a study case the STP from Piaçu. Sludge samples were collected and analyzed over 21 days of drying to the parameters: moisture, total solids, volatile solids, fecal coliform, viable helminths eggs and Salmonella sp in four repetitions, during the months of June to September, 2014. In relation to moisture, the values found for the bed with burning biogas (average 15%) was significantly lower than those bed of without burning (mean 28.3%). For microbiological parameters, there was the inactivation of viable helminths eggs, fulfilling the standard limited by 357/2006 Resolution of Conama. However, for Salmonella sp and fecal coliform parameters, the heat from the burning of biogas was not enough to raise the sludge mass temperature and promote the lethality of these microorganisms in order to fulfill the Resolution. With the methodology adopted it was found that there would be a reduction of about 80% of the costs with adequate sludge disposal of Piaçu STP and the financial return on investment would be achieved in about 4 years. However, the methodology adopted in this study for dewatering the sludge through the heat from the burning of biogas, showed satisfactory results being an alternative technique, environmentally and economically viable of energy use of biogas for small STP.

Keywords: Biogas, sewage sludge, thermal dewatering, sustainability.

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA – American Public Health Association
AWWA - American Water Works Association
CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
E. coli – Escherichia coli
ETE – Estação de tratamento de esgoto
NBR - Norma da Associação Brasileira de Normas Técnica
NMP - Número mais provável,
PCI – Poder calorífico inferior
R² - coeficiente de regressão
ST - Sólidos totais
SV - Sólidos voláteis
UASB – Upflow anaerobic sludge blanket
UFF - Unidade formadora de floco,
UFP - Unidade formadora de placa.
USEPA – United States Environmental Protection Agency
WEF - Water Environment Federation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos sólidos no lodo de esgoto.....	26
Figura 2 - Variação da porcentagem de sólidos totais e umidade em relação ao estado físico do lodo. 26	
Figura 3 – Aspectos da seção transversal de um leito de secagem.....	31
Figura 4 - Localização do distrito de Piaçu, município de Muniz Freire, estado do Espírito Santo.	39
Figura 5 – Vista dos leitos de secagem na ETE Piaçu antes da montagem do experimento.	40
Figura 6 – Vista do leito de secagem (Leito 2) na ETE Piaçu.	40
Figura 7 – Croqui de ilustração do experimento.	42
Figura 8 - Queimadores com ampliação móvel em alumínio.....	42
Figura 9 - Divisão dos Leitos de secagem existentes na ETE Piaçu com a distribuição da dos queimadores instalados no Leito 2.	43
Figura 10 – Vista das estufas para reter o calor proveniente da queima do biogás.	44
Figura 11 - Dimensões das estufas	44
Figura 12 - Vista interna da estufa referente ao Leito 2 após a descarga do lodo líquido de 15 cm.....	45
Figura 13 - Vista externa da estufa referente ao Leito 2 após a descarga do lodo líquido de 15 cm.	45
Figura 14 - Compressão do lodo seco, com o rolo compressor utilizado na pesquisa, para quebrar os torrões.	46
Figura 15 – Localização dos pontos de monitoramento de temperatura e umidade do ar interno nas estufas.....	50
Figura 16 - Correlação entre densidade e umidade do lodo.....	53
Figura 17 – Aspecto do Leito 2 no 4º dia após a descarga.	55
Figura 18 - Aparato para pesagem do lodo.....	55
Figura 19 - Umidade média do lodo comparando os dois tratamentos aplicados, com e sem queima do biogás.....	58
Figura 20 - Comportamento da umidade do lodo no mês de junho de 2014.	60
Figura 21 - Comportamento da umidade do lodo no mês de julho de 2014.	60
Figura 22 - Comportamento da umidade do lodo no mês de agosto de 2014.....	61
Figura 23 - Comportamento da umidade do lodo no mês de setembro de 2014.	61
Figura 24 - Umidade média do lodo, em relação aos dias de secagem, para o agregado junho/julho. ...	62
Figura 25 - Umidade média do lodo, em relação aos dias de secagem, para o agregado agosto/setembro.	63
Figura 26 - Comportamento das temperaturas do ar médias diárias.	68
Figura 27 - Comportamento da umidade média do ar nos dias monitorados durante o experimento.	69
Figura 28 - Correlação entre peso e umidade do lodo	82
Figura 29 - Redução da umidade, ao final dos 21 dias, considerando diferentes tipologias para a secagem do lodo e os custos financeiros associados.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do biogás em porcentagem do volume	18
Tabela 2 - Poder calorífico do biogás, conforme composição do biogás.	19
Tabela 3 - Características do biogás gerado na ETE Piaçu	19
Tabela 4 - PCI de alguns combustíveis utilizados como fonte energética.	20
Tabela 5- Variação da concentração de microrganismos no lodo de esgoto.	24
Tabela 6 - Caracterização microbiológica de lodo biológico bruto de reatores UASB.....	25
Tabela 7 - Distribuição dos sólidos por tipo de lodo.....	27
Tabela 8 - Limites estabelecidos para agentes patogênicos referentes ao lodo Classe A.	29
Tabela 9 - Temperatura x tempo de exposição necessário para inativação de alguns microrganismos patogênicos	34
Tabela 10 – Resultados do monitoramento dos parâmetros umidade, sólidos totais e sólidos voláteis .36	
Tabela 11 - Resultados de umidade (%) na 2ª descarga comparando três tratamentos em função do tempo de secagem	37
Tabela 12 - Resultados das análises de umidade do lodo em cada leito, expressas em porcentagem, ao longo dos dias monitorados de cada mês.	57
Tabela 13 - Resultado do modelo ANOVA Two-Way para os valores de umidade considerando os quatro meses monitorados.....	59
Tabela 14 - Resultado do modelo ANOVA Two-Way para os valores de umidade no lodo considerando os meses agregados.....	63
Tabela 15 - Interação entre os leitos de secagem considerando o tempo após a descarga.....	64
Tabela 16 – Valores de temperatura e da umidade do ar distribuídos por quartis em relação aos meses monitorados.....	66
Tabela 17 - Médias dos valores temperatura e umidade do ar monitorados entre os meses de junho a setembro de 2015.....	67
Tabela 18 - Análise T student para umidade e temperatura do ar entre as estufas simples e com queima do biogás	67
Tabela 19- Correlação de Pearson entre as médias das temperaturas das estufas e a temperatura ambiente	69
Tabela 20 - Resultados da primeira análise: Teste T student para a diferença de entre a temperatura do ar nas estufas com a temperatura do ar ambiente.....	70
Tabela 21 - Resultados da segunda análise: Teste T student para os valores de umidade do ar internos nas estufas.	71
Tabela 22 - Resumo dos dados obtidos através do monitoramento da temperatura, da umidade do ar e da insolação.	71
Tabela 23 – Resultados da relação entre sólidos voláteis e sólidos totais.....	73
Tabela 24 - Resultados das análises de ovos viáveis de helmintos.....	74
Tabela 25 - Resultados da análise de Salmonella sp.....	76
Tabela 26 - Resultados das análises de Coliformes Termotolerantes	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos níveis de tratamento requeridos para os diferentes tipos de uso do biogás	21
Quadro 2 - Etapas típicas e finalidades do tratamento do lodo de esgoto e alternativas de disposição final.	28
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem para desidratar lodo de esgoto ...	31
Quadro 4 - Pesquisa desenvolvidas com utilização de biogás para redução da umidade e inativação de patógenos de lodo de esgoto doméstico.	35
Quadro 5 - Rotina de descarga, compressão (C), revolvimento (R) e retirada do lodo realizada nas quatro repetições (junho a setembro).....	47
Quadro 6 - Métodos de análises de cada parâmetro.	48
Quadro 6 - Distribuição mensal para os dias das coletas para os parâmetros físicos (F) e microbiológicos (M).	48
Quadro 7- Quantitativo das análises laboratoriais realizadas para os parâmetros físicos umidade, sólidos totais, sólidos voláteis.....	49
Quadro 8 - Quantitativo das análises laboratoriais realizadas para os parâmetros microbiológicos Coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e Salmonella sp.	49
Quadro 10 - Medidas utilizadas para gerar a equação de regressão peso x umidade do lodo	54
Quadro 11 - Recursos financeiros utilizados para a implantação do experimento	80
Quadro 12- peso do lodo, em kg, para cada valor de umidade considerada.....	81
Quadro 13 – Geração de lodo antes e após a implantação do projeto.....	82
Quadro 14 - Custos associados ao transporte e disposição do lodo da ETE Piaçu	83
Quadro 15 – Tempo de retorno do investimento realizado.....	84
Quadro 16 - Atividades operacionais de rotina da ETE Piaçu.....	86
Quadro 17 - Atividades acrescidas à rotina de operação da ETE Piaçu.	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	HIPÓTESES	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1	BIOGÁS: FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL	18
4.2	LODO DE ESGOTO.....	22
4.2.1	<i>Características microbiológicas</i>	23
4.2.2	<i>Características físicas</i>	25
4.3	TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO.....	27
4.3.1	<i>Desaguamento – Leitões de secagem</i>	30
4.3.2	<i>Higienização – Tratamento térmico</i>	33
4.4	PESQUISAS DESENVOLVIDAS: QUEIMA DO BIOGÁS X LODO DE ESGOTO	34
5	METODOLOGIA	39
5.1	LOCAL DO ESTUDO	39
5.2	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	41
5.3	REDUÇÃO DA UMIDADE E DA CONCENTRAÇÃO DE MICRORGANISMOS PATOGENICOS.....	47
5.4	VIABILIDADE DA METODOLOGIA ADOTADA.....	51
5.4.1	<i>Custos de implantação do experimento</i>	51
5.4.2	<i>Custos associados à disposição do lodo</i>	51
5.4.3	<i>Alteração da rotina de operação da ETE Piaçu</i>	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1	PARÂMETROS FÍSICOS.....	57
6.1.1	<i>Umidade do lodo</i>	57
6.1.2	<i>Temperatura e Umidade do ar</i>	65
6.1.3	<i>Relação SV/ST</i>	73
6.2	MICRORGANISMOS PATOGENICOS.....	74
6.2.1	<i>Ovos viáveis de helmintos</i>	74
6.2.2	<i>Salmonella</i>	76
6.2.3	<i>Coliformes termotolerantes</i>	78
6.3	ANÁLISE PRELIMINAR DE CUSTOS PARA A METODOLOGIA ADOTADA.....	80
6.3.1	<i>Custos de implantação do experimento</i>	80
6.3.2	<i>Custos associados à disposição do lodo</i>	81
6.3.3	<i>Alteração da rotina de operação da ETE Piaçu</i>	86
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	89
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICES	99
	APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA DO AR	99
	APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS VOLÁTEIS.....	106
	APÊNDICE C - ALTERAÇÕES NO EXPERIMENTO	108

1 INTRODUÇÃO

Até o ano de 2013, o Brasil possuía um índice médio de tratamento de esgoto de 38,7%, já o Espírito Santo, no mesmo ano, possuía 31,06% (BRASIL, 2014). Contudo, com os investimentos do governo federal para aumento dos índices de esgotamento sanitário no país, através dos Programas de Aceleração do Crescimento, e com as perspectivas do Plano de Desenvolvimento do Espírito Santo prevê-se a universalização da coleta e tratamento de esgoto no Estado até o ano de 2030.

Com a ampliação do volume de esgoto coletado, buscam-se soluções de tratamento que demandam menor espaço para instalação, de baixo custo operacional e com boa eficiência de remoção de poluentes. Nessa perspectiva, os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) tornam-se uma alternativa viável para o tratamento dos esgotos, em especial para localidades de pequeno e médio porte.

Os reatores anaeróbios foram amplamente utilizados no Brasil para o tratamento de esgotos domésticos, em especial entre as décadas de 1960 a 1980, e devido às suas características operacionais e, nos últimos anos, tem adquirido uma nova relevância na área do saneamento ambiental tendo em vista a possibilidade de geração de energia renovável (ABBASI e ABBASI, 2012) devido à produção de biogás.

Contudo, como em todo sistema de digestão anaeróbia, além da formação de biogás, produto que lhe confere potencial energético, no processo de tratamento é gerado também o lodo biológico, ou simplesmente lodo.

O lodo possui uma elevada quantidade de água fazendo com que a disposição final adequada desse subproduto possa corresponder a mais de 40% dos custos relacionados ao tratamento do esgoto (TEBBUTT, 1998). Para estações de tratamento de esgoto (ETE) de pequeno porte situadas em localidades distantes dos aterros sanitários, a quantidade de água no lodo torna-se um fator ainda mais importante, pois há um acréscimo significativo na disposição final devido aos custos relativos ao transporte por longas distâncias. Além disso, por apresentar alta diversidade e concentração de organismos patogênicos e, portanto, oferecer risco à

saúde humana, dependendo do uso previsto para o lodo – utilização agrícola, por exemplo – é necessário um tratamento adequado.

Dessa forma, no intuito de reduzir os custos associados à disposição final adequada do lodo e de buscar a sustentabilidade no processo de tratamento do esgoto, torna-se necessária a pesquisa de soluções que permitam que os resíduos gerados em determinado processo possam ser utilizados como insumo para outro. Nessa concepção, a associação do biogás como fonte de calor para o tratamento do lodo, ambos gerados nos reatores UASB, é uma alternativa a ser explorada.

Assim, esse trabalho vem complementar as pesquisas já realizadas, no intuito de apresentar uma metodologia de utilização energética do biogás como fonte de calor para desidratar e higienizar o lodo de estações de pequeno porte, que seja técnica, ambiental e economicamente viável para as concessionárias de saneamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade da desidratação térmica, através da queima do biogás sobre o leito de secagem, para redução da umidade e da concentração de agentes patogênicos do lodo biológico produzido em ETEs de pequeno porte, tendo como estudo de caso a ETE Piaçu.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Avaliar e comparar a redução da umidade do lodo disposto nos leitos de secagem cobertos, com e sem a queima do biogás;
- b. Avaliar e comparar a redução da concentração agentes patogênicos lodo disposto nos leitos de secagem cobertos, com e sem a queima do biogás;
- c. Realizar uma análise preliminar de custos considerando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da metodologia adotada para desidratação térmica com o uso do biogás em ETEs de pequeno porte.

3 HIPÓTESES

A presente dissertação foi fundamentada nas seguintes hipóteses de trabalho:

1 - o calor proveniente da queima do biogás é capaz de reduzir o teor de umidade do lodo de reatores UASB de forma a reduzir os custos atuais de transporte e disposição em aterro sanitário.

2 - o calor proveniente da queima do biogás é capaz de reduzir a concentração de microrganismos patogênicos do lodo de reatores UASB de forma a atender aos padrões de utilização agrícola.

3 – a metodologia adotada para a utilização energética do biogás é técnica, ambiental e economicamente viável de forma a poder replicá-la a outras ETEs de pequeno porte.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tratamento do esgoto doméstico tem como finalidade reduzir a concentração de substâncias potenciais de causar impacto à saúde humana e ao meio ambiente. Contudo, conforme Jordão e Pessoa (2009), neste segundo milênio, a escolha da tipologia da ETE não se restringe apenas às exigências ambientais, de saúde pública, estéticas ou legais, passa ser igualmente importante considerar as exigências tecnológicas, exigências da economia e os anseios da comunidade.

Diante das tecnologias de tratamento existentes, as que se utiliza da digestão anaeróbia tem se destacado, pois associa o tratamento de resíduos orgânicos com a produção de energia renovável (LUSTE e LUOSTARINEN, 2010; LIU et al., 2012) e assim pode ser considerada a mais promissora fonte de energia do futuro (RAO et al., 2010). É exposto por Appels et al. (2011) que, tendo em vista a sua aplicabilidade em projetos de diversas escalas, a digestão anaeróbia oferece oportunidades para pequenas comunidades e áreas rurais onde a energia é limitada ou mesmo indisponível.

Dentre os sistemas de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico, os reatores anaeróbios de manta de lodo, normalmente chamados de UASB, se destacam como uma alternativa, pois apresentam os seguintes aspectos positivos: boa eficiência de remoção de matéria orgânica (em torno de 70%), podem ser projetados para o tratamento de baixas ou altas vazões, necessitam de uma área menor de implantação, baixo consumo de energia (apenas nas elevatórias de esgoto) e baixa produção de lodo, sendo o mesmo já estabilizado (CHERNICHARO et al., 1999; LATIF et al., 2011; CHONG et al., 2012).

Os reatores UASB foram amplamente utilizados no Brasil, em especial entre as décadas de 1960 a 1980, e devido aos seus aspectos positivos, nos últimos anos, tem adquirido uma nova relevância na área do saneamento ambiental tendo em vista a possibilidade de geração de energia renovável (ABBASI e ABBASI, 2012) devido à produção de biogás.

4.1 BIOGÁS: FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL

O biogás é uma mistura combustível de gases formada pela degradação da matéria orgânica por digestão anaeróbia (SALOMON e SILVA LORA, 2009) cujas propriedades e composição variam de acordo com o material afluente, sistema de digestão, temperatura, tempo de detenção, entre outros, sendo que a produção de metano depende das concentrações de proteínas, gorduras e carboidratos no substrato (SEADI et al, 2008). A Tabela 1 apresenta a média de composição do biogás encontrada em diversas literaturas específicas.

Tabela 1 - Composição do biogás em porcentagem do volume

Componente	Símbolo	Concentração (% V/V)
Metano	CH ₄	50 - 75
Dióxido de carbono	CO ₂	25 - 45
Vapor de água	H ₂ O	2 (20°) - 7 (40°C)
Oxigênio	O ₂	< 2
Nitrogênio	N ₂	< 2
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	< 1
Outros		< 1

Fonte: Cassini et al. (2003); Deublei e Steinhauser (2008); RAO et al. (2010), Appels et al. (2011) e Maghanaki et al. (2013).

O metano é o principal constituinte do biogás e o que lhe atribui a característica energética. Assim, dependendo de concentração de metano na mistura, maior ou menor será a quantidade de energia liberada na forma de calor por unidade de volume ou massa; quantidade essa determinada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biogás. Por exemplo, quando a proporção de metano é de 65%, o biogás apresenta um PCI de aproximadamente 5.500 kcal/Nm³, fazendo com que se tenha grande interesse no seu aproveitamento energético (ANDREOLLI et al, 2003). A Tabela 2 apresenta a variação do PCI para o biogás conforme a porcentagem de metano.

Tabela 2 - Poder calorífico do biogás, conforme composição do biogás.

Composição do biogás	Peso específico (kg/Nm ³)	PCI (kcal/kg)	PCI (kcal/Nm ³)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43	856,07
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52	3424,29
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98	5136,46
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14	5564,51
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01	6420,59
95% CH ₄ , 5% CO ₂	0,7768	10.469,60	8132,79
99% CH ₄ , 1% CO ₂	0,7268	11.661,02	8475,23

Fonte: Adaptado de Avellar (2001) apud Costa (2006).

Eller (2013) desenvolveu um trabalho na ETE Piaçu, mesma estação de tratamento utilizada nesta pesquisa, e caracterizou o biogás gerado em termos de metano e sulfeto de hidrogênio durante os meses de janeiro a junho de 2013. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do biogás gerado na ETE Piaçu

Valor	CH ₄ (% V/V)	H ₂ S (% V/V)
Média	77,56	0,002 (2078 ppm)
Desvio Padrão	4,71	0,002 (1564 ppm)
Mediana	76,96	0,002 (1596 ppm)
Mínimo	70,02	0,000 (131 ppm)
Máximo	82,45	0,004 (4010 ppm)

*n=12

Fonte: Adaptado de Eller (2013).

A partir da Tabela 3, verifica-se que o biogás produzido no reator UASB da ETE Piaçu apresenta uma concentração média de CH₄ de 77,56%, o que corresponde a um PCI próximo a 6.253,01 kcal/kg, comparando com a Tabela 2. Nota-se que essa porcentagem está acima da faixa reportada pela literatura especializada.

A Tabela 4 mostra, a título de comparação, o PCI de alguns combustíveis utilizados como fonte energética. Comparando o PCI dos combustíveis elencados na Tabela 3, o biogás da ETE Piaçu, em termos energéticos, se assemelha ao carvão vegetal e ao álcool anidro, considerando a proporção de metano de 75% da sua composição.

Tabela 4 - PCI de alguns combustíveis utilizados como fonte energética.

Combustível	Massa específica kg/Nm³	PCI kcal/kg
Bagaço de cana	n.d.	1.777
Lenha	390	2.530
Gás canalizado	n.d.	4.230
Álcool hidratado	809	5.950
Carvão vegetal	250	6.115
Álcool anidro	791	6.400
Carvão metalúrgico	n.d.	7.425
Gás natural	n.d.	8.554
Óleo combustível	999	9.547
Óleo Diesel	851	10.180
Petróleo	867	10.200
Querosene	787	10.396
Gasolina	738	10.556
GLP	552 (liq.) 2,29 (gás)	11.026

Fonte: Adaptado de Alves (2000).

Dessa forma, embora seja um subproduto do tratamento do esgoto, devido as suas características energéticas, o biogás é uma fonte promissora de energia renovável (RAO et al., 2010; APPELS et al., 2011; BUDZIANOWSKI, 2012; CAO e PAWŁOWSKI, 2012), podendo ser utilizado separadamente para a conversão em energia elétrica ou queimado para liberação de calor, ou simultaneamente para a produção de energia e calor (co-geração). Outra forma de aproveitamento é a alimentação de redes de gás natural e a conversão em combustível veicular (DEUBLEI e STEINHAUSER, 2008).

Como uma forma mais simples de aplicação, pode ser utilizado em fogões, lâmpadas e geladeira a gás, constituindo uma fonte de energia de fácil aquisição e a um custo reduzido principalmente para as comunidades rurais (ANDREOLLI et al., 2003).

Entretanto, conforme Costa (2006), dependendo da sua aplicação, o biogás pode ser utilizado nas condições em que é gerado ou pode necessitar de tratamentos específicos, como por exemplo, redução da umidade, redução da concentração de H₂S e/ou elevação de pressão. O Quadro 1 apresenta um resumo dos níveis de tratamento requeridos para os diferentes tipos de uso do biogás.

Quadro 1 - Resumo dos níveis de tratamento requeridos para os diferentes tipos de uso do biogás

Tipo de uso do biogás	Nível de tratamento			Outros requisitos
	Remoção de umidade	Remoção de H ₂ S	Remoção de CO ₂	
Combustão direta (queimadores abertos e fechados)	Tratamento parcial	Nenhum tratamento parcial (H ₂ S < 5 ppmv no caso de queimadores fechados**)	Nenhum tratamento	De-foaming (controle de espuma) Compressão * Temperatura ≥ 900°C ** Tempo de residência ≥ 0,3s** Hidrocarbonetos ≤ 150 mg/m ³ **
Uso direto para geração de calor (ex. combustível para caldeiras e aquecedores)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento completo	Nenhum tratamento	-
Cogeração de eletricidade e calor a partir de motores de combustão interna	Tratamento parcial a completo	Tratamento parcial completo ***	Nenhum a tratamento completo	-
Cogeração de eletricidade e calor a partir de turbinas e microturbinas	-	Turbina (H ₂ S < 10000 ppmv)*** Microturbina (H ₂ S < 50 ppmv)***	-	Pressão do combustível nas microturbinas: 3545 - 552 Kpa
Injeção na rede de gás natural	Tratamento completo (umidade < 70 - 80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 5mg/m ³)	Tratamento completo (CH ₄ ≥ 95%)	Compressão: 60 - 70 bar****
Motores a gás (ex.: combustível veicular)	Tratamento completo (umidade < 70 - 80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 1000 - 2000 mg/m ³)	Tratamento completo	Compressão: 200 bar Teor energético: 13-21 MJ/m ³

* Pode ser necessário se a pressão do biogás for muito baixa

** Requisitos da Norma Holandesa de Emissões (NER 3.5/90.1). Nos queimadores abertos não há como determinadas temperatura e tempo de residência.

*** Variável de acordo com a demanda dos fabricantes das tecnologias de conversão energética.

**** Variável dependendo da rede de gás natural.

Fonte: Lobato (2011).

Especificamente para o tratamento de esgoto, pesquisas demonstram o potencial de utilização do biogás produzido em ETEs para a geração de energia térmica e/ou elétrica (COSTA, 2006; PERCORA, 2006; ARTHUR et al., 2011; FRIJNS, HOFMAN e NEDERLOF, 2013; TAUSEEF, ABBASI e ABBASI, 2012). Contudo, Jordão e Pessoa (1995), através de estudo de viabilidade econômica e operacional, concluíram que a geração de energia elétrica a partir do biogás em países de clima quente é apenas conveniente para ETEs de grande porte.

Uma vez que o emprego do biogás para a produção de energia elétrica em ETEs de pequeno porte tem se mostrado inviável, um desafio que se apresenta é encontrar uma utilização para esse gás na própria ETE que seja técnica, ambiental e economicamente viável e que possa reduzir os custos associados à operação do sistema e atender à crescente demanda da sociedade por soluções mais sustentáveis.

4.2 LODO DE ESGOTO

Conforme Cassini et al (2003), no tratamento dos esgotos é produzida uma quantidade significativa de subprodutos sólidos, cujo o gerenciamento dos mesmos configura-se como a etapa mais complexa da rotina de operação de uma ETE. Entre esses subprodutos sólidos, o lodo, em razão da maior produção em massa e volume, é considerado o mais importante. Segundo Tebbutt (1998), devido à elevada quantidade de água presente no lodo, a disposição final adequada desse subproduto pode corresponder a mais de 40% dos custos do tratamento do esgoto.

A produção de lodo em uma ETE é dependente do tipo de tratamento adotado para a fase líquida, podendo, o lodo, ser classificado como primário, secundário, misto ou químico (EUROPEAN COMMISSION, 2001; VON SPERLING, 2005):

- lodo primário: composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto nos decantadores primários. Possui coloração acinzentada, é pegajoso, de odor ofensivo e facilmente fermentável.
- lodo secundário: gerado no processo biológico de tratamento devido ao crescimento da biomassa microbiana.
- lodo misto: ocorre quando o lodo primário e lodo secundário são enviados juntos para tratamento.
- químico: gerado quando há uma etapa físico-química no tratamento do esgoto com o intuito de polir o efluente.

O lodo secundário, também denominado de lodo biológico ou lodo excedente, é formado devido ao crescimento dos microrganismos responsáveis pela degradação ou estabilização da matéria orgânica que se agregam em flocos, gerando uma biomassa. Em virtude do contínuo aporte de matéria orgânica nos reatores biológicos, essa biomassa está em constante crescimento e, para manter o equilíbrio do meio, cerca da mesma massa de sólidos biológicos produzida deve ser retirada do sistema (CASSINI et al, 2003), constituindo um resíduo que deve ser gerenciado corretamente.

O lodo excedente de sistemas de tratamento de esgoto pode apresentar aspectos indesejáveis como instabilidade biológica, gerando maus odores, presença organismos patogênicos, constituindo risco à saúde humana, e alta umidade, de modo que seu volume produzido seja elevado (VAN HAADEN e ALEM SOBRINHO, 2006).

Conforme exposto por Fernandes e Souza (2001, p.29):

Em qualquer situação, quanto mais o lodo se assemelhar à matéria orgânica “fresca”, maior será seu potencial de putrefação e produção de odores desagradáveis. Também, maior será seu teor em microrganismos patogênicos, já que os esgotos domésticos contêm esses microrganismos em alta concentração. À medida que o lodo “fresco” passa por processos de biotransformação, seus componentes orgânicos mais facilmente biodegradáveis são transformados e o lodo ganha características de lodo “estabilizado”, apresentando odor menos ofensivo e menor concentração de microrganismos patogênicos.

4.2.1 *Características microbiológicas*

A origem da contaminação microbiológica do lodo é principalmente em razão do material fecal contido no esgoto, sendo que os quatro mais importantes organismos causadores de doenças humanas estão presentes: bactérias, vírus, protozoários e helmintos. Contudo, a quantidade de organismos patogênicos presentes nos lodos não é constante, variando conforme a saúde da população, a época (mês e ano) e o tipo de tratamento do esgoto adotado (FERNANDES e SOUZA, 2001; MALTA, 2001; US EPA, 2003; GODINHO, 2003).

Os microrganismos, ao serem lançados no esgoto, não estarão em seu meio de sobrevivência ideal, apresentando, portanto, uma tendência ao decaimento. Quando

na ETE, o próprio sistema de tratamento elimina boa parte dos patógenos presentes no esgoto, bem como reduz sua concentração na fase líquida através da migração para a fase sólida (lodo), devido ao peso específico mais alto de alguns microrganismos e ao poder de adsorção dos flocos de biomassa. Dessa forma, ocorre sedimentação dos patógenos junto ao lodo (MALTA, 2001) e como consequência, o lodo se torna um material com elevada concentração de microrganismos (LOZER, 2012).

O lodo possui uma numerosa quantidade de espécies de organismos patogênicos, e analisar cada espécie torna-se impraticável. Portanto, é necessário o uso de organismos indicadores que possibilitem representar a eficácia do tratamento adotado em relação à sobrevivência do grupo maior (USEPA, 2003). Dessa forma, um organismo indicador, ou substituto para um agente patogênico, deve estar presente no lodo bruto em grande número, ser um pouco mais resistente às condições adversas impostas pelos processos de tratamento do lodo do que o grupo maior, ser relativamente fácil de cultivar, identificar e confirmar (CARRINGTON, 2001). A Tabela 5 apresenta a variação da concentração típica de microrganismos no lodo de esgoto.

Tabela 5- Variação da concentração de microrganismos no lodo de esgoto.

MICROORGANISMOS	ESPÉCIE	CONCENTRAÇÃO (células/g)
Bactéria	<i>E. coli</i>	10^6
	<i>Salmonella</i>	$10^2 - 10^3$
Vírus	Enterovírus	$10^2 - 10^4$
Protozoário	<i>Giardia</i>	$10^2 - 10^3$
Helmintos	<i>Ascaris</i>	$10^2 - 10^3$
	<i>Toxacara</i>	$10 - 10^2$
	<i>Taenia</i>	5

Fonte: Carrington (2001)

No Brasil, a Resolução Conama nº 375 (BRASIL, 2006) adota como indicadores de sanidade para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETEs: coliformes termotolerantes, *Salmonella sp*, ovos viáveis de helmintos e vírus entéricos.

Lima et al. (2011) realizaram a caracterização microbiológica de lodos provenientes de diferentes tipos de tratamento de esgoto localizados no Estado do Espírito Santo,

cujos valores, especificamente para reatores UASB, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização microbiológica de lodo biológico bruto de reatores UASB

UASB	<i>Salmonella sp.</i> UFC/10g de ST	Coliformes Termotolerantes NMP/g de ST	Ovos Viáveis de Helmintos ovo/g de ST
1	9	6,40E+08	1
2	6	4,90E+08	2
3	24	4,60E+09	4
4	12	2,20E+08	6
5	8	6,00E+09	4
6	3	7,80E+02	0

Fonte: Adaptado de Lima et al. (2011).

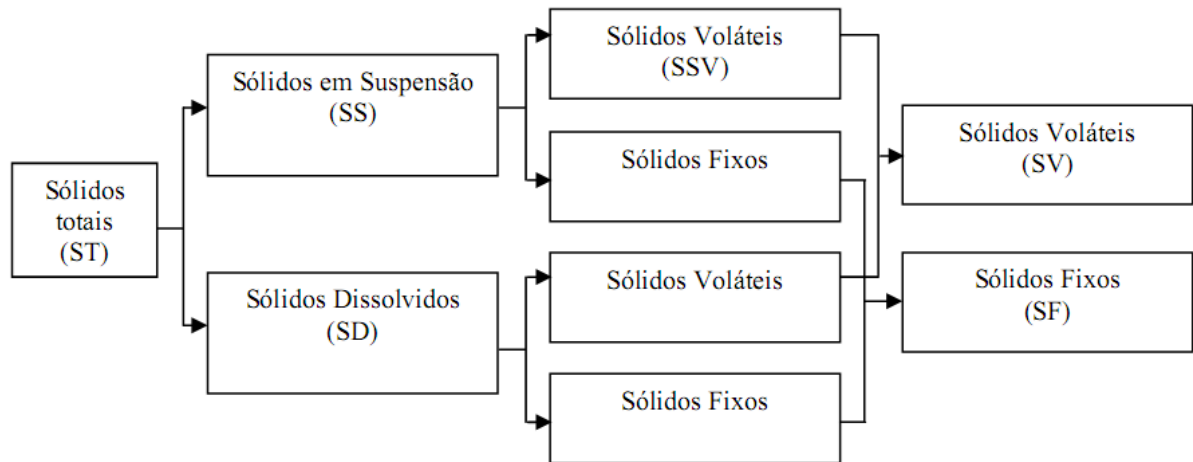
4.2.2 Características físicas

Conforme Comparini (2001), o teor de sólidos, ou em contraposição, a umidade, é o parâmetro físico mais relevante no que diz respeito à utilização e disposição do lodo, uma vez que quanto maior o teor de sólidos (e conseqüentemente menor umidade), menor o volume de lodo a ser armazenado, transportado e disposto.

Os sólidos do lodo podem ser classificados em relação ao tamanho das partículas como sólidos em suspensão ou dissolvidos, ou em relação à fração orgânica presente como sólidos fixos ou sólidos voláteis (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007). A classificação dos sólidos no lodo está representada na Figura 1.

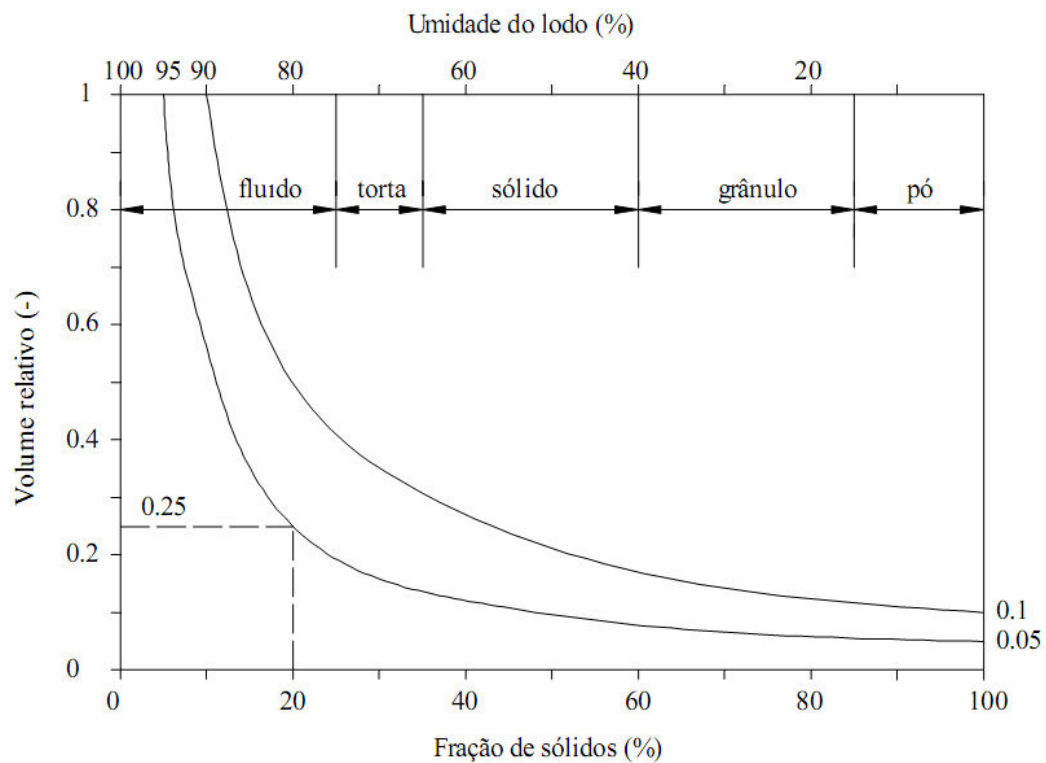
Os sólidos totais (ST), comumente, são expressos em percentagem de sólidos totais no volume amostrado, nos quais os lodos com consistência líquida possuem um teor de sólidos variando entre de 2 a 12%, enquanto o lodo “seco” apresenta conteúdo de sólidos totais superiores a 50% (USEPA, 1995). A Figura 2 apresenta a variação da porcentagem de sólidos totais e umidade em relação ao estado físico do lodo.

Figura 1 – Classificação dos sólidos no lodo de esgoto.



Fonte: Andreoli; von Sperling; Fernandes (2007).

Figura 2 - Variação da porcentagem de sólidos totais e umidade em relação ao estado físico do lodo.



Fonte: van Haandel e Lettinga (1994).

Os sólidos voláteis (SV), expresso em relação aos sólidos totais, fornece uma estimativa da quantidade de matéria orgânica no lodo e, portanto, torna-se importante parâmetro para determinar o potencial de geração de odor. Os lodos não

estabilizados possuem de 75 a 85% de sólidos voláteis, enquanto os lodos digeridos anaerobicamente, como os provenientes de reatores UASB, apresentam cerca de 50% (USEPA, 1995). A Tabela 7 mostra a distribuição dos sólidos por tipo de lodo bruto.

Tabela 7 - Distribuição dos sólidos por tipo de lodo

Tipo de lodo	pH	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (% de ST)	Tipo de ETE
Lodo primário	6,2	1	89	Lodos ativados convencional
Lodo biológico	7	1	87	Lodos ativados convencional
Lodo biológico	6,5	4	45	Reator UASB

Fonte: adaptado de Fernandes e Silva (1999)

Nota: A porcentagem de Sólidos Voláteis está expressa em relação aos Sólidos Totais

A relação SV/ST é um importante parâmetro para indicar o grau de estabilidade do lodo. Lodos com relação SV/ST podem ser considerados estáveis quando apresentarem valores menores que 0,7 (BRASIL, 2006). Lozer (2012) e Gonçalves et al. (2002) verificaram que a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais de lodos biológicos provenientes de reatores UASB é de 0,62 e 0,55 respectivamente.

4.3 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO

O tratamento do lodo é composto por diferentes etapas com objetivos específicos, nos quais ocorrem alterações das características físicas, químicas e biológicas do lodo. Portanto, é importante definir a priori a disposição final do resíduo a ser adotada, no intuito de planejar as etapas necessárias de tratamento do lodo para atender as questões técnicas, econômicas, ambientais e de saúde pública associada a cada tipo de disposição (LIMA, 2010). O Quadro 2 apresenta uma descrição sucinta das etapas de tratamento e da disposição final do lodo.

Quadro 2 - Etapas típicas e finalidades do tratamento do lodo de esgoto e alternativas de disposição final.

ETAPA	OBJETIVO	PROCESSO/ TÉCNICA
Adensamento	Reduzir o teor de umidade do lodo, conseqüentemente, seu volume, facilitando as etapas seguintes.	<ul style="list-style-type: none"> -Adensamento por gravidade <li style="padding-left: 20px;">- Flotação <li style="padding-left: 20px;">- Centrifugação - Filtro prensa de esteira
Estabilização	Remover matéria orgânica biodegradável (reduzir sólidos voláteis) no intuito atenuar os maus odores no tratamento e no manuseio do lodo.	<ul style="list-style-type: none"> - Digestão anaeróbia - Digestão aeróbia - Tratamento térmico - Estabilização química - Compostagem
Condicionamento	Preparar o lodo para a etapa do desaguamento (normalmente para processos mecânicos). Produtos químicos são utilizados (coagulantes, polieletrólitos) para melhorar a captura de sólidos e facilitar o desaguamento.	<ul style="list-style-type: none"> - Condicionamento químico - Condicionamento Térmico
Desaguamento	Reduzir ainda mais o volume com a redução de água livre, produzindo lodo com o comportamento próximo ao dos sólidos, facilitando o manuseio e diminuindo custos com transporte e destinação final. Pode ser processo natural ou mecânico.	<ul style="list-style-type: none"> - Leito de secagem - Lagoa de lodo - Filtro prensa - Centrifuga - Filtro a vácuo - Secagem térmica
Higienização	Reduzir o nível de patógenos a valores aceitáveis para determinado uso ou disposição final.	<ul style="list-style-type: none"> - Adição de cal (calagem) - Tratamento térmico - Compostagem - Solarização, etc.
Disposição final	Dispor adequadamente o resíduo a fim de minimizar impactos no meio ambiente e na saúde da população. Etapa final do tratamento.	<ul style="list-style-type: none"> - Utilização agrícola - Recuperação de áreas degradadas - Outros usos (fabricação de lajotas, combustível, etc.) - Aterro sanitário

Fonte: Adaptado de European Commission (2001) e Lima (2010).

O lodo proveniente de reatores UASB, já se encontra adensado (GONÇALVES et al., 2002) e apresenta estabilidade biológica, por ficar de 2 a 3 meses, em média, no reator (FERNANDES E SOUZA, 2001). Assim, de forma a minimizar os impactos na saúde pública e para reduzir os custos associados à disposição final adequada, é necessário apenas das etapas de desaguamento e de higienização do lodo.

No Brasil, o uso e a disposição do lodo são regulamentados pela Resolução nº 375 de 2006 do Conama, na qual define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências (BRASIL, 2006). Ou seja, essa normativa só define critérios para a aplicação do lodo de esgoto na agricultura, demais aplicações não são acobertadas.

Na referida Resolução, artigo 11 §1ª, é definido que após cinco anos a partir da data da publicação desta resolução, ou seja, a partir de 2011, somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto na agricultura classificado como Classe A, exceto que sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso de Classe B.

Uma vez que ainda não foram propostos novos critérios ou limites para a aplicação do lodo de esgoto na agricultura, atualmente deve ser utilizado como padrão os limites estabelecidos para o lodo a Classe A desta Resolução. A Tabela 8 apresenta os limites estabelecidos para agentes patogênicos, de forma que o lodo possa ser enquadrado como Classe A.

Tabela 8 - Limites estabelecidos para agentes patogênicos referentes ao lodo Classe A.

Agente patogênico	Padrão Classe A
Coliformes termotolerantes	< 10 ³ NMP/ g de ST
Ovos viáveis de helmintos	< 0,25 ovo/ g de ST
<i>Salmonella sp.</i>	Ausência em 10g de ST
Virus entéricos	< 0,25 UFP ou UFF/ g de ST

Fonte: BRASIL (2006).

Nota: ST: Sólidos Totais, NMP: Número Mais Provável, UFF: Unidade Formadora de Foco, UFP: Unidade Formadora de Placa.

Outro padrão estabelecido pela Resolução Conama nº 375/2006 é a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais, que deve ser inferior a 0,70, ou seja, $SV/ST < 0,70$.

4.3.1 *Desaguamento – Leitos de secagem*

O teor de umidade no lodo proveniente de reatores UASB está na faixa de 94 a 97% do volume total. Assim, é importante alcançar a máxima redução do volume de água no lodo, para dificultar o crescimento de organismos patogênicos e para facilitar o gerenciamento do resíduo no que diz respeito ao manuseio, redução de custos de transporte e de disposição final (PEDROZA et al, 2006).

Conforme Andreoli et al. (2003), a remoção de água do lodo impacta os custos associados à disposição final de tal forma que, quando um lodo com concentração inicial de sólidos totais passa de 2% para 20% (ou de 98% de umidade para 80% de umidade), há uma redução do seu volume em torno de 90%.

O desaguamento ou desidratação do lodo é um processo físico através do qual o teor de umidade é reduzido, podendo ser realizada de forma mecanizada ou natural. A secagem mecanizada é normalmente utilizada em sistemas onde há geração significativa de lodo, ou seja, em estações de médio e grande porte, na qual podem ser empregados: filtro prensa de esteira, centrífuga, filtro prensa de placas e prensa parafuso (CORREIA, 2009). Já a secagem natural, utilizada principalmente em sistema de pequeno porte, pode ser realizada através de leitos de secagem e lagoas de lodo.

Os leitos de secagem é a técnica mais simples para desaguamento do lodo de esgoto, sendo usada principalmente para sistemas de tratamento de pequeno porte, onde há áreas disponíveis para implantação e o clima local, na maior parte do ano, é favorável para a operação dos leitos (EUROPEAN COMMISSION, 2001). Em relação aos outros processos de secagem, os leitos apresentam, conforme vantagens e desvantagens, conforme Quadro 3.

Os leitos de secagem são estruturas retangulares constituídos, conforme Melo (2006), por camadas de tijolo, areia e brita, em que o fundo do terreno (natural ou de

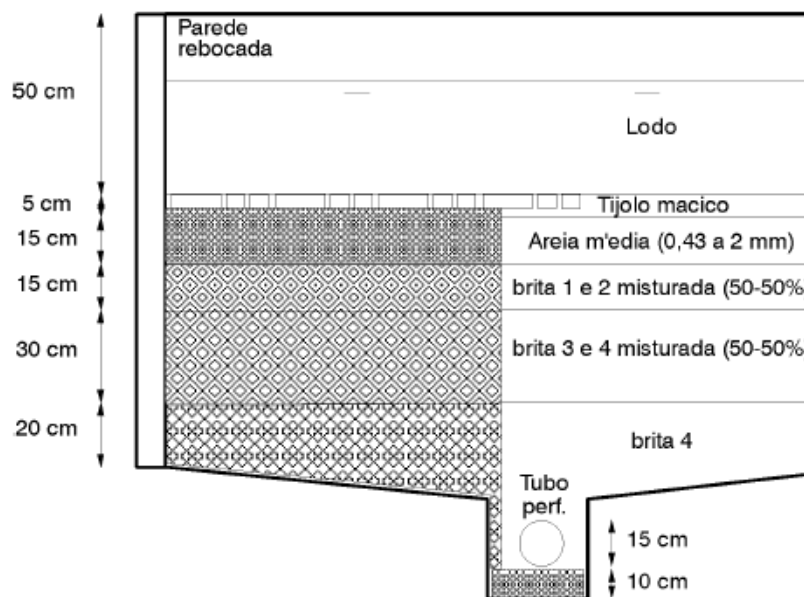
concreto) apresenta pequena inclinação para direcionar o líquido percolado para a tubulação de drenagem. A Figura 3 apresenta a seção transversal de um leito de secagem.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem para desidratar lodo de esgoto

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Necessidade de baixo valor de investimento	Necessidade de área para implantação e operação
Não necessita de operador com alto nível de qualificação devido à simplicidade operacional e ao baixo nível de atenção requerido	Influência significativa do clima no desempenho do processo de secagem.
Torta com alto teor de sólidos	A retirada da torta seca é um processo lento.
O desempenho é pouco afetado pelas variações nas características do lodo	Necessidade de estabilização prévia do lodo para minimizar o risco de geração de maus odores.
Baixo ou inexistente consumo de energia elétrica e produto químico	Risco de contaminação do lençol freático caso o fundo dos leitos e o sistema de drenagem não sejam bem executados.

Fonte: Adaptado de Gonçalves et al. (2001) e Gonçalves, Ludovice e von Sperling (2001).

Figura 3 – Aspectos da seção transversal de um leito de secagem



Fonte: Melo (2006).

Após a descarga sobre o leito, o lodo poderá ser removido em um período de 12 a 20 dias, com a umidade em torno de 60 a 70%. Pesquisas realizadas em uma ETE no Rio de Janeiro obtiveram uma redução de umidade de 95 para 50% em 20 dias. Já no Recife, o lodo disposto atingiu umidades de 60 a 70% em 15 dias (JORDAO e PESSOA, 2005).

A desidratação do lodo, nos leito de secagem, ocorre devido a dois fatores: a evaporação e a percolação, sendo este último mecanismo responsável pela maior parte da remoção da água (PEDROZZA et al, 2006). Durante as primeiras 72 horas, a percolação é a responsável pela eliminação da grande maioria do líquido, em seguida a perda de líquido ocorre basicamente pela evaporação superficial (GONÇALVES et al., 2001). Dessa forma, as condições climáticas como radiação solar e intensidade dos ventos tornam-se fundamentais para uma boa eficiência de remoção de umidade.

Portanto, uma vez que o sistema natural de desaguamento por meio de leitos de secagem é influenciado pelos processos físicos de evaporação e percolação, intervenções podem ser realizadas no intuito de maximizar a velocidade da desidratação, como: cobertura do leito, revolvimento do resíduo, movimentação de ar, elevação da temperatura e renovação do ar, injeção de calor no sistema, etc (GONÇALVES et al., 2001).

Em muitos países, a utilização do calor para a secagem e higienização do lodo configura-se como uma tecnologia consolidada e com resultados satisfatórios (ANDREOLI et al. 2003). Contudo, nesses locais, utilizam-se soluções tecnológicas de elevado custo econômico devido, principalmente, à alta demanda de energia dessas soluções (BUX et al., 2002; KALDERIS, AIVALIOTI e GIDARAKOS, 2010; MA et al., 2012).

Tendo em vista que a escolha de leitos de secagem, entre as técnicas de desaguamento existente, tem como critério de seleção primordial o baixo valor de investimento, a adoção de metodologias adaptativas no leito que promovam aumento no custo de operação da ETE é incoerente. Nesse contexto, destaca-se a utilização do biogás como alternativa para fornecer energia térmica para secagem do lodo.

4.3.2 Higienização – Tratamento térmico

A higienização do lodo tem por objetivo promover a inativação e/ou redução dos organismos patogênicos, de forma que possa ser utilizado para fins mais adequados do que o simples aterramento ou incineração.

O processo de higienização não corresponde a uma “desinfecção, pois nem todos os organismos presentes no lodo serão eliminados/inativados. Busca-se, através da higienização, reduzir a concentração de patógenos a níveis satisfatórios que não incorram em riscos à saúde da população, conforme as exigências sanitárias de cada utilização (PINTO, 2001).

Vírus, bactérias, parasitas e fungos, apresentam resistências diferentes aos fatores ambientais como temperatura, umidade, e outros parâmetros físicos e químicos (ROMDHANA et al., 2009) e, portanto, necessitam de um equilíbrio propício entre as condições ambientais para seu desenvolvimento.

Segundo Carrington (2001), o principal fator para a redução da concentração de organismos patogênicos durante o tratamento do lodo é a temperatura. Assim sendo a temperatura um fator, que se alterado, pode eliminar os organismos patogênicos, o tratamento térmico torna-se uma alternativa para a higienização do lodo.

O processo de redução de patógenos através da temperatura é dependente do tempo de exposição do lodo à determinada temperatura (PINTO, 2001). Segundo Ferreira (2001), a inativação térmica dos diversos patógenos segue normalmente o modelo exponencial, de forma que quanto maior a temperatura, menor será o tempo necessário de exposição para destruição das estruturas do patógeno, ou vice-versa. A Tabela 9 apresenta a temperatura e o tempo de exposição necessário para a destruição de alguns patógenos encontrados no lodo.

Tabela 9 - Temperatura x tempo de exposição necessário para inativação de alguns microrganismos patogênicos

Organismo	Tempo (min.)	Temperatura (°C)
<i>Salmonella typhosa</i>	Instantâneo	55 a 60
	30	46
<i>Salmonella sp.</i>	15 a 30	60
	60	55
<i>Escherichia coli</i>	5	70
	15 a 20	60
	60	55
<i>Entamoeba histolytica</i> (cistos)	Instantâneo	68
<i>Taenia saginata</i>	5	71
<i>Trichinella spiralis</i> (larvas)	Instantâneo	62 a 72
	60	50
<i>Streptococcus fecalis</i>	60	70
Coliformes fecais	60	70
<i>Ascaris spp.</i> (ovos)	60	55
	7	60

Fonte: Adaptado de Ilhenfeld (1999).

4.4 PESQUISAS DESENVOLVIDAS: QUEIMA DO BIOGÁS X LODO DE ESGOTO

Este tópico tem o intuito de resgatar pesquisas já desenvolvidas a partir do uso do biogás gerado em reatores UASB como fonte de calor para promover a secagem e a redução de microrganismos patogênicos do lodo de esgoto de forma a subsidiar a metodologia a ser adotada neste trabalho.

O Quadro 4 apresenta um resumo dessas pesquisas com utilização de biogás para redução da umidade e inativação de patógenos de lodo de esgoto doméstico, elucidando a metodologia adotada e o objetivo do estudo.

Quadro 4 - Pesquisa desenvolvidas com utilização de biogás para redução da umidade e inativação de patógenos de lodo de esgoto doméstico.

Autor (es)	Metodologia	Objetivo do estudo
Mendonça (1999)	Cálculos teóricos de transferência de calor	Elevação da temperatura do lodo
Mendonça (1999)	Protótipos de leitos de secagem inseridos em estufas de secagem laboratorial	Redução da umidade do lodo
Ferreira (2001)	Leitos de secagem cobertos com estufas agrícolas e com queima do biogás no interior das estufas	Redução da umidade do lodo
Borges (2009)	Cálculos teóricos de transferência de calor	Elevação da temperatura do lodo
Lobato et al. (2011)	Protótipo de secador térmico do tipo rotativo	Inativação de ovos viáveis de helmintos
Posetti et al. (2012)	Protótipo de leito de secagem com base para suporte do lodo aquecida pela circulação de água quente.	Inativação de ovos viáveis de helmintos e remoção (ausência) de salmonellas.

Fonte: Produção própria.

Mendonça (1999) comprovou, através de cálculos teóricos, que é viável utilizar o biogás gerado em UASB para redução da umidade do lodo excedente desse reator. Os resultados mostraram que é possível elevar a temperatura a 49°C, para lodo com teor de umidade de 99%; em 77°C, para lodo com teor de umidade de 98%; e em 100°C, para lodo com teor de umidade igual ou inferior a 97%. Porém, conforme considerações apontadas no estudo, as perdas no sistema de queima e distribuição do calor no leito que ocorrem em uma instalação real não foram contabilizadas, o que indica que a temperatura final do lodo poderia ser menor.

No intuito de verificar experimentalmente a viabilidade teórica encontrada, Mendonça (1999) utilizou protótipos de leitos de secagem com descarga de lodo a uma altura de 14 cm, comparando os seguintes tratamentos: protótipos postos no interior de uma estufa laboratorial a 50°, para simular o calor da queima do biogás, e protótipos postos no ambiente externo com e sem cobertura. Os resultados demonstraram que houve redução significativa da umidade no tratamento com estufa e foi enfatizada a importância da cobertura de leitos de secagem para promover a desidratação do lodo, uma vez que ocorreu precipitação no período do experimento. Alguns resultados da pesquisa estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do monitoramento dos parâmetros umidade, sólidos totais e sólidos voláteis

Tratamento	Tempo após a descarga	Umidade (%)	ST (g/kg)	SV (g/kg)
Lodo Bruto	-	97,2	28	17
Protótipo na estufa laboratorial	1 dia	78,2	218	92
	5 dias	6,3	937	557
	10 dias	4,9	951	542
Protótipo no ambiente coberto	5 dias	79,4	206	118
	15 dias	70,4	296	170
	25 dias	65,1	349	195
Protótipo no ambiente descoberto	5 dias	75,5	245	142
	15 dias	71,6	284	164
	25 dias	71,5	285	155

Fonte: Adaptado de Mendonça (1999).

Borges (2009), considerando as perdas no processo de aquecimento (cerca de 60%), também mostrou a viabilidade teórica de utilização do calor gerado pela queima do biogás para aquecer o lodo a 75°C. A comprovação foi realizada através do balanço de energia térmica, na qual a demanda teórica necessária para aquecer o lodo a 75°C foi de 14.045 kcal e a energia teoricamente produzida pela queima do biogás foi de 15.195 kcal.

Contudo, um inconveniente da utilização de calor para a secagem lodo, é que durante o processo de aquecimento há o estabelecimento de uma crosta superficial que se forma inicialmente pelas laterais e parte superficial da massa de lodo e se propaga gradualmente em direção ao centro. Essa crosta se comporta como uma barreira à transferência de calor para a massa de lodo e à evaporação da água (TAO, PENG e LEE, 2006) alterando a cinética de secagem, uma vez que reduz a taxa de remoção de água do lodo (FONT, GOMEZ-RICO e FULLANA, 2011).

Um estudo desenvolvido por Ferreira (2001) utilizou leitos de secagem com queima do biogás no interior de estufa agrícola, com altura de aplicação de lodo líquido nos leitos variando entre 30 a 36 cm. As conclusões indicaram que houve estratificação nas amostras de lodo submetidas a esse processo de tratamento, pois a camada superior e inferior apresentaram um gradiente de umidade diferente, estando as

partes mais profundas sempre mais úmidas, verificando assim, a interferência da camada superficial na transferência de calor para toda a massa. Contudo, mesmo com essa estratificação da umidade, foi demonstrado o aumento da concentração de sólidos ao longo do tratamento. A Tabela 11 apresenta as umidades iniciais e finais (após 28 dias da descarga) para três tratamentos aplicados obtidos apenas na 2ª descarga do lodo (das três realizadas), tendo em vista que, conforme a própria autora, esta descarga foi a que apresentou as melhores condições operacionais do sistema de biogás. Os três tratamentos utilizados na pesquisa foram: leito descoberto (testemunha), leito coberto com estufa plástica (Estufa) e leito coberto com estufa plástica com e queima do biogás (Estufa + biogás).

Tabela 11 - Resultados de umidade (%) na 2ª descarga comparando três tratamentos em função do tempo de secagem

	Testemunha	Estufa	Estufa + biogás
Inicial (dia da descarga)	96,3	99,94	99,88
Final (28 dias após a descarga)	59,55	45,69	15,56

Fonte: Adaptado de Ferreira (2001).

Lobato et al (2011) avaliaram a secagem térmica do lodo a partir do aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB, através de um protótipo de secador térmico do tipo rotativo na qual a transferência de calor era realizada através do contato direto do lodo com o calor proveniente dos gases do escapamento do motor de combustão interna. Os resultados mostraram que após 1,5 horas de exposição do lodo à temperatura máxima de 64°C, os ovos viáveis já não foram recuperados. Foram realizadas amostras nos intervalos de 1,5h; 3h; 4,5h e 5h, e em todos os tempos a eficiência de inativação foi praticamente 100%.

Posetti et al (2012) avaliaram a efetividade da inativação de patógenos através do aumento da temperatura da base suporte do lodo pela circulação de água aquecida com a queima do biogás. Utilizando um camada de lodo de 12 cm de espessura verificaram que no instante de tempo igual a 3,5 dias as temperaturas do lodo variaram entre 54 e 66 °C, promovendo uma redução significativa do número de

ovos viáveis de helmintos (de 211 para menor que 0,1 ovo/g de ST) e remoção (ausência) de *Salmonella sp.*

Diante do apresentado, embora existam pesquisas que avaliem a inativação de microrganismos patogênicos e redução da umidade através da utilização do calor proveniente da queima biogás, não se observa aplicação efetiva dessas pesquisas nas companhias de saneamento brasileiras.

Uma vez que em ETEs de pequeno porte, normalmente, o processo de desaguamento do lodo é realizado através de leitos de secagem, devido ao baixo valor de investimento e operação, é essencial que, na utilização do calor para a secagem e higienização do lodo, seja possível o reaproveitamento da estrutura existente, a fim de não aumentar os custos da ETE. Pois, caso contrário, seria incoerente.

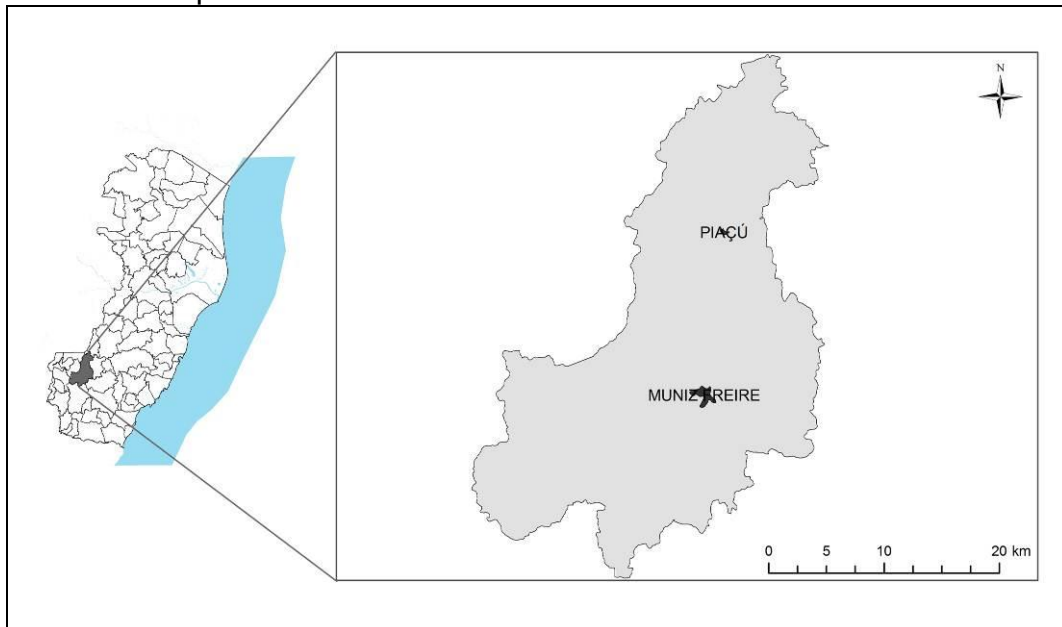
Dessa forma, torna-se necessário ratificar uma metodologia de utilização energética do biogás, principalmente, em estações de pequeno porte, que seja técnica, ambiental e economicamente viável, de forma a reduzir os custos associados à operação do sistema e atendo à crescente demanda da sociedade por soluções mais sustentáveis.

5 METODOLOGIA

5.1 LOCAL DO ESTUDO

O experimento que subsidiou essa dissertação foi instalado na ETE Piaçu, localizada no distrito de Piaçu, município de Muniz Freire/ES. A Figura 4 apresenta a localização do distrito de Piaçu em relação à sede do município de Muniz Freire e ao estado do Espírito Santo.

Figura 4 - Localização do distrito de Piaçu, município de Muniz Freire, estado do Espírito Santo.



Fonte: Produção própria.

O sistema de esgotamento sanitário do distrito de Piaçu está sob concessão da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), sendo a ETE projetada para atender uma população de 2000 habitantes, tratar uma vazão média de esgoto de 4,0 l/s e atingir uma eficiência de remoção de matéria orgânica superior a 90% (SANEVIX, 2011).

A ETE Piaçu é composta por tratamento preliminar (gradeamento e caixa de areia) e tratamento secundário (reator UASB seguido por biofiltro aerado submerso) e dois leitos de secagem para descarte do excesso de lodo produzido no reator UASB. A Figura 5 e 6 apresentam a ETE Piaçu com os dois leitos de secagem antes da

montagem do experimento. Verifica-se que nos leitos havia um telhado de fibra de vidro com a finalidade de proteger o lodo da chuva.

Figura 5 – Vista dos leitos de secagem na ETE Piaçu antes da montagem do experimento.



Fonte: Foto do autor.

Figura 6 – Vista do leito de secagem (Leito 2) na ETE Piaçu.



Fonte: Foto do autor.

A operação da ETE Piaçu foi iniciada em outubro de 2011 e conforme relatório interno da CESAN, em outubro de 2014 o sistema de esgotamento sanitário operava

com uma vazão média de esgoto de 3,0 l/s. Como rotina operacional adotada pela CESAN nessa ETE, tem-se a descarga do lodo realizada aproximadamente de 20 em 20 dias a uma altura no leito de secagem variando de 15 a 20 centímetros. Após os 20 dias de secagem o lodo é retirado do leito, estocado em caçambas de 5 m³ e posteriormente transportado e disposto em um aterro sanitário localizado no município de Aracruz/ES, a 253 km de distância da ETE Piaçu. O lodo é disposto nessa cidade, pois no estado do Espírito Santo ainda há poucos aterros licenciados e com estruturas necessárias para participarem de licitações públicas.

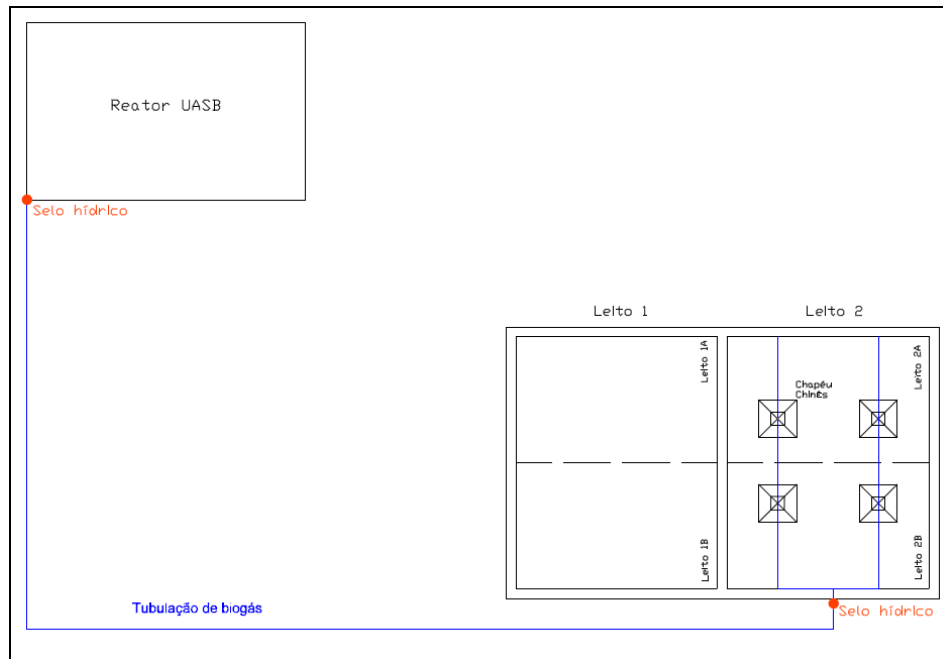
5.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Dentre as pesquisas descritas na revisão bibliográfica, considera-se que uma alternativa para a utilização do biogás, como fonte de calor para tratamento do lodo proveniente de ETEs de pequeno porte, seja a combinação de duas metodologias apresentadas: Mendonça (1999) e Ferreira (2001). Ambas consideraram a utilização de leitos de secagem nas pesquisas, sejam como protótipo ou em escala real.

Assim, a partir da combinação dessas duas pesquisas foi executado o seguinte experimento: aplicação de lodo sobre o leito de secagem a uma altura de 15 cm, próximo ao que foi estudado por Mendonça (1999), com queima do biogás sobre leito de secagem coberto com estufas agrícolas, de acordo com Ferreira (2001). A descarga de 15 cm de altura no leito não impactaria a rotina operacional da ETE, uma vez que já se utiliza uma descarga próxima a esse valor.

O biogás produzido no reator UASB da ETE Piaçu foi canalizado até o Leito 2, passando por dois selos hídricos (sistema corta-chamas), seguindo para o sistema de queima, conforme ilustrado na Figura 7. A condução do biogás até o segundo selo hídrico foi realizada através de tubulação de poliuretano com diâmetro de $\frac{1}{2}$ ", já na parte interna das estufas, a tubulação utilizada foi de aço galvanizado com diâmetro interno de $\frac{3}{4}$ ". A título de comparação de dados, conforme se visualiza na Figura 7, não houve queima de biogás no Leito 1.

Figura 7 – Croqui de ilustração do experimento.



Fonte: Produção própria.

Foram postos anteparos (chapéu chinês) sobre os bicos queimadores com a finalidade de dissipar o calor, conforme sugerido por Ferreira (2001). O sistema de queima foi desenvolvido através de parceria com a empresa SANEVIX Engenharia, sendo o chapéu chinês fabricados em aço inox e uma ampliação móvel do chapéu em alumínio (vide Apêndice C). A Figura 8 mostra o chapéu chinês em aço inox e a ampliação móvel, em alumínio.

Figura 8 - Queimadores com ampliação móvel em alumínio.



Fonte: Foto do autor.

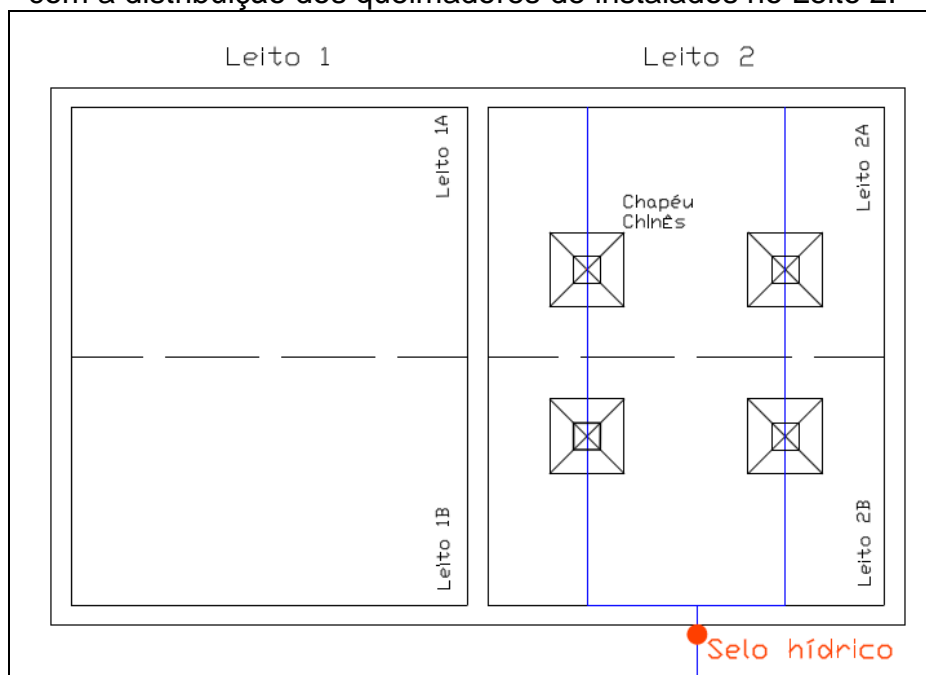
Inicialmente, propôs-se a divisão dos dois leitos de secagem existentes através de anteparos móveis que seriam suspensos no momento da descarga e, em seguida, abaixados para proporcionar a divisão dos leitos (sistema de comportas), totalizando quatro leitos para coleta de amostras, a saber:

Leito 1 (sem queima do biogás) dividido em: Leito 1 A e Leito 1 B

Leito 2 (com queima do biogás) dividido em: Leito 2 A e Leito 2 B

Contudo, o posicionamento inicial previsto para tubulação de biogás e dos queimadores precisou ser alterado de forma a se adequar à localização da fonte de energia para o acionamento automático dos queimadores. Assim, a divisão dos leitos ocorreu de forma imaginária (conforme Figura 9), mas as coletas das amostras foram realizadas como se houvesse a divisória.

Figura 9 - Divisão dos Leitos de secagem existentes na ETE Piaçu com a distribuição dos queimadores de instalados no Leito 2.



Fonte: Produção própria.

Para reter o calor proveniente da queima do biogás, potencializar o aumento de temperatura interna e minimizar a influência da precipitação, os leitos de secagem foram cobertos com estufas agrícolas fabricadas especificamente para a pesquisa. As estufas são móveis (deslizam por sobre os leitos de secagem) e possuem

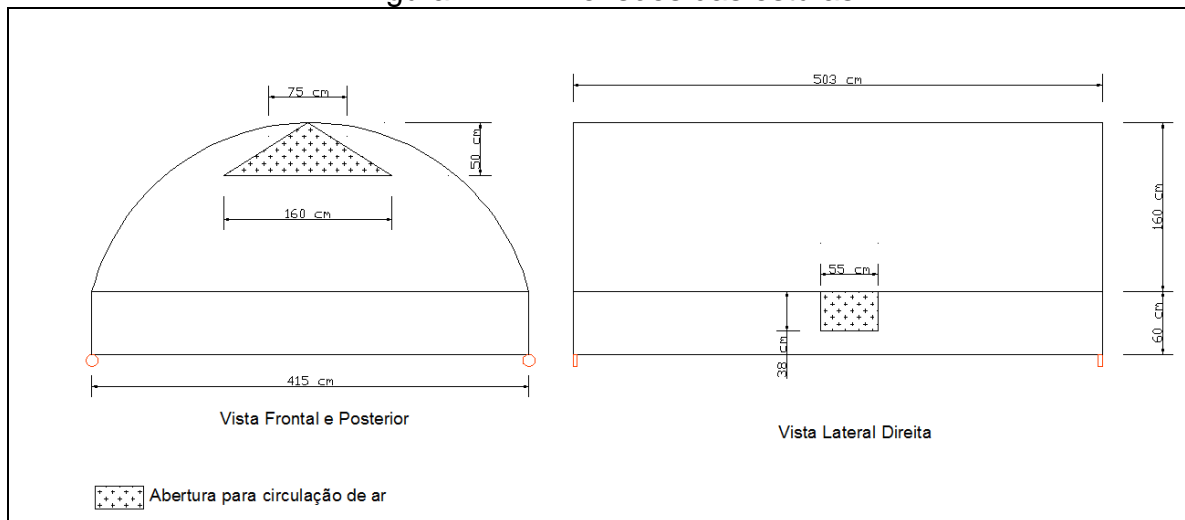
aberturas superiores e inferiores para promover a circulação do ar interno. Foram confeccionadas duas estufas: uma para os leitos 1 A e 1 B e outra para os leitos 2 A e 2 B, conforme Figuras 10 e 11 .

Figura 10 – Vista das estufas para reter o calor proveniente da queima do biogás.



Fonte: Foto do autor.

Figura 11 - Dimensões das estufas



Fonte: Produção própria.

A queima do biogás foi realizada entre as 08:00 da manhã e as 17:00 horas da tarde, de segunda-feira a sexta-feira, e de 08:00 às 12:00, aos sábados. A queima não foi realizada 24 horas por dia, pois contemplou apenas o horário de trabalho do operador da ETE Piaçu. As Figuras 12 e 13 apresentam o experimento instalado.

Conforme já descrito, a descarga do lodo foi realizada uma vez ao mês a uma altura de 15 cm, tendo em vista os resultados satisfatórios apresentados por Mendonça (1999) aplicando uma descarga de 14 cm e para não alterar a rotina de operação da ETE Piaçu.

Figura 12 - Vista interna da estufa referente ao Leito 2 após a descarga do lodo líquido de 15 cm.



Fonte: Produção própria.

Figura 13 - Vista externa da estufa referente ao Leito 2 após a descarga do lodo líquido de 15 cm.



Fonte: Produção própria.

Para obter os dados para a pesquisa, foram realizadas 4 (quatro) descargas, uma por mês, entre os meses de junho a setembro de 2014, ou seja quatro repetições. Esses meses foram selecionados no intuito de a pesquisa ocorrer na pior situação de produção de biogás, uma vez que abrange um período com temperatura anual ambiente mais frio. As descargas foram realizadas na primeira segunda-feira de cada mês e o lodo foi retirado do leito de secagem no 21º dias após a descarga.

Uma vez que no decorrer do processo de desaguamento o lodo agrega-se em torrões e forma-se uma crosta que dificulta a transferência do calor (TAO, PENG e LEE, 2006; FONT, GOMEZ-RICO e FULLANA, 2011), segundo essa indicação, adotou-se um procedimento para quebrar esses torrões e para revolver o lodo no próprio leito de secagem. A quebra dos torrões foi realizada a partir de um rolo compressor desenvolvido para a pesquisa a partir de tubo de PVC (policloreto de vinil) de 150 mm de diâmetro e 60 cm de comprimento preenchido com cimento, conforme Figura 14.

Figura 14 - Compressão do lodo seco, com o rolo compressor utilizado na pesquisa, para quebrar os torrões.



Fonte: Produção própria.

A compressão e o revolvimento foram realizados na quarta-feira e na sexta-feira da terceira semana, contadas a partir da descarga do lodo líquido. Para essa operação é necessário remover o ampliador do chapéu japonês. O revolvimento foi realizado com uma vassoura metálica para jardim. O Quadro 5 apresenta a rotina operacional mensal de descarga, compressão, revolvimento e retirada do lodo realizados ao

longo das quatro repetições. Importante destacar que a rotina de compressão e revolvimento ocorreu na terceira semana após a descarga, pois a coleta de dados para a pesquisa ocorreu no período do inverno. Caso a coleta ocorresse no verão, essa rotina poderia ser alterada, dependendo da umidade do lodo.

Quadro 5 - Rotina de descarga, compressão (C), revolvimento (R) e retirada do lodo realizada nas quatro repetições (junho a setembro).

SEMANA	DIA DA SEMANA						
	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
1ª		Descarga do lodo					
2ª							
3ª				C/R		C/R	
4ª		Retirada do lodo	Período de espera para a próxima descarga				

Fonte: Produção própria.

Os tópicos 5.3 e 5.4 descrevem a metodologia adotada para atingir aos objetivos específicos.

5.3 REDUÇÃO DA UMIDADE E DA CONCENTRAÇÃO DE MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS

Para atender aos objetivos específicos de avaliação da redução da umidade e da concentração de microrganismos patogênicos do lodo produzido pelo reator UASB, ao longo do processo de desidratação térmica, foram realizadas coletas e análises laboratoriais durante as quatro repetições, nos meses de junho a setembro de 2014.

As análises realizadas abrangeram parâmetros físicos (umidade, sólidos totais, sólidos voláteis) e parâmetros microbiológicos (Coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella sp*).

Para cada leito (Leitos 1A, 1B, 2A e 2B) foi obtida uma amostra representativa, conforme preconiza a ABNT NBR 10007: o leito foi fracionado em seis quadrículas imaginárias, retirou-se uma porção de lodo de cada quadrícula e misturou-as em um balde até obter uma mistura homogênea. Da mistura de lodo no balde, retirou-se a

amostra representativa para enviar ao laboratório. As amostras representativas foram enviadas ao laboratório da CESAN, para análise dos parâmetros físicos, e à Tommasi Analítica (empresa vencedora da licitação), para análise dos parâmetros microbiológicos. O Quadro 6 apresenta a metodologia adotada para a análise de cada parâmetro.

Quadro 6 - Métodos de análises de cada parâmetro.

Análise	Método
Umidade	APHA, AWWA, WEF (2012)
Sólidos Totais	APHA, AWWA, WEF (2012)
Sólidos Voláteis	APHA, AWWA, WEF (2012)
Coliformes Termotolerantes	APHA, AWWA, WEF (2012)
Ovos viáveis de helmintos	MEYER,K.B.; MILLER,K.D.; KANESHIRO (1978)
Salmonella	CETESB (1993)

Fonte: Produção própria.

De forma a representar a evolução da desidratação do lodo nos 4 (quatro) leitos de secagem (L1A, L1B, L2A e L2B), para cada leito foram coletas as amostras representativas no momento da descarga do lodo líquido nos leitos e nos dias posteriores à descarga (4^o, 11^o, 14^o e 21^o), conforme demonstra o Quadro 6.

Quadro 7 - Distribuição mensal para os dias das coletas para os parâmetros físicos (F) e microbiológicos (M).

SEMANA	DIA DA SEMANA						
	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
1 ^a		F/M (descarga)				F (4 ^o dia)	
2 ^a						F (11 ^o dia)	
3 ^a		F/M (18 ^o dia)					
4 ^a		F/M (retirada – 21 ^o dia)	Período de espera para a próxima descarga				

Fonte: Produção própria.

Assim, ao final dos quatro meses do experimento, cada leito apresentou o quantitativo de resultados para cada um dos parâmetros físicos e microbiológicos, considerados nesta pesquisa, conforme apresentado no Quadro 7 e 8.

Quadro 8- Quantitativo das análises laboratoriais realizadas para os parâmetros físicos umidade, sólidos totais, sólidos voláteis.

Dia da coleta	Total por mês				Total em 4 meses L1A + L1B	Total em 4 meses L2A + L2B
	L1A	L1B	L2A	L2B		
Descarga	1	1	1	1	8	8
4º	1	1	1	1	8	8
11º	1	1	1	1	8	8
14º	1	1	1	1	8	8
21º	1	1	1	1	8	8

Fonte: Produção própria.

Quadro 9 - Quantitativo das análises laboratoriais realizadas para os parâmetros microbiológicos Coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella sp.*

Dia da coleta	Total por mês				Total em 4 meses L1A + L1B	Total em 4 meses L2A + L2B
	L1A	L1B	L2A	L2B		
Descarga	1	1	1	1	8	8
11º	1	1	1	1	8	8
21º	1	1	1	1	8	8

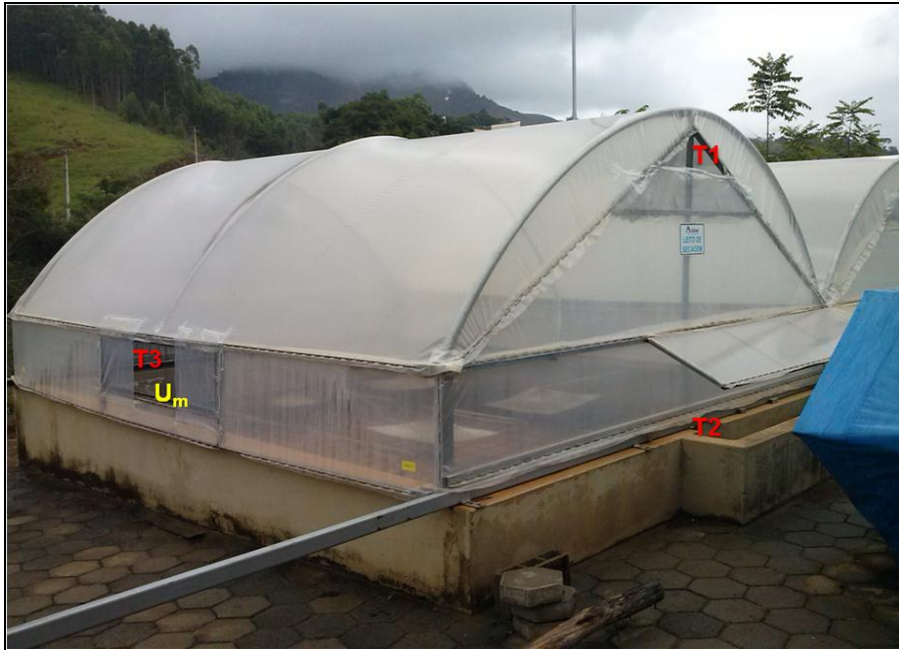
Fonte: Produção própria.

De forma a complementar a avaliação do comportamento da umidade e da concentração de microrganismos patogênicos do lodo, foram realizadas medições de temperatura e umidade do ar na parte interna das estufas e no ambiente externo, além de observações quanto o estado do tempo (sol, nublado ou chuva).

A temperatura do ar interno nas estufas foi medida em três pontos distintos (T1, T2 e T3) para contemplar possíveis variações, já a umidade do ar interno foi medida em apenas um ponto (U_m), conforme apresentado na Figura 16. O equipamento utilizado para medir temperatura e umidade do ar foi um termo higrômetro digital modelo MTH-1362 da marca Minipa.

As medições de temperatura e umidade, bem como as observações em relação ao estado do tempo, foram realizadas nos mesmos horários de 09:00, 11:00, 14:00 e 16:00 durante os 21 dias de secagem do lodo, para cada mês. A temperatura e a umidade ambiente foram medidas à sombra.

Figura 15 – Localização dos pontos de monitoramento de temperatura e umidade do ar interno nas estufas.



Fonte: Foto do próprio autor.

Para o tratamento dos dados obtidos, foi utilizada a estatística descritiva, através de medidas de tendência central, de variabilidade e de correlação, e testes estatísticos.

As análises aplicadas foram:

- correlação de Pearson
- teste T de Student
- modelo ANOVA Two-Way.
- Comparações Múltiplas de Tukey
- teste de Wilcoxon

Todos os testes de hipóteses desenvolvidos nesse trabalho consideraram uma significância de 5%, isto é, a hipótese nula foi rejeitada quando p-valor foi menor que 0,05.

5.4 VIABILIDADE DA METODOLOGIA ADOTADA

Para a avaliação da viabilidade da metodologia adotada para a secagem térmica na ETE Piaçu foram considerados três aspectos: os custos de implantação do projeto, os custos associados à disposição do lodo e as alterações na rotina de operação da ETE. Esses aspectos estão detalhados nos itens 5.4.1 a 5.4.4.

5.4.1 *Custos de implantação do experimento*

Os custos considerados para a análise de viabilidade foram os referentes às estruturas físicas necessárias para a utilização do biogás na ETE Piaçu. Dessa forma, os custos das análises microbiológicas não foram incluídos, pois essas análises foram necessárias apenas para o desenvolvimento e conclusão da pesquisa objeto dessa dissertação.

Também não foram apresentados custos referentes a serviços de mão de obra, pois todas as instalações e adaptações foram realizadas por equipe própria da CESAN.

5.4.2 *Custos associados à disposição do lodo*

Neste tópico serão estimados os custos anuais com disposição adequada do lodo, antes e após a implantação do experimento, considerando os seguintes valores:

- custo com a disposição no aterro sanitário (CD): R\$ 119,61 reais/tonelada de lodo
- custo com transporte do lodo até o aterro sanitário em caçambas de 5 m³ (CT): R\$ 4,37 reais/km, sendo que a CESAN paga por uma distância de 506 km entre a ETE Piaçu e o aterro situado no município de Aracruz/ES, pois considera-se o trajeto de ida e volta (253 km de ida e 253 km de volta).
- umidade final do lodo antes da implantação do experimento: 60%, conforme valores médios de umidade encontrados nos estudos realizados em leitos de secagem simples por JORDAO e PESSOA (2005).

- umidade final do lodo depois da implantação do experimento: 15%, referente ao valor médio encontrado a partir dos 8 (oito) resultados de umidade, após 21 dias de secagem dos leitos com queima do biogás (quatro do Leito 2A e quatro do Leito 2B), conforme apresentado no item 6.1.2.

Os valores de R\$ 4,37 reais/km e R\$ 119,61 reais/tonelada de lodo foram extraídos do contrato que a CESAN possui com a empresa que gerencia o aterro situado em Aracruz/ES, responsável pelo transporte e disposição de resíduos do saneamento, vigente entre abril de 2014 a março de 2019.

Dessa forma, os custos parciais anuais da disposição do lodo, antes e após a implantação do projeto, podem ser estimados por:

$$\text{- CT antes} = n^{\circ} \text{ de caçambas antes} \times 4,37 \times 506 \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{- CT depois} = n^{\circ} \text{ de caçambas depois} \times 4,37 \times 506 \quad \text{Equação (2)}$$

$$\text{- CD antes} = \text{Peso do lodo disposto antes} \times 119,61 \quad \text{Equação (3)}$$

$$\text{- CD depois} = \text{Peso do lodo disposto depois} \times 119,61 \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo,

$$N^{\circ} \text{ de caçambas} = \Sigma (\text{volumes de lodo}) / 5 \quad \text{Equação (5)}$$

$$\text{Volume de lodo} = \text{Peso do lodo} / \text{densidade do lodo} \quad \text{Equação (6)}$$

Dessa forma, os custos totais anuais da disposição do lodo, antes e após a implantação do projeto, podem ser estimados por:

$$\text{- Custo total antes} = \text{CT antes} + \text{CD antes} \quad \text{Equação (7)}$$

$$\text{- Custo total depois} = \text{CT depois} + \text{CD depois} \quad \text{Equação (8)}$$

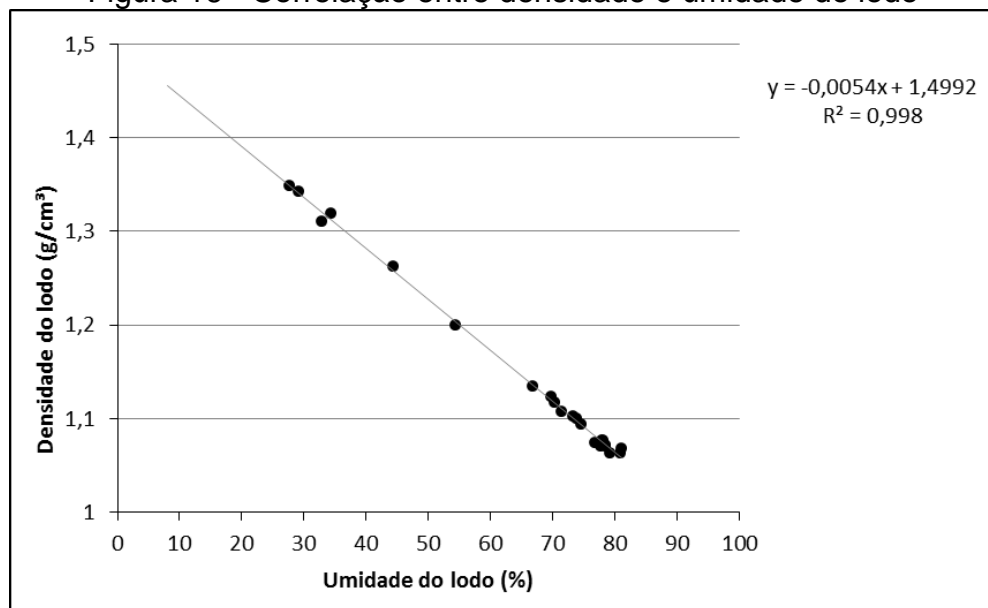
Para a comparação dos custos médios com a disposição antes e após a implantação do experimento, é necessário comparar o quanto que se deixou de gastar com a disposição e com transporte do lodo para aterro. Para isso, conforme Equações 5 e

6, é preciso de dados referentes ao peso do lodo e ao volume do lodo, antes e após a implantação do projeto. Contudo, no decorrer desta pesquisa, não foi possível dispor desses dados. Assim, para suprir essa ausência, foram elaboradas equações de regressão de forma a estimar os valores de volume e peso do lodo, tanto antes quanto após a implantação do experimento. As equações de regressão elaboradas foram: densidade do lodo x umidade do lodo e peso do lodo x umidade do lodo.

Equação: Densidade do lodo x Umidade do lodo

A relação entre a densidade do lodo e a umidade do lodo foi obtida a partir dos dados disponíveis no trabalho desenvolvido por Teixeira e Lima (2011), que correlaciona a densidade, em g/cm^3 , com diferentes teores de sólidos totais e umidade no lodo. A Figura 17 apresenta a correlação entre densidade e umidade do lodo, elaborada a partir dos dados disponíveis nesse trabalho.

Figura 16 - Correlação entre densidade e umidade do lodo



Fonte: adaptado de Teixeira e Lima (2011).

Verifica-se, a partir da Figura 17 que a relação densidade e umidade do lodo é dada a partir de uma regressão linear simples, cuja equação é $y = -0,0054x + 1,4992$ com coeficiente de regressão (R^2) de 0,998.

Equação: Peso do lodo x Umidade do lodo

Para elaborar a equação de regressão de peso do lodo x umidade do lodo foram utilizadas 6 (seis) medidas, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 10 - Medidas utilizadas para gerar a equação de regressão peso x umidade do lodo

Medida	Umidade %	Metodologia
1	96	densidade (obtida da equação de regressão) x volume (obtido pela área do leito x altura do lodo)
2	80	densidade (obtida da equação de regressão) x volume (obtido pela área do leito x altura do lodo)
3	52,8	pesagem do lodo do Leito 1 - julho/14
4	29,85	pesagem do lodo do Leito 2 - julho/14
5	15,6	pesagem do lodo do Leito 1 - agosto/14
6	10,55	pesagem do lodo do Leito 2 - agosto/14

Fonte: Produção própria.

Medida 1: Peso referente à umidade do lodo no instante da descarga. Adotou-se a umidade média de 96% (a partir dos resultados apresentados no item 6.1.2) e como, nesse experimento, a descarga foi realizada a uma altura de 15cm, em uma área de leito de secagem de 20 m², encontra-se um volume de 3m³ de lodo. A partir da equação de densidade x umidade, encontra-se o peso do lodo em kg para a umidade de 96%.

Medida 2: Peso referente a 80% de umidade no quarto dia a partir da descarga. Adotou-se o quarto dia para estimar o peso do lodo, pois nesse período o lodo ainda apresentava homogeneidade por lodo o leito de secagem (conforme pode ser visualizado na Figura 18) podendo ser estimado seu volume facilmente. Para estimar o volume, mediu-se a altura do lodo nos leitos, no 4º dia de secagem, sendo a média encontrada de 4 cm, com a área de 20 m², encontrou-se um volume de 0,8 m³. A partir da equação de densidade x umidade, encontra-se o peso do lodo em kg para a umidade de 80%.

Figura 17 – Aspecto do Leito 2 no 4º dia após a descarga.



Fonte: Foto do autor.

Medida 3, 4, 5 e 6: Pesos referentes às umidades médias de 52,8%, 29,5%, 15,6% e 10,6%. Os valores foram obtidos através de pesagens de todo o lodo dos Leitos 1 e 2, após o término do processo de secagem (21 dias), nos meses de julho e agosto. A Figura 19 apresenta o aparato utilizado para pesagem do lodo. A balança utilizada foi do tipo peixeira, modelo FS-50 da marca Western®, com capacidade máxima de 50 kg e graduação de 0,5 kg.

Figura 18 - Aparato para pesagem do lodo.



Fonte: Fotos do autor.

5.4.3 *Alteração da rotina de operação da ETE Piaçu*

Para avaliar as alterações na rotina de operação da ETE Piaçu, foram considerados os seguintes aspectos:

- as atividades acrescidas na rotina operacional da ETE Piaçu;
- a complexidade das atividades acrescidas;
- o tempo gasto realizar as atividades acrescidas e
- as melhorias advindas da implantação do projeto.

Os aspectos foram avaliados juntamente com o operador e o responsável técnico da ETE Piaçu.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através do experimento realizado na ETE Piaçu, nas quatro repetições, realizadas nos meses de junho, julho, agosto e setembro, para os parâmetros físicos (umidade, sólidos totais, sólidos voláteis) e os microbiológicos (Coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella sp*).

6.1 PARÂMETROS FÍSICOS

6.1.1 Umidade do lodo

Todos os resultados das análises de umidade do lodo para cada leito, ao longo dos dias monitorados de cada mês, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das análises de umidade do lodo em cada leito, expressas em porcentagem, ao longo dos dias monitorados de cada mês.

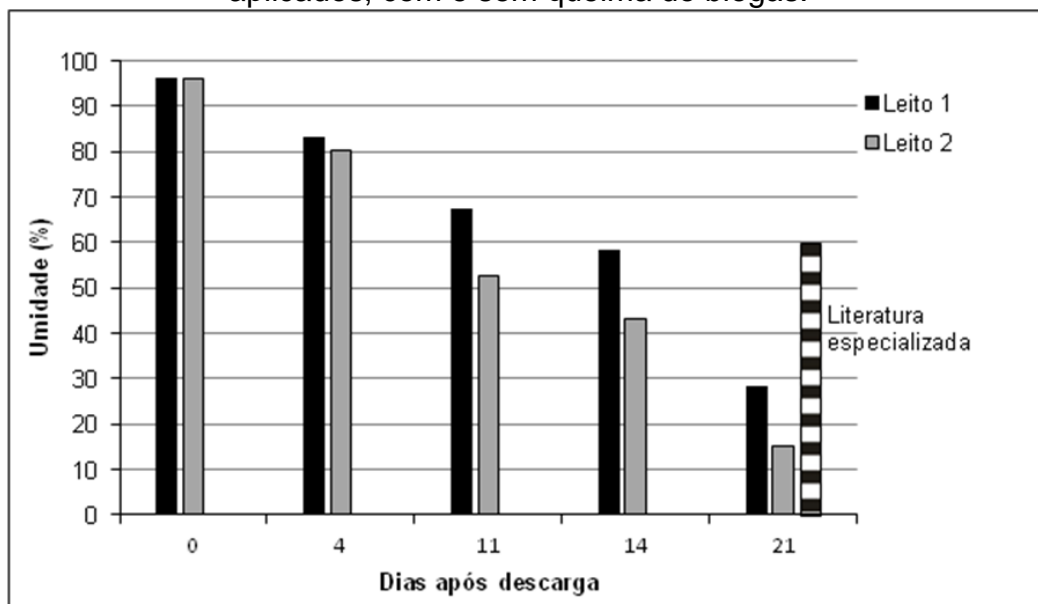
Leito	Dias após a descarga	Umidade (%)				Média dos meses (%)	Desvio Padrão (%)
		Junho (1ª rep*)	Julho (2ª rep)	Agosto (3ª rep)	Setembro (4ª rep)		
L 1A	0	96,1	96,3	96,2	96,1	96,16	0,11
	4	84,8	84,4	81,5	80,1	82,70	2,27
	11	75,7	71,8	66,8	59,4	68,43	7,03
	14	64,4	66,4	63,2	47,4	60,35	8,73
	21	38,5	58,5	18,1	8,9	31,00	22,12
L1B	0	96,1	96,3	96,2	96,1	96,16	0,11
	4	84,3	88,7	80,8	82,9	84,18	3,34
	11	71,4	71,1	65,4	59,1	66,75	5,80
	14	60,4	67,4	56,2	41,6	56,40	10,89
	21	33,6	47,1	13,1	8,4	25,55	18,06
L 2A	0	96,1	96,3	96,2	96,1	96,16	0,11
	4	82,1	82,6	77,8	79,6	80,53	2,24
	11	60,6	54,4	38	47,7	50,18	9,68
	14	50,3	52,6	36,7	32,4	43,00	9,96
	21	11,5	27,7	10,1	6,8	14,03	9,33
L 2B	0	96,1	96,3	96,2	96,1	96,16	0,11
	4	78,7	83,1	78,1	80,9	80,20	2,28
	11	61,5	62,7	46,4	52,1	55,68	7,79
	14	46,6	54,4	41,4	29,4	42,95	10,49
	21	16,5	32,0	11,0	6,7	16,55	11,05

*rep = repetição

Os resultados na Tabela 12 demonstram que a umidade média final (no 21º dia) das quatro repetições em cada leito, foi de 31,00% (L1A) e 25,55% (L1B) para os leitos sem queima do biogás e 14,03% (L2A) e 16,55% (L2B) para os leitos com queima do biogás. Verifica-se, portanto que o procedimento de queima do biogás no interior da estufa agrícola proporcionou uma maior redução da umidade quando comparado com os valores apresentados no leito apenas com estufa.

Na Figura 19 estão apresentados os valores médios de umidade para os dois tratamentos (com e sem queima), ao longo dos dias de secagem, considerando as quatro repetições, bem como o valor final da umidade, obtida a partir de um leito simples, reportado em literatura especializada (60%). Os valores referentes ao Leito 1 é a média dos resultados de umidade obtidos no L1A e L1B para cada dia após a descarga, de igual forma, os valores referentes ao Leito 2 é a média entre L2A e L2B, totalizando assim, 8 amostras por leito por dia.

Figura 19 - Umidade média do lodo comparando os dois tratamentos aplicados, com e sem queima do biogás.



Fonte: Produção própria.

Verifica-se que os valores médios das umidades finais obtidos no experimento são bem inferiores ao valor de 60% indicado pela literatura técnica quando é utilizado apenas o leito de secagem no processo de desidratação do lodo. A partir dos resultados da Figura 19, acrescentando apenas estufa agrícola ao leito de secagem, obteve-se uma umidade média final de 28%, e, ainda, o processo de desidratação

foi mais eficiente inserindo a queima do biogás, pois o lodo apresentou uma umidade final média de 15%. Para comparar a umidade do lodo entre os leitos com e sem queima do biogás, foi utilizado o modelo ANOVA Two-Way. Uma vez que o comportamento da umidade é influenciado tanto pela queima do biogás quanto pelo tempo de permanência do lodo no leito, o modelo ANOVA foi feito para a variável de umidade considerando-se como fatores o tratamento implantado, os dias após a descarga, bem como a interação entre os primeiros dois fatores. Ainda, o dia da descarga (dias após igual a 0) foi retirado da análise devido ao fato de que neste momento os dois tipos de leito apresentam a mesma umidade (Tabela 13).

Tabela 13 - Resultado do modelo ANOVA Two-Way para os valores de umidade considerando os quatro meses monitorados.

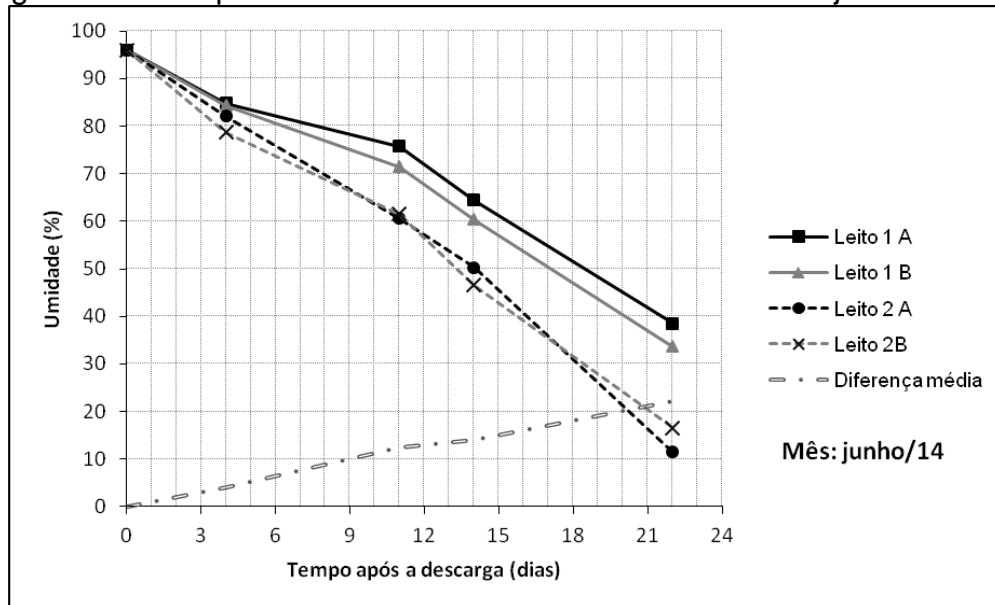
	0	96,16
	4	81,90
Umidade média em relação aos dias após a descarga	11	60,14
	14	50,79
	21	21,78
Umidade geral	Leito 1	66,76
	Leito 2	57,54
Efeito testado na ANOVA		p-valor
Leito 1*Leito2		<.0001
Dias após a descarga		<.0001
Interação Leito*Dias após a descarga		0,2564

Observa-se, a partir da Tabela 19, que há diferença estatisticamente significativa entre a umidade nos Leitos 1 e 2 (p -valor < 0.001), sendo a umidade do leito com queima do biogás menor do que a umidade do leito sem queima. Verifica-se, também, diferença significativa entre a umidade nos dias após a descarga (p -valor < 0.001), sendo que a umidade diminui ao longo do tempo, resultado esse já esperado uma vez que a redução da umidade ao longo do tempo é o objetivo do leito de secagem.

Quando se considera todos os meses monitorados, a interação entre o leito e o número de dias após a descarga, não foi significativo (p -valor 0.2564), ou seja, não houve mudança na diferença entre a umidade nos leitos no decorrer dos dias de secagem, sendo que essa diferença, em média, foi de 11,5%.

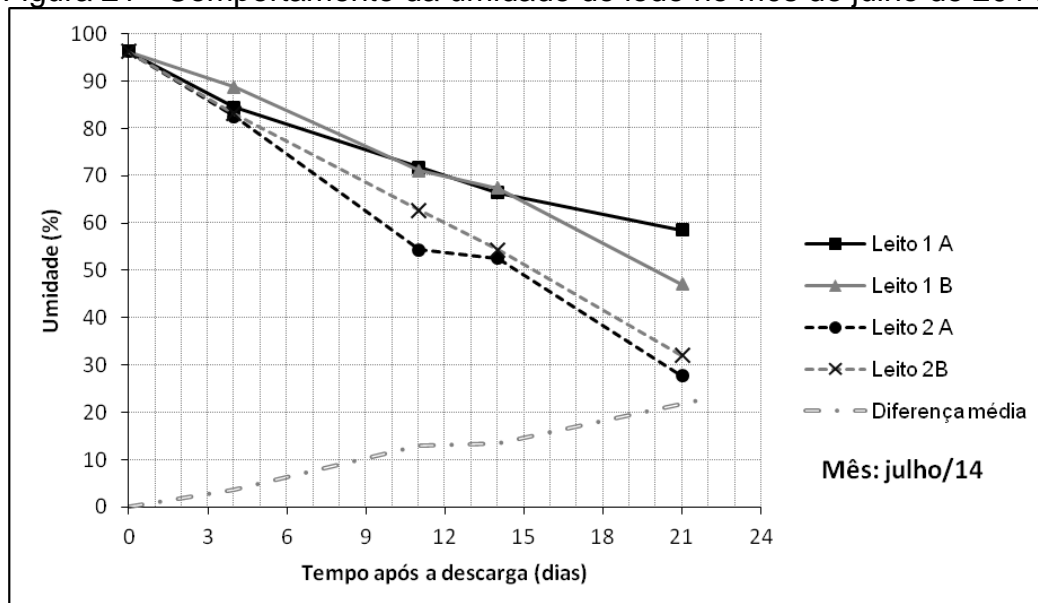
De forma a melhor evidenciar os resultados obtidos, foram elaborados gráficos do decaimento da umidade do lodo para cada leito monitorado nos meses abrangidos pelo experimento (Figuras 24, 25, 26 e 27). A linha tracejada refere-se à diferença de umidade entre a média dos Leitos 1A e 1B e a média dos Leitos 2A e 2B.

Figura 20 - Comportamento da umidade do lodo no mês de junho de 2014.



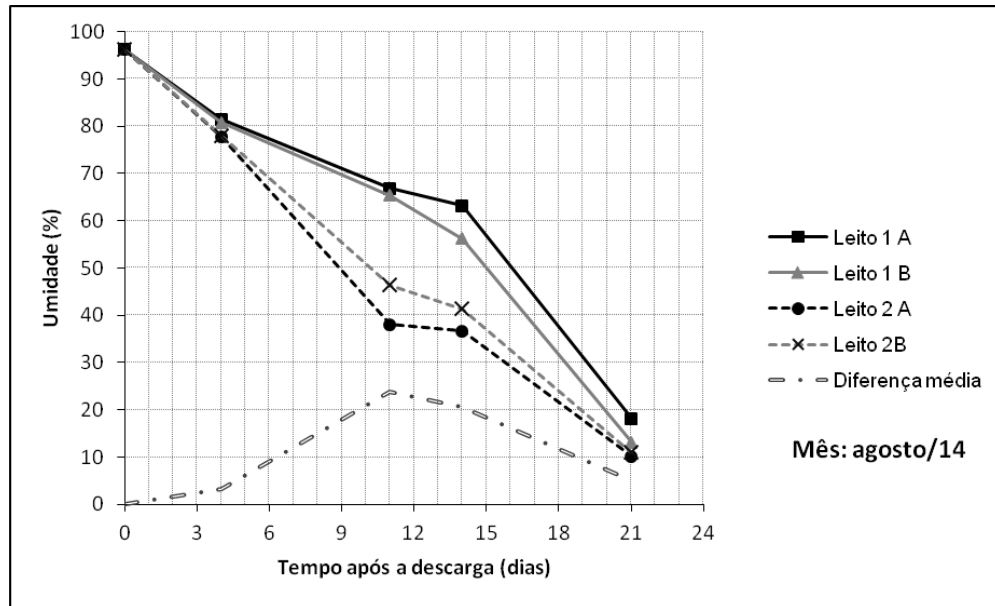
Fonte: Produção própria.

Figura 21 - Comportamento da umidade do lodo no mês de julho de 2014.



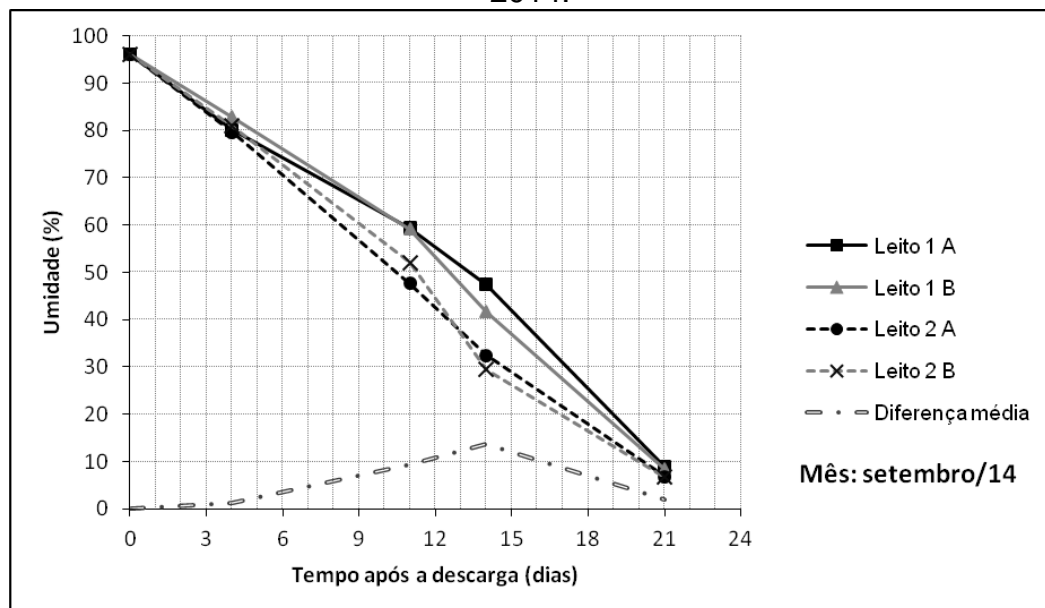
Fonte: Produção própria.

Figura 22 - Comportamento da umidade do lodo no mês de agosto de 2014.



Fonte: Produção própria.

Figura 23 - Comportamento da umidade do lodo no mês de setembro de 2014.



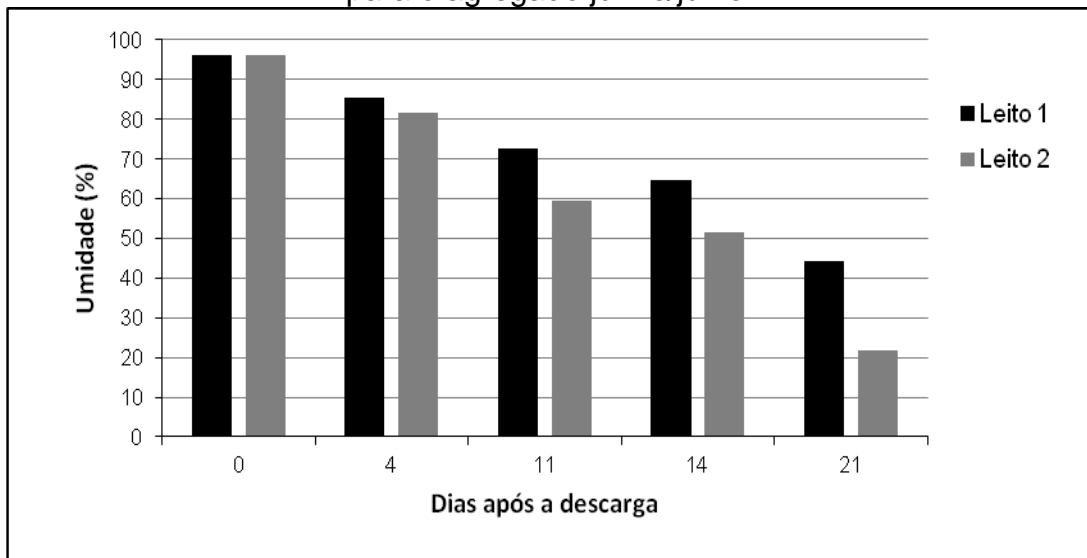
Fonte: Produção própria.

A partir dos gráficos apresentados, é possível verificar que no processo de secagem do lodo ocorreu uma variação no comportamento da umidade ao longo dos meses monitorados. Em junho e julho, a umidade final dos Leitos 2A e 2B apresentou valores bem inferiores aos dos Leitos 1A e 1B, na qual a diferença de umidade entre os leitos com e sem queima do biogás, conforme pode observada pela linha

tracejada, esteve com valores em torno de 20% para os dois meses. Já em agosto e setembro, o valor final da umidade dos quatro leitos esteve semelhante, na qual a diferença de umidade entre os leitos apresentou-se com valores próximos a 5%. Além disso, percebe-se, para os meses de agosto e setembro, que a maior diferença de umidade, está entre o 11º e o 14º dia após a descarga. Assim, verificou-se que aplicar o modelo ANOVA para os quatro meses juntos não reflete corretamente o observado mês a mês.

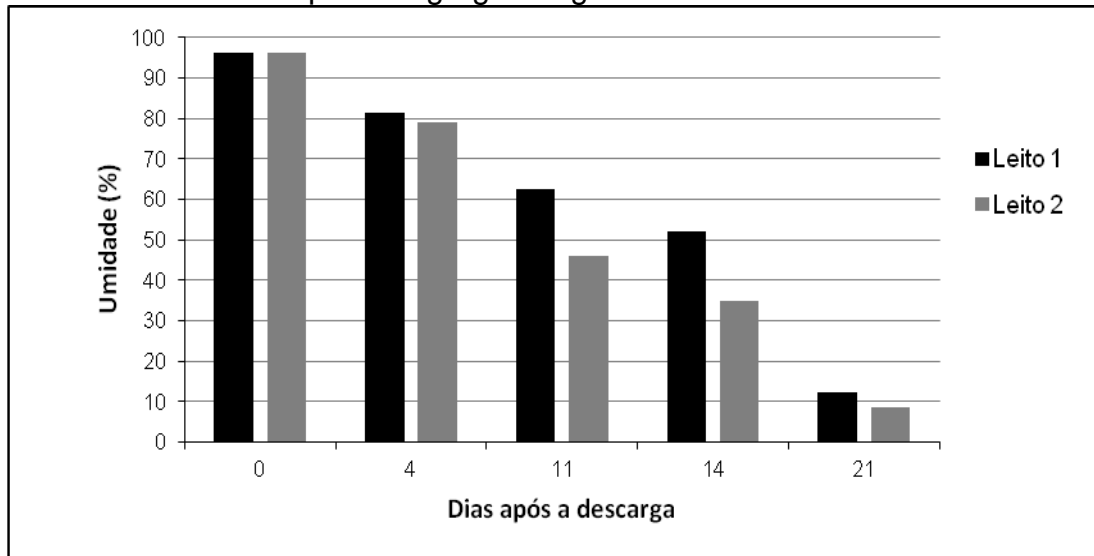
Diante dessa variação da umidade final entre os Leitos 1 e 2 ao longo dos meses, agregaram-se os meses que apresentaram diferenças semelhantes: junho com julho e agosto com setembro para iniciar uma nova análise estatística. Para cada agregado, foi calculada a média da umidade do lodo em relação aos dias de secagem após a descarga, conforme os gráficos apresentados nas Figuras 24 e 25. Os valores referentes ao Leito 1 é a média dos resultados de umidade obtidos no L1A e L1B para cada dia após a descarga, de igual forma, os valores referentes ao Leito 2 é a média entre L2A e L2B, considerando os meses que compõem o agregado. Dessa forma, totaliza-se 4 amostras por leito por dia.

Figura 24 - Umidade média do lodo, em relação aos dias de secagem, para o agregado junho/julho.



Fonte: Produção própria.

Figura 25 - Umidade média do lodo, em relação aos dias de secagem, para o agregado agosto/setembro.



Fonte: Produção própria.

Separando os meses e agregando-os, observa-se uma nítida variação em relação ao decaimento da umidade do lodo nos leitos quando se comparam os agregados. Por exemplo, o Leito 1 apresentou umidade média final (21º dia após a descarga) de 44,43% e 12,13% nos agregados de junho/julho e agosto/setembro, respectivamente, enquanto o Leito 2 apresentou valores de 21,93% e 8,65%. Para análise dos dados, da mesma forma que feito anteriormente quando se consideraram os quatro meses juntos (Tabela 13), foi aplicado o modelo ANOVA Two-Way (Tabela 14) para cada agregado.

Tabela 14 - Resultado do modelo ANOVA Two-Way para os valores de umidade no lodo considerando os meses agregados.

Categoria		Junho/Julho	Agosto/Setembro
Umidade média em relação aos dias após a descarga	0	96,18	96
	4	83,59	80
	11	65,93	54
	14	58,04	44
	21	33,18	10
Umidade geral	Leito 1	72,66	60,88
	Leito 2	62,1	52,99
Efeito testado na ANOVA		p-valor	
Leito 1 x Leito 2		<0,0001	<0,0001
Dias após a descarga		<0,0001	<0,0001
Interação Estufa*Dias após a descarga		0,0329	0,0059

Observa-se que separando os meses em agregados, obtêm-se os mesmos resultados que quando todos os meses juntos: há diferença estatisticamente significativa entre a umidade nos Leitos 1 e 2 (p -valor < 0.001), sendo a umidade do leito com queima do biogás menor do que a umidade do leito sem queima, e entre os dias após a descarga (p -valor < 0.001), sendo que a umidade diminui ao longo do tempo.

Entretanto, passa-se a ter uma interação significativa entre o leito e o número de dias, quando o agregado dos meses é considerado. Ou seja, houve mudança na diferença entre a umidade nos leitos no decorrer dos dias de secagem, tanto para o agregado de junho e julho (p -valor 0.0059), quanto para o de agosto e setembro (p -valor 0,0329).

Para verificar em qual dia após a descarga houve alteração na diferença de umidade, aplicou-se o teste de Comparações Múltiplas de Tukey para interação entre os leitos, considerando o dia após a descarga, conforme apresenta a Tabela 15.

Tabela 15 - Interação entre os leitos de secagem considerando o tempo após a descarga.

Dias após a descarga	Comparação entre os Leitos (p -valor)	
	Junho/Julho	Agosto/Setembro
4	0,9760	0,9980
11	0,0617	0,0018*
14	0,0593	0,0013*
21	0,0003*	0,9717

* p -valor $<0,05$

A partir da Tabela 15, verifica-se que no agregado do mês de junho/julho a diferença de umidade entre os leitos L1 e L2 ocorreu no 21º dia após a descarga (p -valor de 0,0003), no último dia de secagem. Em contrapartida, no agregado do mês de agosto/setembro, a diferença de umidade entre os leitos L1 e L2 neste mesmo dia não foi significativa. Dessa forma constata-se que, para a ETE Piaçu, a utilização da queima do biogás para a secagem do lodo é de suma importância nos meses de junho e julho, proporcionando uma diferença significativa da umidade entre os leitos de aproximadamente 18%. Já para os meses de agosto e setembro, verifica-se que

a queima do biogás não altera significativamente os resultados finais de umidade, assim, nesse período apenas a cobertura do leito de secagem com estufas agrícolas já traria resultados satisfatórios, 12% de umidade em média. A conclusão de que a utilização de estufas agrícolas apresenta bons resultados para secagem do lodo também foi obtida por autores como Lima (2010), Lozer (2012), Ferreira (2001) e Dias (2010).

No agregado de agosto/setembro, houve variação estatística na diferença de umidade entre os leitos L1 e L2 nos dias 11^o (p-valor igual a 0,0018) e 14^o (p-valor igual a 0,0013) após a descarga. Esse resultado mostra que, há um decaimento mais acentuado na umidade entre os dias 11^o e 14^o após a descarga no Leito 2, ou seja, a queima do biogás nos meses de agosto e setembro proporciona uma antecipação na secagem do lodo. Por exemplo, conforme mostra a Figura 25, no 14^o dia de secagem o Leito 2 apresentou uma média de umidade de 35% enquanto o Leito 1, 52%.

Assim, verifica-se que a queima do biogás apresentou resultados positivos para a secagem do lodo em todos os meses monitorados, seja pela redução significativa na umidade final (junho/julho) ou pela aceleração do processo de secagem (junho/julho e agosto/setembro), quando se comparara com apenas a utilização de estufas agrícolas.

6.1.2 *Temperatura e Umidade do ar*

Os resultados obtidos no monitoramento diário das temperaturas e da umidade no ambiente durante os 4 (quatro) meses do experimento, bem como no interior da estufa simples e com queima do biogás, encontram-se no Apêndice A. A Tabela 16 apresenta os valores de temperatura e da umidade do ambiente e interno e externo das estufas distribuídos por quartis da amostra em relação aos meses do experimento. Para a temperatura das estufas os valores apresentados referem-se à média dos três pontos de monitoramento T_1 , T_2 e T_3 obtidos em cada horário.

Tabela 16 – Valores de temperatura e da umidade do ar distribuídos por quartis em relação aos meses monitorados.

PARÂMETRO		JUNHO (n=57)			JULHO (n=36)			AGOSTO (n=54)			SETEMBRO (n=47)		
		Amb. ¹	E. Simples ²	E.Biogás ³	Amb.	E. Simples	E.Biogás	Amb.	E. Simples	E.Biogás	Amb.	E. Simples	E.Biogás
TEMPERATURA DO AR (°C)	Mínima	18,90	20,60	24,63	18,50	19,47	24,53	15,20	18,03	23,17	18,80	23,80	29,93
	1º Quartil	22,40	24,23	30,27	20,10	23,03	28,45	20,18	24,51	30,98	23,40	28,03	37,10
	2º Quartil	24,50	26,07	33,13	21,40	25,02	30,43	23,25	28,25	35,42	25,60	30,53	40,27
	3º Quartil	26,00	29,03	35,47	22,80	26,70	33,01	25,20	32,73	39,74	27,10	33,77	43,38
	Máxima	28,20	34,90	41,40	25,80	32,13	38,70	31,60	38,37	47,93	29,10	38,47	49,63
UMIDADE DO AR (%)	Mínima	37,50	44,20	43,20	27,90	44,40	43,10	24,10	41,80	37,70	21,10	32,20	30,20
	1º Quartil	48,50	59,80	55,50	43,78	60,00	59,10	35,58	53,83	47,00	30,88	41,70	40,10
	2º Quartil	54,30	65,40	64,80	48,75	69,60	65,30	45,90	67,15	60,75	38,80	50,80	52,50
	3º Quartil	60,20	74,30	68,50	61,83	76,40	72,88	56,38	75,90	71,70	46,13	60,40	59,35
	Máxima	71,70	81,50	85,20	81,10	89,80	89,30	93,10	92,10	95,10	62,90	77,70	80,00

¹ ambiente, ²estufa simples, ³estufa com queima do biogás.

Nota: o quantitativo de medições de temperatura e umidade realizadas para cada situação (ambiente, estufa simples e estufa com queima do biogás) nos diferentes meses está apresentado pela letra n.

A Tabela 17 apresenta os valores médios de temperatura e umidade do ar no ambiente externo e interno das estufas encontrados através do monitoramento diário do experimento.

Tabela 17 - Médias dos valores temperatura e umidade do ar monitorados entre os meses de junho a setembro de 2015.

Parâmetro	Local	n	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Temperatura (°C)	Ambiente	295	22,8	3,2	14,1	31,6
	Estufa Simples	194	27,8	4,4	18,0	38,5
	Estufa com queima do biogás	194	35,1	5,7	23,2	49,6
Umidade (%)	Ambiente	190	48,6	13,4	21,1	93,1
	Estufa Simples	190	63,0	13,3	32,2	92,1
	Estufa com queima do biogás	190	60,1	13,0	30,2	95,1

Observa-se, a partir da Tabela 17, que o valor médio da temperatura do ar interno à estufa com biogás foi de 35,1°C, apresentando variação entre 23,2 a 49,6°C, sendo que a temperatura da estufa simples e do ambiente apresentaram valores inferiores tanto para a média quanto para a faixa de variação. Já o valor médio de umidade do ar interno à estufa com queima do biogás esteve superior à média ambiente, mas inferior à média da estufa simples. Para avaliar se esses resultados foram diferentes estatisticamente, utilizou-se o teste T student avaliando uma significância de 5%, conforme apresentado na Tabela 18.

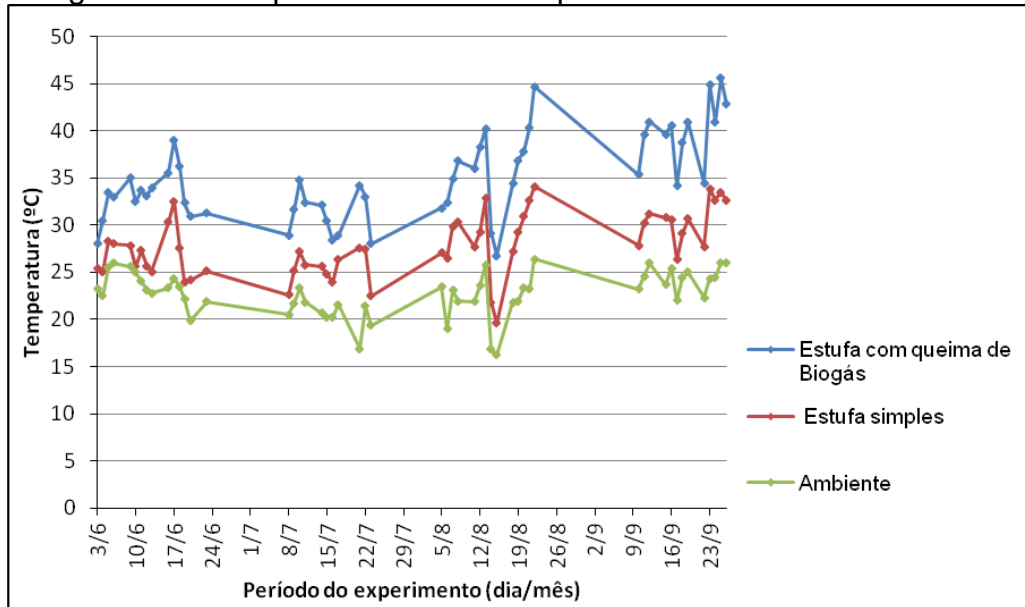
Tabela 18 - Análise T student para umidade e temperatura do ar entre as estufas simples e com queima do biogás

Parâmetros analisados	p-valor
Temperatura do ar entre as estufas simples e com queima do biogás	<0,001
Umidade do ar entre as estufas simples e com queima do biogás	0,0321

Observa-se que a diferença de temperatura e umidade do ar entre a estufa simples e com queima do biogás é estatisticamente significativa, uma vez que p-valor foi inferior a 0,05 em ambas as análises. A estufa com queima do biogás apresentou valores de temperatura e umidade do ar, respectivamente, maior e menor que a estufa simples.

A Figura 26 apresenta o comportamento da temperatura média diária da estufa simples, da estufa com queima de biogás e do ambiente ao longo do período de realização do experimento, de 03 de junho a 26 de setembro de 2014.

Figura 26 - Comportamento das temperaturas do ar médias diárias.



Fonte: Produção própria.

Verifica-se que as temperaturas internas tanto na estufa com queima do biogás, quanto na estufa simples, variam conforme a temperatura ambiente e, em todo o período de monitoramento, a temperatura da estufa com queima de biogás foi superior à temperatura da estufa simples (Figura 26).

Aplicando a correlação de Pearson entre a média da temperatura nas estufas e a temperatura ambiente, tem-se que a correlação entre a temperatura da estufa simples e a temperatura ambiente foi estatisticamente significativa com valor do coeficiente linear (r) de 0.79 e p -valor <0.001 , bem como a correlação entre a temperatura da estufa com queima do biogás e a temperatura ambiente, sendo o valor de r igual a 0.75 e p -valor < 0.001 , conforme demonstrado através da Tabela 19.

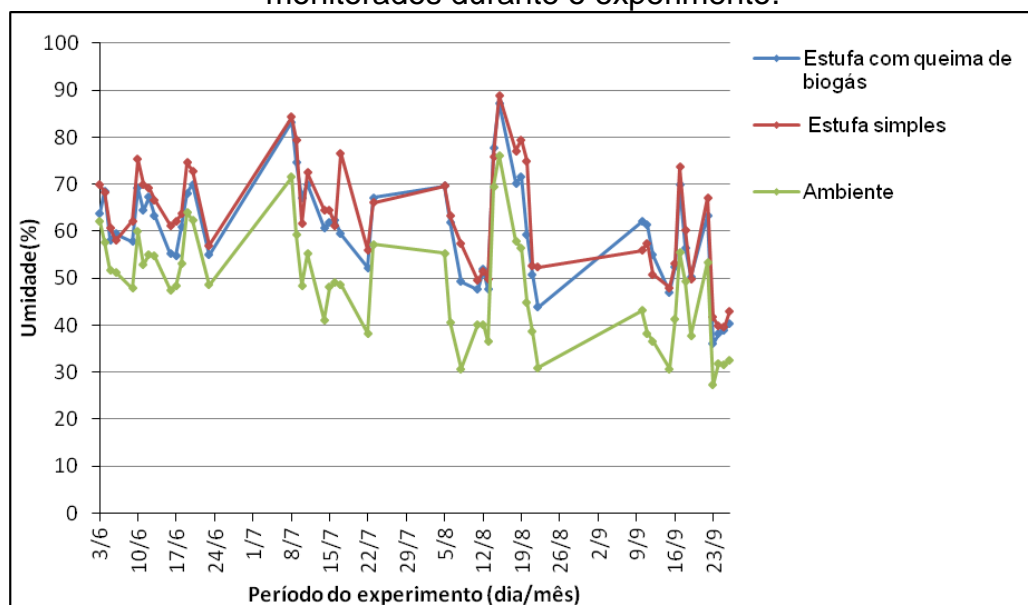
Tabela 19- Correlação de Pearson entre as médias das temperaturas das estufas e a temperatura ambiente

Temperatura	Estatística	Temperatura ambiente
Estufa simples	r	0,79
	p-valor	<.0001
	N	194
Estufa com queima de biogás	r	0,75
	p-valor	<.0001
	N	194

Uma vez que a temperatura máxima do ar monitorada no experimento foi de 49,6°C, na estufa com queima de biogás, conforme mostrado na Tabela 17, conclui-se assim que a massa de lodo no Leito 2 atingiria no máximo esse valor, considerando o equilíbrio térmico descrito pela lei zero da termodinâmica.

Em relação ao monitoramento da umidade do ar, verificou-se que, em média, a umidade interna da estufa com queima biogás é menor que da estufa simples, hipótese confirmada estatisticamente (p-valor igual a 0,0321 - Tabela 18). A umidade menor na estufa com queima do biogás pode estar relacionada ao fato de ter ocorrido uma maior da circulação do ar devido à intensificação do processo de convecção, uma vez que a temperatura interna nessa estufa foi maior, proporcionando uma maior renovação do ar úmido interno. A Figura 27 apresenta a variação gráfica da umidade média do ar nos dias monitorados.

Figura 27 - Comportamento da umidade média do ar nos dias monitorados durante o experimento.



Fonte: Produção própria.

Verifica-se, também, que tanto a umidade interna da estufa com queima biogás quanto a sem queima do biogás são maiores que a umidade do ambiente, comportamento este explicado pela evaporação da água do lodo no processo de secagem que aumenta a umidade do ar interno em relação à umidade ambiente.

Na tentativa de encontrar um fator explicativo para a variação nos resultados de umidade final do lodo, ao longo dos meses monitorados, através dos valores de temperatura e umidade do ar medidos, também foram agregados os valores de temperatura e umidade do ar em: junho/julho e agosto/setembro. Para esses agregados foram realizadas duas análises, a primeira referente à diferença de temperatura entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura do ar nas estufas, e a segunda em relação à umidade do ar interno nas estufas. As Tabelas 20 e 21 apresentam os resultados dessas análises.

Tabela 20 - Resultados da primeira análise: Teste T student para a diferença de entre a temperatura do ar nas estufas com a temperatura do ar ambiente.

Agregado dos meses	Diferença de temperatura (Estufa-Ambiente)	N	Média da diferença de temperatura (°C)	Desvio padrão (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	p-valor
Junho /Julho	Simples-Ambiente	101	5,49	2,54	0,2	12,5	<0.0001
	Com queima de biogás-Ambiente	101	13,78	3,51	4,5	22,07	
Agosto/ Setembro	Simples-Ambiente	93	2,91	2,28	-3,03	8,7	<0.0001
	Com queima de biogás-Ambiente	93	9,11	2,89	0,13	14,7	

A partir da Tabela 20, observa-se que a diferença da temperatura entre ambas as estufa com a temperatura ambiente foi estatisticamente significativa (p-valor < 0,0001), tanto para o agregado de junho/julho quanto para o de agosto/setembro. Contudo, comparando os agregados percebe-se que houve maior variação de temperatura nos meses de julho/agosto do que nos meses de agosto/setembro. Ou seja, a queima do biogás em junho/julho proporcionou um aumento de 13,78°C na temperatura interna da estufa em relação à temperatura ambiente, em contraposição na estufa simples houve um aumento de 5,49°C. No agregado agosto/setembro, essa variação foi menor refletindo, na estufa com queima do biogás, um aumento de

9,11°C em relação à temperatura ambiente, e na estufa simples houve um aumento de apenas 2,91°C.

Tabela 21 - Resultados da segunda análise: Teste T student para os valores de umidade do ar internos nas estufas.

Agregado dos meses	Estufa	N	Umidade do ar média (%)	Desvio padrão (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	p-valor
Junho/Julho	Simples	93	67,0	9,8	44,2	89,8	0,0311
	Com queima do biogás	93	63,9	9,7	43,1	89,3	
Agosto/Setembro	Simples	97	59,1	15,0	32,2	92,1	0,2057
	Com queima do biogás	97	56,4	14,7	30,2	95,1	

Verifica-se, pela Tabela 21, que em relação à umidade do ar, quando se separa os agregados, é verificada diferença estatisticamente significativa entre as estufas apenas para o agregado dos meses de junho e julho, onde o p-valor foi de 0,0311. Ou seja, apenas no agregado junho/julho é verificada estatisticamente que a umidade da estufa com queima do biogás é menor que a da estufa simples. A Tabela 22 apresenta um resumo dos dados obtidos através do monitoramento da temperatura e umidade do ar e do estado do tempo.

Tabela 22 - Resumo dos dados obtidos através do monitoramento da temperatura, da umidade do ar e da insolação.

Agregado dos meses	Insolação (% das observações)	Local	Umidade média do ar (%)	Média da diferença de temperatura do ar interno com ambiente (°C)	Temperatura média do ar (°)
Junho e Julho	46% ¹	Estufa simples/ Leito 1	67,0	5,49	26,1
		Estufa com queima do biogás/ Leito 2	63,9	13,8	32,3
		Ambiente	53,5	-	23,2
Agosto e Setembro	75% ² (n = 76 de 101)	Estufa simples/ Leito 1	59,1	2,91	29,5
		Estufa com queima do biogás/ Leito 2	56,4	9,1	37,7
		Ambiente	43,9	-	24,0

¹43 observações de sol em 93 observações totais

²76 observações de sol em 101 observações totais

Os valores de % de insolação referem-se às observações de presença de sol em relação a todas as observações de estado do tempo realizadas. As observações realizadas quanto o estado do tempo (sol, nublado ou chuva) estão apresentadas no Apêndice A.

Assim, diante dos resultados apresentados nas Tabelas 20, 21 e 22, uma explicação para os diferentes comportamentos do lodo nos agregados de junho/julho e agosto/setembro, em relação à redução de umidade, pode estar relacionada aos seguintes fatores:

- a diferença de temperatura entre o ar interno e externo (ambiente) na estufa
- a umidade do ar interno da estufa e
- o tempo de insolação

Segundo os resultados de umidade do lodo (item 6.1.1), em junho/julho houve uma maior diferença entre as umidades finais dos leitos L1 e L2, sendo estatisticamente diferentes (Tabela 14). Conforme Tabela 20, observa-se que neste período, a estufa com queima do biogás apresentou uma maior diferença entre a temperatura do ar interno e externo e uma umidade do ar estatisticamente menor que a estufa sem queima. Ou seja, em períodos com menor insolação (45% das observações) e temperatura do ar ambiente ligeiramente mais baixos, a queima do biogás é de extrema importância para favorecer os fatores associados ao processo de secagem do lodo, quando comparado à ausência de queima, quais sejam: redução significativa da umidade do ar interno da estufa e maior amplitude térmica entre o ar interno e externo à estufa, propiciando maior circulação do ar interno e, como consequência, maior remoção da umidade do lodo.

Dessa forma, para ETEs localizadas em regiões de clima mais ameno e, principalmente em períodos do ano de menor insolação, a utilização da metodologia proposta para secagem do lodo torna-se imprescindível.

Já para períodos do ano com maior insolação a utilização do biogás é efetiva para reduzir o tempo necessário para processo de secagem do lodo, quando comparado com a utilização apenas da estufa agrícola.

6.1.3 Relação SV/ST

Os resultados obtidos através das análises de sólidos voláteis e totais estão apresentados no Apêndice B, já os valores referentes à relação entre os mesmos, estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados da relação entre sólidos voláteis e sólidos totais.

Leito	Dias após a descarga	SV/ST				Média	Desvio Padrão
		Junho	Julho	Agosto	Setembro		
Leito 1 A	0	0,62	0,66	0,63	0,65	0,64	0,02
	4	0,53	0,62	0,58	0,59	0,58	0,04
	11	0,49	0,57	0,62	0,52	0,55	0,06
	14	0,46	0,56	0,59	0,55	0,54	0,05
	21	0,45	0,51	0,60	0,50	0,51	0,06
Leito 1 B	0	0,62	0,66	0,63	0,65	0,64	0,02
	4	0,52	0,51	0,57	0,58	0,55	0,04
	11	0,50	0,54	0,62	0,57	0,56	0,05
	14	0,47	0,55	0,59	0,57	0,54	0,05
	21	0,47	0,53	0,51	0,51	0,50	0,03
Leito 2A	0	0,62	0,66	0,63	0,65	0,64	0,02
	4	0,54	0,62	0,58	0,54	0,57	0,04
	11	0,47	0,53	0,59	0,58	0,54	0,06
	14	0,49	0,49	0,60	0,55	0,53	0,05
	21	0,47	0,52	0,51	0,52	0,50	0,03
Leito 2B	0	0,62	0,66	0,63	0,65	0,64	0,02
	4	0,55	0,63	0,59	0,60	0,59	0,03
	11	0,49	0,57	0,60	0,44	0,53	0,07
	14	0,45	0,53	0,62	0,52	0,53	0,07
	21	0,46	0,52	0,53	0,51	0,50	0,03

Conforme Resolução CONAMA 375/2006, para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70. Dessa forma, verifica-se que em todas as amostragens realizadas, o lodo da ETE Piaçu apresentou valores inferiores a 0,70. Valores estes já esperados, pois conforme Fernandes e Souza (2001) o lodo proveniente de reatores UASB, já apresenta estabilidade biológica, por ficar de 2 a 3 meses, em média, no reator.

Verifica-se que tanto na estufa simples, quanto na estufa com queima do biogás houve redução do valor da relação entre sólidos voláteis e totais, representando assim, uma continuação do processo de estabilização do lodo no leito de secagem.

6.2 MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS

Os resultados e discussão acerca das análises de microrganismos patogênicos estão apresentados separadamente nos tópicos 6.2.1, 6.2.2 e 6.2.3, a seguir.

6.2.1 Ovos viáveis de helmintos

A Tabela 24 apresenta os resultados referentes às análises de ovos viáveis de helmintos realizadas para cada leito, nas 4 repetições, meses de junho a setembro.

Tabela 24 - Resultados das análises de ovos viáveis de helmintos

Data	Tempo após a descarga (d)	Ovos viáveis de Helmintos (ovo/g de ST)			
		L1A	L1B	L2A	L2B
1ª Repetição					
09/06/2014	7	3,80	3,20	3,00	2,30
16/06/2014	14	0,00	0,00	1,00	1,40
23/06/2014	21	0,10	0,05	0,12	0,00
2ª Repetição					
07/07/2014	0	2,64	1,80	0,12	2,16
21/07/2014	14	0,08	0,34	0,22	0,23
28/07/2014	21	0,56	0,19	0,06	0,10
3ª Repetição					
04/08/2014	0	2,85	2,85	0,82	0,82
18/08/2014	14	0,00	0,09	0,08	0,00
25/08/2014	21	0,00	0,00	0,00	0,00
4ª Repetição					
09/09/2014	0	0,00	0,00	1,60	1,60
22/09/2014	14	0,00	0,00	0,00	0,00
29/09/2014	21	0,00	0,00	0,00	0,00

A partir dos resultados apresentados na Tabela 24, verifica-se que a média da concentração de ovos viáveis de helmintos no lodo da ETE Piaçu foi de 2,02 ovo/g de ST, sendo o desvio padrão de 1,21 ovo/g de ST. O valor médio apresentado na ETE Piaçu é bem inferior à concentração típica do Brasil, que conforme Jiménez (2007) é de 75 ovo/g de ST. Comparando com o valor médio de 2,83 ovo/g de ST apresentado por Lima et al. (2011), referente aos lodos brutos provenientes de

diferentes tipos de tratamento de esgoto localizados no Estado do Espírito Santo, a concentração encontrada na ETE Piaçu está condizente. Contudo, conforme US EPA (2003) e GODINHO (2003), a concentração de patógenos no lodo varia, principalmente, conforme a saúde da população atendida pelo sistema de esgotamento sanitário.

Avaliando os resultados obtidos, foi possível reduzir a concentração dos ovos viáveis de helmintos em 100% das amostras finais (21º dia após a descarga) dos leitos L2A e L2B, atendendo ao padrão limitado pela Resolução CONAMA 375/2006 (0,25 ovo/g de ST). Entretanto, analisando os resultados obtidos para os leitos L1A e L1B verifica-se que, apenas no mês de junho (segunda repetição), o leito L1A não atendeu ao limite estabelecido pela resolução. Assim, verifica-se que tanto a utilização de estufas com ou sem queima do biogás proporcionaram resultados satisfatórios para a redução de ovos viáveis de helmintos.

Ferreira (2001), conforme explicado no item 4.4, pesquisou a desidratação do lodo no leito de secagem através da utilização de estufa agrícola simples e com queima do biogás, com uma descarga inicial de lodo entre 30 a 36 cm e tempo de secagem de 28 dias. Os resultados mostraram que houve maior redução na concentração ovos viáveis de helmintos no leito coberto na estufa com biogás, entretanto o valor final não atendeu à resolução.

Lozer (2013) avaliou o decaimento de ovos viáveis de helmintos através utilização de estufas agrícolas apenas, com descarga de lodo sobre o leito de secagem em alturas de 25 e 35 cm. Contudo, após 28 dias de secagem, mesmo obtendo teores de umidade no lodo de 6,80% e 12,40% não foi possível atingir o limite de 0,25 ovos viáveis/g ST, explicado pelo não atendimento de outras condições fundamentais para a completa inviabilização dos ovos como temperatura e radiação solar.

Portanto, comparando com outras pesquisas já desenvolvidas acredita-se que o fator preponderante para a redução da concentração dos ovos viáveis de helmintos obtida nesse trabalho seja a altura da descarga do lodo no leito (15 cm) associado à utilização de estufas agrícolas, sendo que a queima do biogás proporcionaria uma maior redução caso a concentração inicial de ovos tivesse sido superior.

Dessa forma, observa-se que a metodologia adotada, principalmente em relação à altura de lodo aplicada sobre o leito de secagem, propiciou uma otimização do processo de desidratação do lodo, na qual a redução do parâmetro ovos viáveis de helmintos atendeu à concentração final limitada pela Resolução 375/2006 em apenas 21 dias de secagem.

6.2.2 *Salmonella*

A análise microbiológica do parâmetro *Salmonella sp.* foi realizada quanto à constatação de presença (P) ou ausência (A) da bactéria nas amostras, através de 4 repetições, nos meses de junho a setembro. Os resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados da análise de *Salmonella sp.*

Data	Tempo após a descarga (d)	<i>Salmonella sp.</i> (P ou A)				Umidade da amostra (%)			
		L1A	L1B	L2A	L2B	L1A	L1B	L2A	L2B
1ª Repetição									
09/06/2014	7	A	A	A	A	79,7	77,2	73,1	73,8
16/06/2014	14	A	A	A	P	64,4	60,4	50,3	46,6
23/06/2014	21	A	A	P	P	38,5	33,6	11,5	16,5
2ª Repetição									
07/07/2014	0	P	P	P	A	96,3	96,3	96,3	96,3
21/07/2014	14	A	A	P	P	66,4	67,4	54,4	54,4
28/07/2014	21	A	A	P	P	58,5	47,1	27,7	32,0
3ª Repetição									
04/08/2014	0	A	A	A	A	96,2	96,2	96,2	96,2
18/08/2014	14	P	P	P	P	63,2	56,2	36,7	41,4
25/08/2014	21	P	P	P	P	18,1	13,1	10,1	11,0
4ª Repetição									
09/09/2014	0	P	P	P	P	96,1	96,1	96,1	96,1
22/09/2014	14	P	P	P	P	47,4	41,6	32,4	29,4
29/09/2014	21	P	P	P	P	8,9	8,4	6,8	6,7

Conforme os resultados apresentados na Tabela 26, verifica-se uma grande variação quanto a presença e ausência de *Salmonella sp.* no lodo bruto da ETE Piaçu. Nos dias 09/06 e 04/08 em todas as amostras foram constatadas ausência de

Salmonella sp em 25g. Já nos dias 07/07 e 09/09, foi constatada a presença dessa bactéria na maioria das amostras, a exceção do Leito 2B do dia 07/07/14.

Avaliando os resultados, verifica-se que nos leitos 2A e 2B, em 100% das amostras finais de cada repetição (24/06, 28/07, 25/08 e 29/09) foi detectada a presença de *Salmonella sp*, mesmo quando na amostra inicial foi constatada ausência (09/06, 07/07 e 04/08). Isso pode ser explicado pelo fato de a temperatura máxima da massa de lodo não ter sido suficiente para a letalidade da bactéria das amostras iniciais. Ou seja, conforme apresentado na Tabela 17 (temperatura máxima do ar interno na estufa de 49,6°C), infere-se que a massa de lodo não alcançou 55°C por pelo menos 60 minutos de exposição, tempo necessário estabelecido por Ilhenfeld (1999) para letalidade dessas bactérias. Além disso, o aumento da temperatura na massa de lodo, através da queima do biogás, propiciou condições ambientais favoráveis para o recrescimento da *Salmonella sp*, uma vez que a temperatura do ar no Leito 2 variou de 23,2 a 49,6°C e a temperatura ideal para multiplicação de salmonellas é 35-37°C, sendo a mínima 5°C e a máxima 47°C (FRANCO et al., 1996).

Comparando os resultados disponíveis para os leitos com e sem queima do biogás, verifica-se que a temperatura da massa de lodo pode ser considerada o fator mais explicativo para a presença de *Salmonella sp*. ao final do processo de secagem do lodo. Isso porque, nos Leitos 1A e 1B as amostras finais das repetições realizadas no mês de junho e julho, apresentaram resultados negativos dessa bactéria, justamente quando foram medidas as menores temperaturas interna da estufa, sendo a média de 26,80 e 25,36°C respectivamente. Já nos meses de agosto e setembro, onde a média da temperatura interna da estufa dos Leitos 1A e 1B apresentou um aumento para 28,49 e 30,54°C respectivamente, foi detectada a presença de *Salmonella sp*. Já para os Leitos 2A e 2B, onde a temperatura média de junho a setembro esteve superior a 31°C, detectou-se a presença de salmonela nas amostras finais de cada repetição.

Outro fato importante de ser destacado é que mesmo com a expressiva redução da umidade das amostras, principalmente nos meses de setembro e agosto, foi detectada a presença de *Salmonella sp* tanto nos leitos com queima e sem queima do biogás. Conforme Comparini (2001) a presença de salmonela não seria

esperado, uma vez que esses organismos são, como outras bactérias, frágeis aos processos radiação solar e desidratação, o que corrobora para configurar um caso de recontaminação por agentes externos. Além disso, o autor explica que a origem das recontaminações pode ser devida a entrada de animais hospedeiros como pássaros, moscas e baratas no interior da estufa, ali depositando fezes contaminadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Comparini (2001) e Lozer (2013) em amostras com umidade de 10,58% e 6,8% respectivamente. Na pesquisa desenvolvida na ETE Piaçu, realmente percebeu-se a entrada de pássaros no interior das estufas.

A partir desses resultados, conclui-se que o calor proveniente da queima do biogás não foi suficiente para elevar a temperatura da massa do lodo e promover a letalidade da *Salmonella sp.*, ao contrário, propiciou condições favoráveis ao recrescimento dessas bactérias.

6.2.3 *Coliformes termotolerantes*

A Tabela 26 apresenta os resultados referentes às análises de coliformes termotolerantes realizadas em quatro repetições, nos meses de junho a setembro.

Os resultados apresentados na Tabela 26 mostram que não houve redução da concentração de coliformes termotolerantes de forma a atender ao padrão da Resolução CONAMA 375/2006 de 10^3 NMP/ g de ST. Ao contrário, houve um aumento na concentração de coliformes termotolerantes tanto nos leitos com queima (L2A e L2B) quanto nos sem queima (L1A e L1B), a exceção dos Leitos 1B e 2A na primeira repetição (mês de junho). Para avaliar se esse aumento foi estatisticamente significativo aplicou-se o teste de Wilcoxon, através do programa GrafPad Prism® versão 5.0 - 2007, sendo os valores de concentração convertidos em escala logarítmica para uma adequada aplicação do teste.

Tabela 26 - Resultados das análises de Coliformes Termotolerantes

Data	Tempo após a descarga (d)	Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)			
		L1A	L1B	L2A	L2B
1ª Repetição					
09/06/2014	7	3,30E+07	2,20E+07	3,50E+09	3,50E+08
16/06/2014	14	7,80E+06	1,70E+07	4,60E+07	4,90E+07
23/06/2014	21	1,70E+08	3,30E+06	4,90E+07	1,40E+08
2ª Repetição					
07/07/2014	0	7,80E+06	7,80E+06	4,50E+06	4,50E+06
21/07/2014	14	8,06E+05	1,14E+09	1,60E+09	2,46E+09
28/07/2014	21	4,60E+06	3,10E+07	7,00E+07	1,60E+09
3ª Repetição					
04/08/2014	0	1,33E+05	1,33E+05	6,08E+04	6,08E+04
18/08/2014	14	8,83E+05	4,82E+06	5,00E+07	1,23E+07
25/08/2014	21	1,39E+06	9,56E+05	9,89E+06	3,12E+07
4ª Repetição					
09/09/2014	0	1,37E+05	1,37E+05	5,07E+04	5,07E+04
22/09/2014	14	2,84E+06	2,04E+07	6,22E+07	1,69E+07
29/09/2014	21	1,55E+06	4,95E+06	5,04E+06	8,57E+06

Através da aplicação do teste de Wilcoxon, foi verificado que não houve diferença significativa entre as concentrações de coliformes termotolerantes no início e no fim da secagem, tanto para o leito com queima do biogás (p-valor 0,0781) e quanto para o leito sem queima (p-valor 0,0584). Ou seja, não se pode afirmar estatisticamente que houve crescimento dessas bactérias. Contudo, esse resultado pode ter sido não significativo devido ao número da amostra por tratamento (n=8).

Embora não tenha sido verificada a diferença significativa entre os valores de coliformes termotolerantes, percebe-se um aumento na concentração final principalmente em relação ao Leito 2 (Leitos 2A e 2B). Esse aumento na concentração de coliformes termotolerante, da mesma forma que os resultados de *Salmonella sp.*, deve-se ao fato de a temperatura máxima da massa de lodo não ter atingido valores suficiente para promover a letalidade dessas bactérias, e ao contrário, ter proporcionado condições favoráveis à sua multiplicação mesmo com os valores reduzidos de umidade no lodo.

Segundo Kone et al. (2007), a rápida redução dos teores de umidade da massa de lodo favorece a inativação dos microrganismos, mas não se configura fator suficiente para diminuição dos organismos patogênicos dos lodos de esgotos a níveis desejados.

A partir dos resultados obtidos dos microrganismos patogênicos monitorados, a hipótese 2 desse trabalho não foi atendida em sua totalidade, uma vez que para os parâmetros coliformes termotolerantes e *Salmonella sp.* o calor proveniente da queima do biogás, através da metodologia proposta, não foi suficiente para aumentar a temperatura da massa do lodo e, assim promover a redução dessas bactérias ao padrão de uso agrícola.

6.3 ANÁLISE PRELIMINAR DE CUSTOS PARA A METODOLOGIA ADOTADA

Uma vez que as análises de microrganismos mostraram que a metodologia implantada não é suficiente para higienizar o lodo para atingir aos padrões de aplicação na agricultura (Resolução CONAMA nº 375/2006), a análise preliminar de custos foi realizada utilizando a redução do peso e do volume de lodo, devido à redução de umidade.

6.3.1 Custos de implantação do experimento

Os recursos financeiros utilizados para a implantação do experimento estão dispostos no Quadro 11.

Quadro 11 - Recursos financeiros utilizados para a implantação do experimento

SERVIÇO	UNIDADE	QUANTIDADE	VALOR TOTAL
Tubulação de aço galvanizado	m	48	R\$ 582,77
Conexões aço galvanizado	PCT	1	R\$ 227,81
Estufas agrícolas	UN	2	R\$ 8.228,00
Rolo compressor de lodo	UN	1	R\$ 94,00
Sistema de queima do biogás ¹	UN	1	R\$ 6.350,00
Termo-higrômetro	UN	1	R\$ 474,00
Análises microbiológicas	PCT	1	R\$ 19.891,06

¹ Valor estimado pela empresa SANEVIX Engenharia, caso o serviço não tivesse sido realizado em parceria.

No valor estimado pela empresa SANEVIX Engenharia foram contemplados todos os custos do sistema implantado, como por exemplo: vela de ignição, cabo de ignição, selo hídrico, chapa dobrada de inox, chapa dobrada de alumínio, caixa de comando em PVC, mão de obra, transporte e alimentação dos empregados.

Conforme explicado, as análises microbiológicas não entraram no custo total do projeto; a mesma foi apresentada para expor a dimensão do seu valor em relação aos demais custos. Além disso, uma vez que o sistema de queima do biogás foi posto em apenas um leito, considerou-se o valor de uma estufa (R\$ 4.114,00) para compor o custo total a fim de se estimar a viabilidade do projeto implantado.

Dessa forma, o custo total de implantação para o projeto de utilização energética do biogás gerado na ETE Piaçu, considerando o aparato montado em apenas um leito de secagem, foi de **R\$ 11.842,58** (onze mil oitocentos e quarenta e dois reais e cinquenta e oito centavos).

6.3.2 Custos associados à disposição do lodo

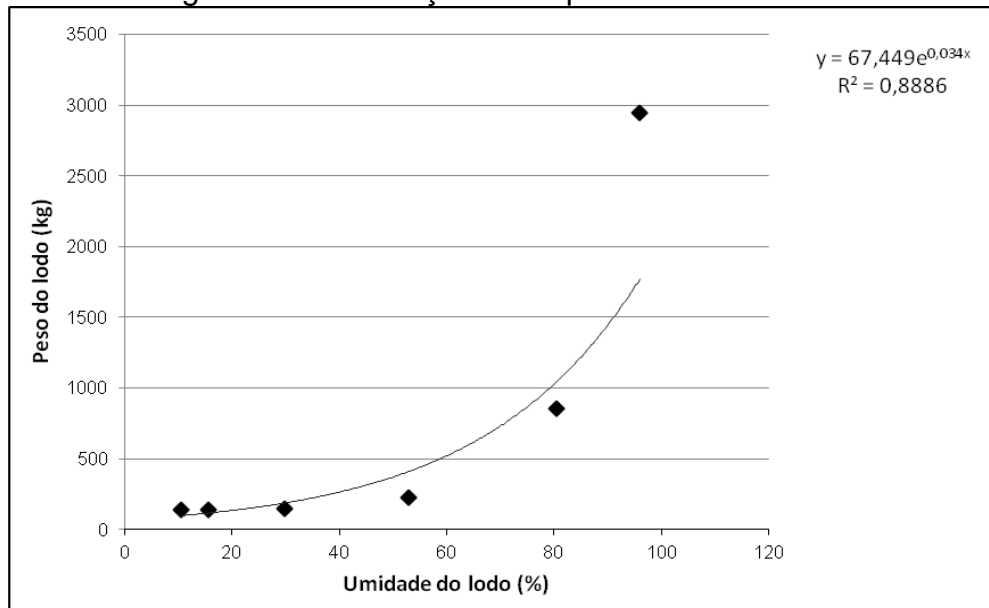
A partir da metodologia descrita no item 5.4.2, encontrou-se o peso do lodo, em kg, para cada valor de umidade considerada, conforme apresentado no Quadro 12, e determinou-se a relação entre peso e umidade do lodo (Figura 28).

Quadro 12- peso do lodo, em kg, para cada valor de umidade considerada.

Medida	Umidade %	Peso (kg)
1	96	2942,40
2	80	853,76
3	52,8	222,69
4	29,85	143,76
5	15,6	139,53
6	10,55	138,13

Fonte: Produção própria.

Figura 28 - Correlação entre peso e umidade do lodo



Fonte: Produção própria.

Conforme visualizado na Figura 28, a relação entre peso do lodo e umidade do lodo apresentou uma regressão exponencial com equação $y = 67,449 \cdot e^{0,034x}$, com coeficiente de regressão no valor de 0,8886.

O Quadro 13 apresenta os resultados obtidos para a geração de lodo antes da implantação do projeto (**situação “antes”**) e para a geração de lodo depois da implantação do projeto (**situação “depois”**).

Quadro 13 – Geração de lodo antes e após a implantação do projeto.

Parâmetros	Metodologia do cálculo	Situação	
		Antes	Depois
Umidade final do lodo (%)	-	60	15
Nº de descargas anual	uma descarga a cada 26 dias	14	14
Volume de lodo anual (m³)	Equação (6) considerando 14 descargas	6,22	1,11
Nº de caçambas anual	Equação (5)	1,24	0,22
Nº de caçambas a cada 4,0 anos	Nº de caçambas anual x 4	4,98	0,89

Fonte: Produção própria.

Conforme mostra o Quadro 13, foi encontrado um valor fracionado para o número de caçambas a serem destinadas ao aterro anualmente, na qual, depois da implantação

do projeto, o volume de lodo seco não foi suficiente para encher uma caçamba (0,22 caçambas). Uma vez que o transporte das caçambas de lodo é realizado quando as mesmas estão completamente cheias, verificou-se que a caçamba referente à situação “depois” precisaria de pelo menos 4 anos para encher parcialmente (0,89 caçambas).

Assim, para retratar de forma mais real e facilitar a estimativa dos custos associados à disposição do lodo da ETE Piaçu, foi considerada que em 4 anos de geração de lodo, a situação “antes” encheria 5 caçambas e a situação “depois” encheria 1 caçamba. O Quadro 14 apresenta os custos associados ao transporte e disposição do lodo da ETE Piaçu considerando o volume gerado no período de 4 anos.

Quadro 14 - Custos associados ao transporte e disposição do lodo da ETE Piaçu

Parâmetros	Metodologia do cálculo	Situação	
		Antes	Depois
Umidade Final (%)	-	60	15
Peso Total (t)	Equação (6)	29,25	6,31
Custo com Transporte (CT)	Equações (1) e (2)	R\$ 11.056,10	R\$ 2.211,22
Custo com Disposição (CD)	Equações (3) e (4)	R\$ 3.498,88	R\$ 754,23
Custo Total (CT + CD)	Equações (7) e (8)	R\$ 14.554,98	R\$ 2.965,45

Fonte: Produção própria.

A partir das estimativas de custos apresentadas no Quadro 14, observa-se uma significativa redução dos valores referentes ao transporte e à disposição do lodo em aterro após a implantação do projeto de utilização energética do biogás. Essa redução final deve-se tanto pelo menor número de caçambas enviadas ao aterro, que se localiza a uma distância de 253 km, quanto pelo menor peso do lodo em decorrência da redução da umidade.

Comparando a situação antes e depois da implantação do projeto, em 4 anos, obteve-se uma redução no valor de R\$ 11.589,53 reais com a disposição adequada do resíduo, representando uma economia de cerca de 80% ao longo desse período.

No intuito de verificar, de forma simplificada, o tempo de retorno do investimento realizado, elaborou-se o Quadro 15. O Custo Total com disposição do lodo

encontrado no Quadro 15 foi anualizado, ou seja, dividido por 4, de forma a verificar o tempo necessário para se obter o retorno financeiro do investimento realizado.

Quadro 15 – Tempo de retorno do investimento realizado.

Parâmetros	Valores
Valor Anualizado do Custo Total "antes"	R\$ 3.638,74
Valor Anualizado do Custo Total "depois"	R\$ 741,36
Redução anual dos custos com disposição	R\$ 3.085,94
Custos de implantação do Projeto (para um leito de secagem)	R\$ 11.842,58
Tempo de retorno do investimento (anos)	4,09

Fonte: Produção própria.

O Quadro 15 mostra que o retorno financeiro do investimento será obtido em 4,09 anos (4 anos e 1 mês), ou seja o sistema de utilização energética do biogás para a secagem do lodo se paga em aproximadamente 4 anos. Uma vez que esse tempo é curto demonstra-se, portanto, a viabilidade econômica da metodologia proposta tendo em vista que, por ano, haveria uma redução de cerca de 80% dos custos com disposição adequada do lodo da ETE Piaçu, em relação aos valores cotados em 2014.

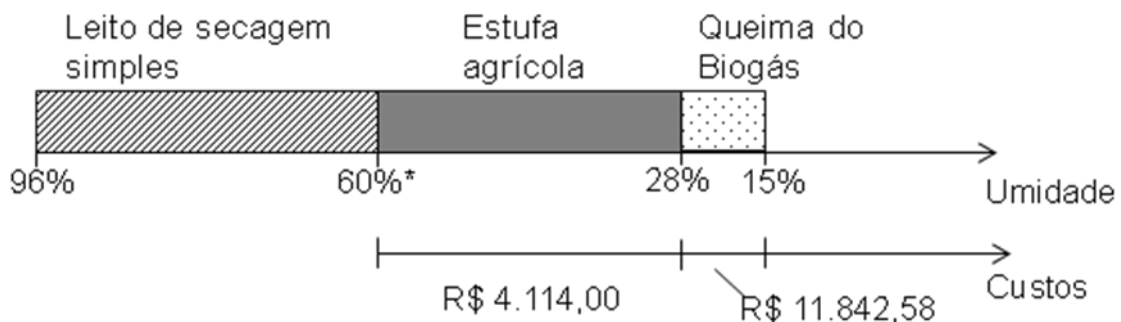
Através dos resultados mostrados nos Quadros 14 e 15, observa-se que o maior custo com disposição adequada do lodo está relacionado ao transporte desse resíduo ao aterro sanitário, 75% do valor total estimado. Assim, quanto maior a distância entre a ETE e o aterro, maior serão os gastos com transporte e, caso se adote a queima do biogás para desidratação do lodo, menor será o tempo de retorno do investimento realizado. Portanto, verifica-se que a distância entre a ETE e o aterro é um fator de grande relevância nos cálculos da viabilidade econômica.

Além da redução dos custos financeiros, a implantação do projeto de utilização do calor proveniente da queima do biogás facilitou a operação de retirada do lodo do leito de secagem, tendo em vista a significativa redução do peso e volume deste resíduo. Antes da implantação do projeto, a partir das equações de correlação apresentadas no item 5.4.2 estima-se que, por descarga, ao final dos 21 dias de secagem, o lodo apresentava um peso em torno de 520 kg (com 60% de umidade), em contrapartida, depois do projeto o peso do lodo passou para cerca de 110 kg

(com 15% de umidade). Uma vez que, na ETE Piaçu, a retirada do lodo do leito de secagem é realizada de forma manual, a redução do peso do lodo em aproximadamente 78%, traz melhor segurança e agilidade ao operador nesta atividade.

Aliando os resultados de umidade obtidos com os custos de implantação do projeto foi elaborada a Figura 29 que representa a redução da umidade, ao final dos 21 dias, considerando os tratamentos utilizados, nessa pesquisa, para a secagem do lodo e os custos financeiros associados.

Figura 29 - Redução da umidade, ao final dos 21 dias, considerando diferentes tipologias para a secagem do lodo e os custos financeiros associados.



* umidade conforme literatura técnica

Fonte: Produção própria.

Verifica-se que com leito de secagem simples, conforme literatura técnica, obtêm-se um lodo com uma umidade média de 60%, entretanto diante dos resultados médios de umidade desta pesquisa na ETE Piaçu, acrescentando estufa agrícola para cobrir o leito de secagem, a umidade final aos 21 dias pode ser reduzida para 28% a um custo de apenas R\$ 4.114,00 reais. Entretanto, verificou-se que é possível reduzir ainda mais essa umidade, para um valor de 15%, caso seja acrescentada a queima do biogás no interior da estufa, com um investimento total de R\$11.842,58 reais.

Dessa forma, como uma metodologia a ser replicada em outras ETEs, fica critério do responsável pelo gerenciamento dos resíduos da ETE, após avaliar as questões

operacionais, financeiras e ambientais, tomar a melhor decisão no que concerne à tipologia de secagem a ser adotada para cada situação.

6.3.3 Alteração da rotina de operação da ETE Piaçu

A ETE Piaçu é um sistema de pequeno porte e, portanto as atividades operacionais de rotina estão apresentadas no Quadro 16. Após a finalização do experimento, devido à implantação do projeto de utilização de biogás na ETE Piaçu, algumas atividades foram acrescentadas à rotina de operação. As mesmas estão descritas no Quadro 17.

Quadro 16 - Atividades operacionais de rotina da ETE Piaçu.

FREQUÊNCIA	ATIVIDADE	TEMPO GASTO	COMPLEXIDADE
A cada 01 h - 9 vezes ao dia	Medir vazão no vertedor	05 min	muito baixa
A cada 01 h - 9 vezes ao dia	Medir temperatura do afluente/efluente e Reator	05 min	muito baixa
1 vez ao dia	Limpar grades do tratamento preliminar	40 min	baixa
	Limpar e fazer manutenção do pátio e do laboratório	30 min	baixa
	Lavar o biofiltro 1	10 min	média
	Lavar o biofiltro 2	10 min	média
	Lavar o decantador	5 min	média
2 vezes ao dia	Realizar análises de sólidos sedimentáveis	10 min	baixa
	Limpar a espuma do UASB	40 min	baixa
3 vezes ao dia	Limpar o filtro	05 min	baixa
3 vezes ao mês	Verificar tomada de lodo	10 min	média
1 vez ao mês	Dar descarga do lodo do UASB no leito de secagem	30 min	média
	Limpar a calha de distribuição	40 min	baixa
	Coletar amostra do afluente e efluente da ETE e a montante e a jusante do corpo receptor	50 min	média
	Limpar os leitos de secagem	60 min	média
	Limpar a caixa de areia da elevatória de esgoto bruto	60 min	alta

Fonte: Produção própria.

Quadro 17 - Atividades acrescidas à rotina de operação da ETE Piaçu.

ATIVIDADE	FREQUÊNCIA	TEMPO GASTO	COMPLEXIDADE	DESCRIÇÃO/OBSERVAÇÃO
Abrir o registro de biogás	1 vez ao dia (no início do expediente)	5 min	muito baixa	Direcionar o fluxo de biogás para os queimadores dentro da estufa.
Acionar a queima do biogás	1 vez ao dia (no início do expediente)	5 min	muito baixa	Apertar o botão de ignição automática dos queimadores
Fechar o registro de biogás	1 vez ao dia (no fim do expediente)	5 min	muito baixa	Direcionar o fluxo de biogás para o queimador localizado no UASB
Verificar a queima do biogás	2 vezes ao dia	5 min	baixa	Verificar se todos os queimadores estão com o biogás queimando.
Medir temperatura interna da estufa e preencher planilha de operação	1 vez ao dia	10 min	baixa	Medir com termômetro a temperatura interna da estufa e em seguida preencher a planilha de operação da ETE.
Desfazer os torrões de lodo com o rolo compressor e revolver o lodo	2 vezes ao mês	1 h	média	Na 3ª semana após a descarga do lodo, passar o rolo compressor sob os torrões para desfazê-los. Necessita de um pouco de força.
Desentupir os bicos de passagem de biogás dos queimadores.	1 vez ao mês	1 h e 20 min	baixa	Retirar os chapéus-chineses da linha de biogás, retirar os bicos de passagem do biogás e limpá-los. Recolocar as peças em seu lugar de origem.
Limpar os chapéus-chineses dos queimadores.	1 vez a cada 2 meses	1 h	baixa	Retirar os chapéus-chineses e remover a crosta de cinzas que se forma nos mesmos.
Coletar amostras de lodo	a definir	1 h e 10 min	baixa	Essa atividade só será realizada caso seja optado por adotar o procedimento de monitoramento da qualidade do lodo.

Fonte: Produção própria.

Comparando as atividades listadas antes e após a implantação do projeto, verifica-se que não houve alteração significativa nas atividades de rotina de operação da ETE Piaçu, sendo as atividades acrescidas, em sua maioria, de baixa complexidade, com pouca demanda de tempo e algumas com baixa frequência de realização.

Importante enfatizar que para o sucesso da operação do sistema de utilização do biogás, o operador da ETE deve receber treinamento adequado para o desempenho das novas atividades.

Avaliando os 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3, verifica-se que a metodologia adotada é técnica, ambiental e economicamente viável, atestando, portanto, a hipótese 3 deste trabalho.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos na pesquisa conclui-se que:

A metodologia adotada nesta pesquisa, para utilização energética do biogás na forma de calor, propiciou uma diferença significativa entre a temperatura do ar no interior da estufa com queima do biogás e no interior da estufa simples, atingindo respectivamente a valores máximos de 49,6°C e 38,5°C. Proporcionou também uma diferença significativa entre a umidade do ar no interior da estufa com queima do biogás e no interior da estufa simples, no qual a estufa com queima do biogás apresentou valores menores de umidade do ar. A combinação dos dois fatores na estufa com queima do biogás, maior temperatura e menor umidade do ar, proporcionou maior circulação do ar, favorecendo uma aceleração no processo de redução da umidade do lodo.

Em relação aos teores de umidade, os valores encontrados para o leito com queima do biogás (média de 15%) foi significativamente menor que os do leito sem queima (média de 28,3%). Quando os meses monitorados foram agregados em junho/julho e agosto/setembro essa diferença ficou mais nítida: o leito sem queima apresentou, respectivamente, umidade média de 44,43% e 12,13%, enquanto o leito com queima apresentou valores de 21,93% e 8,65%.

Para os parâmetros microbiológicos, verificou-se a inativação dos ovos viáveis de helmintos em apenas 21 dias de secagem e, comparando com outras pesquisas já desenvolvidas, conclui-se que a metodologia adotada, principalmente em relação à altura de lodo aplicada, propiciou uma otimização do processo de secagem do lodo, na qual a redução deste parâmetro atendeu à concentração final limitada pela Resolução CONAMA nº 375/2006. Contudo, conclui-se que para *Salmonella sp* e coliformes termotolerantes, o calor proveniente da queima do biogás não foi suficiente para elevar a temperatura da massa do lodo e promover a letalidade desses microrganismos ao final dos 21 dias de secagem, ao contrário, propiciou condições favoráveis ao recrescimento dessas bactérias.

Verificou-se que a distância entre a localização da ETE e do aterro sanitário é um fator de grande relevância nos cálculos da viabilidade econômica e, no caso da ETE Piaçu, apenas o valor do transporte do lodo até o aterro abrangeu 75% do custo total

estimado para disposição adequada. Tendo em vista que no Espírito Santo existem poucos aterros licenciados e estruturados para receber o lodo das ETEs localizadas nos municípios do interior do Estado, é de extrema importância a replicação dessa metodologia para outras ETEs de forma a reduzir os custos das concessionárias de saneamento referentes à disposição adequada do lodo.

Avaliando a viabilidade da metodologia adotada na ETE Piaçu:

- foi demonstrado, através de uma análise preliminar de custos, que o retorno financeiro do investimento será obtido em aproximadamente 4 anos, atestando a viabilidade econômica da metodologia proposta para a utilização energética do biogás uma vez que, considerando os valores anualizados, haveria uma redução de cerca de 80% dos custos com disposição adequada do lodo da ETE Piaçu.
- conclui-se que, com a metodologia implantada, não há mudanças significativas que impactem o desempenho dos trabalhos de rotina operacional de uma ETE de pequeno porte, e as atividades incluídas, podem ser desenvolvidas pelo próprio operador da ETE. Além disso, devido à redução do peso e volume do lodo a ser retirado do leito de secagem, presencia-se uma melhoria operacional proporcionando maior segurança e agilidade para operador ao desempenhar essa atividade. Dessa forma, demonstra-se à viabilidade técnica da metodologia proposta.
- na concepção de se alcançar a sustentabilidade no tratamento do esgoto, mostrou-se que é possível utilizar o subproduto biogás no processo de secagem do lodo, na qual obteve-se redução volume de resíduo enviado ao aterro sanitário em 82%. Atestando assim, a viabilidade ambiental da metodologia proposta.

Dessa forma, esse trabalho atingiu ao seu objetivo geral uma vez que apresentou uma metodologia técnica, ambiental e economicamente viável de utilização energética do biogás para ETEs de pequeno porte. Além disso, os resultados demonstraram atendimento integral às hipóteses 1 e 3 e parcial à hipótese 2.

Devido aos resultados não confirmatórios da hipótese de higienização levantada, recomenda-se realizar os ajustes no projeto abaixo listados.

- Ajustes na estrutura da estufa de modo a promover um maior aumento da temperatura interna do ar, como por exemplo, redução da altura da estufa. Conforme pode ser constatado no Apêndice C, diversos ajustes foram realizados no experimento de forma aumentar a temperatura do ar ambiente, e conseqüentemente da massa do lodo, e de maneira a se obter uma temperatura homogênea no interior da estufa.
- Ajustes no fornecimento de biogás para a queima:
 - Remoção de sulfeto de hidrogênio na linha do biogás;
 - Aumento da pressão do biogás através da implantação de um gasômetro;
 - Aumento do número de queimadores sob o leito de secagem.

Caso se opte por não desenvolver os ajustes sugeridos anteriormente no intuito de alcançar a higienização do lodo para aplicação agrícola, como continuação desse trabalho, recomenda-se o desenvolvimento de:

- pesquisas referentes à incineração do lodo seco (pela queima do biogás) para geração de energia e
- legislação estadual para aplicação do lodo em áreas diferentes que a agricultura como, por exemplo, áreas de reflorestamento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1696-1708, 2012.
- ALVES, J. W. S. **Diagnóstico Técnico Institucional da recuperação e uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos**. 2000. 151f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012. 724 p.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; BORGES, E. S. M. Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás. In: CASSINI, S.T. (Coord.). **Digestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Vitória: Rima Artes e Textos, 2003, p. 121-165.
- ANDREOLLI, C. V.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. v. 6, 484 p.
- APPELS, L.; LAUWERS, J.; DEGRÈVE, J.; HELSEN, L.; LIEVENS, B.; WILLEMS, K.; VAN IMPE, J.; DEWIL, R. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295-4301, 2011.
- ARTHUR, R.; BAIDOO, M. F.; BREW-HAMMOND, A.; BENSAH, E. C. Biogas generation from sewage in four public universities in Ghana: A solution to potential health risk. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 3086-3093, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007: amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.
- BORGES, E. S. M. Tratamento térmico de lodo anaeróbico com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n. 3, p. 337-346, 2009.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014.164 p. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=103>>. Acesso em: 16 out. 2014.

- BUDZIANOWSKI, W. M. Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 342-349, 2012.
- BUX, M.; BAUMANN, R.; QUADT, S.; PINNEKAMP, J.; MÜHLBAUER, W. VOLUME REDUCTION AND BIOLOGICAL STABILIZATION OF SLUDGE IN SMALL SEWAGE PLANTS BY SOLAR DRYING. **Drying Technology**, v. 20, n. 4/5, p. 829, 2002.
- CAO, Y.; PAWŁOWSKI, A. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1657-1665, 2012.
- CARRINGTON, E. G. **Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001. 52p. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge_eval.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2013.
- CASSINI, S. T.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDREOLI, C. V.; FRANÇA, M.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R.F. Hidrólise e atividade anaeróbia em lodos. In: CASSINI, S.T. (Coord.). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Vitória: Rima Artes e Textos, 2003, p. 11-52.
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução Nº 375, de 29 de agosto de 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2013
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma Técnica L5.218**. Salmonella - isolamento e identificação: método de ensaio. São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/servicos/normas/pdf/L5218.pdf>>. Acesso: 02 abr 2014.
- CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Reatores anaeróbios de manta de lodo. In: CAMPOS, J.R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: Rima Artes e Textos, 1999, p. 155-198.
- CHONG, S.; SEN, T. K.; KAYAALP, A.; ANG, H. M. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment – A State-of-the-art review. **Water Research**, v. 46, n. 11, p. 3434-3470, 2012.
- COMPARINI, J. B. **Estudo do decaimento de patógenos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola**. 2001. 278f.

Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politecnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

- CORREIA, J. E. **Caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto contorno: Feira de Santana, BA.** 2009. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental. Orientadoras:) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA. 2009.
- COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources.** 1ª Ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- DIAS, E. H. O. **Tratamento de lodo de esgoto por secagem em estufa: higienização e produção de biossólidos para uso agrícola.** 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.
- ELLER, C. M. **Caracterização dos compostos traços influentes no aproveitamento energético do biogás gerado em reator UASB no tratamento de esgoto doméstico.** 2013. 81f. (Mestrado em Poluição do Ar) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES.
- ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado de Economia e Planejamento. **Espírito Santo 2025: Plano de desenvolvimento.** 2006. Vitória: GSA Gráfica e Editora, 2006.
- EUROPEAN COMMISSION. Disposal and recycling routes for sewage sludge. **Part 3 - Scientific and technical report.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001. 70p. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge_disposal3.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2013.
- FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C.P. Manual prático para a compostagem de biossólidos. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 84p.
- FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento e disposição final.** Curitiba: Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda, 2001, p. 29-55.
- FERREIRA, A. C. **Monitoramento da secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem com uso de estufa plástica e biogás.** 2001. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curitiba, PR. 2001.

- FONT, R.; GOMEZ-RICO, M. F.; FULLANA, A. Skin effect in the heat and mass transfer model for sewage sludge drying. **Separation and Purification Technology**, v. 77, n. 1, p. 146-161, 2011.
- FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos Alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1996. 182p.
- FRIJNS, J.; HOFMAN, J.; NEDERLOF, M. The potential of (waste)water as energy carrier. **Energy Conversion and Management**, v. 65, n. 0, p. 357-363, 2013.
- GODINHO, V. M. **Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de *Ascaris* sp em lodos anaeróbios *in natura* e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico**. 2003. 122 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- GONÇALVES, R. F.; RAMALDES, D. L. C.; LIMA, M. R. P. Uso de leite de secagem para desidratação de lodo de reatores UASB na região sudeste do Brasil. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6., 2002, Vitória. **Anais eletrônico...** Disponível em: < <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/ncuat.pdf> >. Acesso em: 01 ago. 2013.
- GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A.C.; TELES, C.R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C.V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1.ed. Rio de Janeiro: RiMa Artes e Textos, 2001. p. 57 – 86.
- GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007, p.159 – 259.
- ILHENFELD, R. G. K. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Org). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: Prosab, 1999, p. 27 – 40.
- JIMÉNEZ, B. Helminth ova control in sludge: a review. **Water Science and Technology**, v. 56, n. 9, p.147-155, 2007.
- JORDÃO, E. P; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3ª ed. ABES, 681 p., Rio de Janeiro, RJ, 1995.
- _____. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 5ª ed. ABES, 940 p., Rio de Janeiro, RJ, 2009.

- KALDERIS, D.; AIVALIOTI, M.; GIDARAKOS, E. Options for sustainable sewage sludge management in small wastewater treatment plants on islands: The case of Crete. **Desalination**, v. 260, n. 1–3, p. 211-217, 2010.
- KONÉ, D.; COFIE, °; ZURBRUGG, C.; GALLIZZI, K.; MOSER, D.; DRESCHER, S.; STRAUSS, M. Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates. *Water Research*, v. 41, p. 4397-4402, 2007.
- LATIF, M. A.; GHUFRAN, R.; WAHID, Z. A.; AHMAD, A. Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket reactor for the treatment of wastewaters. **Water Research**, v. 45, n. 16, p. 4683-4699, 2011.
- LIMA, M. F.; MATTOS, C. N.; VIEIRA, P. L. C.; ALMEIDA, L. F. Geração de lodo de esgoto e seu potencial como fonte de matéria orgânica para a agricultura. In: COSTA, A. N.; COSTA, A.F.S. **Manual de uso agrícola e disposição do lodo de esgoto para o estado do Espírito Santo**. Vitória: Incaper, 2011, p. 11 – 17.
- LIMA, M. R. P. Uso de estufa agrícola para secagem e higienização do lodo de esgoto. 2010. 284f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- LIU, X.; GAO, X.; WANG, W.; ZHENG, L.; ZHOU, Y.; SUN, Y. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction. **Renewable Energy**, v. 44, p. 463-468, 2012.
- LOBATO, L.C.S.; CHERNICHARO, C. A. L.; PUJATTI, F. J. P.; MARTINS, O. M.; MELO, G. C. B. Utilização de biogás de reatores anaeróbios para cogeração e uso de eletricidade e calor em estações de tratamento de esgoto doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26º, 2011, Porto Alegre, RS. **Anais...Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2011. CD, XI-025.
- LOZER, J. G. **Desaguamento e higienização de lodo de esgoto utilizando estufa agrícola sobre leitos de secagem**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- LUSTE, S.; LUOSTARINEN, S. Anaerobic co-digestion of meat-processing by-products and sewage sludge – Effect of hygienization and organic loading rate. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 8, p. 2657-2664, 2010.
- MA, X.-W.; WENG, H.-X.; SU, M.-H.; PAN, L. Drying sewage sludge using flue gas from power plants in China. **Environ Earth Sci**, v. 65, n. 6, p. 1841-1846, 2012.
- MAGHANAKI, M. M.; GHOBADIAN, B.; NAJAFI, G.; GALOGAH, R. J. Potential of biogas production in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, n. 0, p. 702-714, 2013.

- MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de ETEs na agricultura: Estudo de caso Município de Rio das Ostras – RJ.** 2001. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro.
- MENDONÇA, L.C. **Desidratação térmica e desinfecção química com cal de lodo de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando esgotos sanitários.** 1999. 130f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1999.
- MEYER, K.B.; MILLER, K.D.; KANESHIRO, E.S. Recovery of Ascaris eggs from sludge. **Journal Parasitology**, v.64, n.2, p.380-383, 1978.
- PEDROZA, E. C. L.; MOREIRA, E. A.; CAVALCANTI, P. F. F.; ALEM SOBRINHO, P.; ANDREOLI, C. V.; HAANDEL, A. V. Aplicação de leitos para secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Org). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** 1 ed. Curitiba: Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda, 2006, p. 109-158.
- PERCORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP - Estudo de caso.** 2006. 152f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- PINTO, M.T. Higienização de lodos. In: ANDREOLLI, C. V.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. p.261 - 297.
- POSETTI, G. R.C.; JASINSKI, V. P.; ANDREOLI, C. V.; BITTENCOURT, S.; Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para etes de médio e pequeno porte In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15º, 2011, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011. CD, II-099.
- RAO, P. V.; BARAL, S. S.; DEY, R.; MUTNURI, S. Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 2086-2094, 2010.
- ROMDHANA, M. H.; LECOMTE, D.; LADEVIE, B.; SABLAYROLLES, C. Monitoring of pathogenic microorganisms contamination during heat drying process of sewage sludge. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 87, n. 6, p. 377-386, 2009.
- SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101-1107, 2009.
- SANEVIX. **Databook ETE Piaçú- Muniz Freire/ES.** 2011

- SEADI, T. A.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogás handbook**. Denmark: Teodorita Al Seadi, 2008. ISBN 978-87-992962-0-0. 125p.
- TAO, T.; PENG, X. F.; LEE, D. J. Skin layer on thermally dried sludge cake. **Dry Technol.**, v. 24, n. 8, p. 1047-1052, 2006.
- TAUSEEF, S. M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, n. 0, p. 704-741, 2013.
- TEBBUTT, T. H. Y. 18 - Sludge dewatering and disposal. In: (Ed.). **Principles of Water Quality control (Fifth Edition)**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. p.223-237. ISBN 978-0-7506-3658-2.
- TEIXEIRA, R. A.; LIMA, M. R. P. Determinação da densidade de lodo anaeróbio gerado em estações de tratamento de esgoto doméstico. In: Jornada de Iniciação Científica, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do Ifes, 7º, 2011, Vitória, ES. **Anais eletrônico...** Disponível em: <http://pse.ifes.edu.br/prppg/pesquisa/jornadas/jornada_2011_2012/anais/anais.htm>. Acesso em: 20 set 2014.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Process design manual. **Land application of sewage sludge and domestic septage**. Washington, 1995. 290p.
- _____. Environmental Regulations and Technology. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge**. Cincinnati, 2003. 177p.
- VAN HAANDEL, A. C; ALEM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. 1ª Ed. Curitiba: Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda, 2006, p. 7-28.
- VAN HAANDEL, A. C; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande, 1994. 240p.
- VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996. 211 p.
- _____. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. 452p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA DO AR

DIA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
JUNHO/2014														
3/6	9:00	NUBLADO	21,1	23,6	23,6	22,8	23,3	29,1	27,6	24	26,9	74,2	65,2	63,5
3/6	11:00	SOL	25,5	31,8	31,2	30,7	31,2	35,7	33,6	32,1	33,8	60,1	59,7	59
3/6	14:00	NUBLADO	24,9	24,6	24,2	24,2	24,3	27,8	26,3	26,3	26,8	65,2	64	59,7
3/6	16:00	NUBLADO	24,5	23,1	22,7	22,9	22,9	25,9	24,7	23,3	24,6	80,2	66,6	65,8
4/6	9:00	NUBLADO	19,8	23,5	22,8	22,6	23,0	30,4	26	24,3	26,9	67,7	68,5	59,7
4/6	11:00	NUBLADO	22,9	24,7	24,1	23,9	24,2	30,6	28,7	26,8	28,7	76,8	64,8	63,7
4/6	14:00	SOL	26,5	29,3	29,2	26,3	28,3	36,8	33,6	33,3	34,6	60,6	69,4	49,9
4/6	16:00	NUBLADO	22,5	25,5	24,9	24,2	24,9	32,1	31,2	31,8	31,7	68,1	71,7	57,4
5/6	9:00	SOL	24,4	27,4	26,2	25,8	26,5	31,6	29,6	30,8	30,7	60,5	56,3	47,5
5/6	11:00	SOL	27	31,9	31	29,1	30,7	37,3	35,9	33,1	35,4	53,8	51,9	50
5/6	14:00	SOL	26,8	32,7	32	32	32,2	41,1	38,9	38,8	39,6	54,8	54,1	46,7
5/6	16:00	SOL	26,9	24	23,8	23,8	23,9	28,8	27,6	27,5	28,0	74,1	70,4	62,5
6/6	9:00	SOL	23,9	26,6	25,2	25,8	25,9	30,2	29,2	28,8	29,4	62,4	60,4	62,1
6/6	11:00	SOL	28,2	31,8	30,3	28,2	30,1	35,6	34,1	36,6	35,4	56,6	53,4	43,5
6/6	14:00	SOL	27,6	30,3	30	28,7	29,7	37	36	34,8	35,9	53,4	55,8	48,2
6/6	16:00	SOL	26,7	26,6	26,7	25,7	26,3	31,3	30,6	30,9	30,9	59,8	68	51,2
9/6	9:00	SOL	25,3	27,7	26,3	26,9	27,0	33	30,9	31,6	31,8	61,2	55,8	46,8
9/6	11:00	SOL	27,5	30,9	28,7	29,3	29,6	38,4	36,8	37,1	37,4	57,2	53,8	45
9/6	14:00	SOL	28,1	30,3	27,9	28,9	29,0	38,2	37,7	35,2	37,0	60,1	55,5	49,4
9/6	16:00	SOL	24,6	25,9	26	25,2	25,7	35	33,1	33,1	33,7	70,4	66,3	50,2
10/6	9:00	NUBLADO	24,5	25,7	25,5	25,1	25,4	32,5	30,6	28,9	30,7	76,9	71,6	67,5
10/6	11:00	NUBLADO	25,4	27,1	26,3	26,3	26,6	34,1	32,4	31,9	32,8	76	68,3	59,9
10/6	14:00	NUBLADO	26,8	26,4	26,1	25,7	26,1	36,2	36,4	35,8	36,1	71,3	65,3	52,6
10/6	16:00	SOL	25,5	24,6	24,5	24,2	24,4	31,7	29,7	29,4	30,3	77,2	71,6	59,5
11/6	9:00	SOL	23,4	29,8	28,5	29,6	29,3	38,9	37,4	36,7	37,7	57,7	51,8	46,6
11/6	11:00	SOL	26	31,9	32,6	30	31,5	36,1	35,4	34,2	35,2	67,9	60	44,7
11/6	14:00	NUBLADO	25,6	24,9	24,8	24,7	24,8	30,7	30,2	29,9	30,3	74,6	68,3	55,9
11/6	16:00	CHUVA	22,1	23,8	23,6	23,6	23,7	32,4	30,6	31,3	31,4	79,8	77,8	64,2
12/6	9:00	NUBLADO	22,1	23,7	23	23,4	23,4	33,6	29,7	29,8	31,0	74,3	77,1	61,2

DIA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
12/6	11:00	NUBLADO	25,5	28,3	28,1	27,7	28,0	35,8	34,8	34,7	35,1	64,3	57,5	48,9
13/6	9:00	SOL	20,1	22,2	21,2	21,5	21,6	30,4	30,4	29,8	30,2	63,3	70,6	60
13/6	11:00	SOL	25,9	29,3	27,7	27,1	28,0	38,9	38,1	37,8	38,3	64,8	51,4	48,5
13/6	14:00	NUBLADO	24,5	27,2	26,4	26,6	26,7	35,8	34,5	34,2	34,8	64,1	57,8	51,1
13/6	16:00	NUBLADO	23,3	24,2	24,1	23,7	24,0	33,4	31,8	32,4	32,5	74,3	73,8	59,4
16/6	9:00	SOL	18,9	25,4	24,1	25,6	25,0	31,4	28,9	29,4	29,9	75	66,9	57,8
16/6	11:00	SOL	27,2	33,2	33,5	33,4	33,4	39,9	38,2	37,6	38,6	62,2	55,1	48,4
16/6	14:00	SOL	26,5	33,9	33	33,2	33,4	40,2	39	37,4	38,9	52,3	43,4	38,7
16/6	16:00	SOL	26,4	30,1	29,8	28,7	29,5	36,9	34,3	33,3	34,8	55,5	55,5	44,9
17/6	9:00	SOL	22,1	28,2	27,8	28,1	28,0	36,5	33,5	35,3	35,1	73,7	66,9	55,3
17/6	11:00	SOL	25,9	35,3	34,7	33,8	34,6	42,4	38,5	40,9	40,6	62,4	49,8	45,7
17/6	14:00	SOL	26,8	34,8	34,1	35,8	34,9	43,5	39,3	41,4	41,4	50	47,9	43,9
18/6	9:00	SOL	23,6	27,5	27,1	28,2	27,6	36,7	34,6	35,5	35,6	66	61,5	48,5
18/6	11:00	SOL	25,4	31,4	30,4	30,1	30,6	40,5	39,8	39,7	40,0	55,8	54,3	52,2
18/6	14:00	NUBLADO	24,3	27,1	27,5	26,4	27,0	36,6	35	34,8	35,5	65,4	61,9	54,3
18/6	16:00	NUBLADO	22,4	25	25,1	24,8	25,0	34,2	33	33,6	33,6	67,7	66,5	57,7
19/6	9:00	NUBLADO	21,7	23,6	22,9	23,2	23,2	30,8	28,7	29,4	29,6	78,5	70,9	67,7
19/6	11:00	NUBLADO	22,5	24,5	24	24,3	24,3	33,3	30,7	30,9	31,6	75,8	68,5	62,7
19/6	14:00	NUBLADO	23,8	26,2	24,9	25,7	25,6	35,7	34,1	35	34,9	70,8	64,8	60,2
19/6	16:00	NUBLADO	22	23,5	22,7	22,2	22,8	34,1	32,5	32,8	33,1	73,2	68,1	65,5
20/6	9:00	NUBLADO	19,2	20,4	20,7	20,7	20,6	27,4	25,6	26,5	26,5	81,5	85,2	71,7
20/6	11:00	NUBLADO	20,6	24,1	24,2	23,8	24,0	32,6	30,6	31,2	31,5	77,2	70,9	61,5
20/6	14:00	SOL	22,8	29,6	29,1	28,4	29,0	37,8	35,1	36,3	36,4	57,7	51,8	51,4
20/6	16:00	NUBLADO	19,4	23,1	22,8	22,8	22,9	31	27,7	29,4	29,4	75,1	71,9	64,8
23/6	9:00	SOL	22,2	26,5	26	27,5	26,7	34,4	32,9	32,2	33,2	44,2	43,2	37,5
23/6	11:00	NUBLADO	23,7	25,2	24,4	25,2	24,9	32,1	29,7	30,1	30,6	58,9	56	49,1
23/6	14:00	NUBLADO	23,2	26,4	25,1	25,8	25,8	33,7	31	31,5	32,1	55,2	53,5	50,3
23/6	16:00	NUBLADO	20,7	23,5	23,1	22,6	23,1	29,3	29,1	29,4	29,3	69,7	67,3	57,3

DATA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
JULHO/204														
8/7	9:00	CHUVA	19,1	21,2	19	19,3	19,8	26	25,4	26,3	25,9	85,9	89,3	81,1
8/7	11:00	NUBLADO	20,6	24,5	23,5	22,8	23,6	31,8	29,7	31,2	30,9	80,1	83,1	65,5
8/7	14:00	NUBLADO	21,4	24,4	22,7	23,4	23,5	30,6	29,4	28,5	29,5	85,9	78,4	71,8
8/7	16:00	NUBLADO	22,3	23,6	23,6	23,5	23,6	30,8	28,7	28,8	29,4	85,4	82,1	67,8
9/7	9:00	NUBLADO	20,1	22,6	22,2	22,7	22,5	28,8	27,3	28,3	28,1	78,6	71,5	63,6
9/7	11:00	SOL	23,1	30,5	31,5	31,8	31,3	37,9	35,7	34,5	36,0	77,9	63,1	46,8
9/7	14:00	NUBLADO	22,1	23,8	23,5	23,2	23,5	32,2	31,4	31,3	31,6	71,3	81,5	61,7
9/7	16:00	NUBLADO	22,3	23,7	23,5	23,5	23,6	31,2	30,1	30,5	30,6	89,8	82,2	64,7
10/7	9:00	NUBLADO	19,8	23,8	22,7	22,8	23,1	29	28	28,4	28,5	69,2	76,8	64
10/7	11:00	SOL	25,3	30,6	29,5	28,3	29,5	39,8	37,5	38,3	38,5	63,4	65,9	41,4
10/7	14:00	SOL	25,8	29,1	28,6	28,9	28,9	39,3	38,3	38,1	38,6	51,5	61	41,6
10/7	16:00	SOL	23,5	27,8	27,1	26,6	27,2	34,2	33,1	33	33,4	62,4	64,7	46,9
11/7	11:00	NUBLADO	23,4	26,3	25,9	26,9	26,4	35,7	34	34,2	34,6	75,9	65,9	49,3
11/7	14:00	NUBLADO	22,7	26,5	26,1	25,9	26,2	33,6	31,2	32,2	32,3	73,4	73,4	57,2
11/7	16:00	NUBLADO	22,2	25,4	25,1	24,3	24,9	30,9	29,9	30	30,3	68,2	70,5	59,2
14/7	9:00	SOL	19,4	26,5	25	27	26,2	32,7	29,1	31	30,9	57,7	56,8	39,4
14/7	11:00	NUBLADO	21,4	25,9	25,7	25,6	25,7	34,1	32,7	32,6	33,1	67,6	58,5	39,3
14/7	14:00	NUBLADO	22,3	27,2	26,8	26,4	26,8	34,5	33,7	30,7	33,0	62,1	59,2	38,5
14/7	16:00	NUBLADO	21,2	23,8	23,7	23,4	23,6	32,4	31	31	31,5	70,7	68,3	47,3
15/7	9:00	SOL	19,2	23,9	21,1	22,6	22,5	30	27,7	27,7	28,5	51,1	61,7	43,9
15/7	11:00	SOL	24,3	31	29,2	29,1	29,8	35,5	32,8	35,6	34,6	57,5	50,6	38,8
15/7	14:00	NUBLADO	21,2	25,5	25,1	25,1	25,2	31,4	31,4	32	31,6	70	62,1	48,8
15/7	16:00	NUBLADO	19,6	22	21,9	21,8	21,9	27,3	26,6	26,8	26,9	79	72,7	61,1
16/7	9:00	SOL	19,8	24,7	25	25,6	25,1	28,8	28,2	29,1	28,7	58,5	58,1	43,4
16/7	14:00	NUBLADO	23,6	25,1	25	24,5	24,9	30,1	30,3	29,8	30,1	55,3	58,8	45,3
16/7	16:00	NUBLADO	20,4	21,9	21,9	21,6	21,8	26,8	26,4	26,1	26,4	69,8	70	58,3
17/7	9:00	SOL	21,1	26,1	25,1	26,7	26,0	28,8	27,3	28,6	28,2	77,9	59,6	49,8
17/7	11:00	NUBLADO	23,4	26,8	26,5	26,7	26,7	29,7	29,2	29,7	29,5	75,4	59,3	47,6
22/7	9:00	SOL	20,1	27,1	25,9	27,6	26,9	31,8	28	28,6	29,5	70	56,4	45,2
22/7	11:00	SOL	22,3	27,5	26,7	29,7	28,0	37,4	36,3	34,4	36,0	57,4	47,9	35,7

DATA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
22/7	14:00	SOL	24,8	32,9	31,3	32,2	32,1	39,1	38,7	38,3	38,7	44,4	43,1	27,9
22/7	16:00	SOL	21,9	23	22,8	22,1	22,6	28	27,9	27,8	27,9	52,4	61,4	44,4
23/7	9:00	NUBLADO	18,5	19,5	19,5	19,4	19,5	24,7	24,3	24,6	24,5	71,1	71,6	63,3
23/7	11:00	NUBLADO	21,1	27,7	26,4	25,9	26,7	32,5	32,2	31,7	32,1	60,5	57,1	48,7
23/7	14:00	NUBLADO	20,9	23	22,9	22,6	22,8	29,2	27,9	28,1	28,4	63,5	66,2	54,7
23/7	16:00	NUBLADO	19,8	21,2	21,1	20,5	20,9	26,7	27	27	26,9	69,4	73,8	62,2

AGOSTO/2014														
5/8	9:00	SOL	22,3	27,3	25,9	27,6	26,9	30,3	27,8	29,2	29,1	67,1	59,9	44,9
5/8	11:00	NUBLADO	23,5	28,5	27,9	27,6	28,0	34,1	32,4	32,3	32,9	76,2	73,8	49,1
5/8	14:00	SOL	25,7	29,3	28,7	28,5	28,8	35,5	34	35,1	34,9	75,3	71,9	47,2
5/8	16:00	NUBLADO	23	24,6	24,9	24,1	24,5	31	30,1	30,2	30,4	60	72,7	79,9
6/8	9:00	SOL	16,6	22,8	22	23,9	22,9	29,3	28,2	28,5	28,7	64,4	67,7	46,8
6/8	11:00	SOL	21,1	29,8	27,5	30,6	29,3	35,6	34	32,6	34,1	59,4	58,5	34,8
6/8	14:00	SOL	23,2	31,8	29,9	31,2	31,0	38,6	37,2	37,8	37,9	59,6	52,1	31,6
6/8	16:00	SOL	18,9	23,1	23,2	22,3	22,9	29,6	28,4	28,5	28,8	69,5	69,3	49,3
7/8	9:00	SOL	19,5	24,3	24,8	24,4	24,5	32	30,4	30,3	30,9	-	-	-
7/8	11:00	SOL	22,8	30,7	29,4	30	30,0	37,4	35,9	33,7	35,7	-	-	-
7/8	14:00	SOL	31,6	33,7	32	32,7	32,8	38,8	35,8	33,7	36,1	-	-	-
7/8	16:00	SOL	24,7	33,2	31,9	31,4	32,2	37,7	36,7	36	36,8	-	-	-
8/8	9:00	SOL	20,5	26,1	25,3	27,2	26,2	33,9	31,5	32,2	32,5	65,2	57,9	37,2
8/8	14:00	SOL	27,2	35	33,8	34,4	34,4	41,9	40,3	40,9	41,0	49,5	40,7	24,1
11/8	9:00	SOL	19,5	23,9	23,3	22,8	23,3	30,7	27,8	28,8	29,1	55,1	53,8	53,1
11/8	11:00	SOL	22,6	27,7	29,2	27,3	28,1	38,9	36,2	37,6	37,6	53,4	50,1	39,6
11/8	14:00	SOL	25,2	32,9	31,3	32,1	32,1	43,1	40,4	41,8	41,8	42,1	41,9	29,3
11/8	16:00	SOL	23,6	27,9	27,7	26,8	27,5	35,5	35,7	35,4	35,5	47,6	44,8	38,7
12/8	9:00	SOL	21,8	26,6	25,6	25,7	26,0	34,9	32,3	33,5	33,6	62,3	61,4	49,8
12/8	11:00	SOL	23,6	31,4	30,2	30,2	30,6	39,4	39	40,6	39,7	55,4	44,8	37,8
12/8	14:00	SOL	26,5	33,5	32,8	32	32,8	44,3	43,9	44,1	44,1	42,4	45,5	30,5
12/8	16:00	SOL	24,6	28,1	28,2	26,6	27,6	36,3	35,3	35,3	35,6	45,9	55,8	42,4
13/8	9:00	SOL	21,9	27,6	25,8	26,1	26,5	35,7	34,1	34,4	34,7	58,6	60,1	49,3

DATA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
13/8	11:00	SOL	28	34,2	34,6	34,5	34,4	43,3	42,3	41,6	42,4	45,2	45,6	33,3
13/8	14:00	SOL	29,3	38,4	37,8	36,7	37,6	46,6	45	44,1	45,2	43,8	38,7	28,1
13/8	16:00	SOL	27,9	33	32,9	32	32,6	39,6	37,3	38,5	38,5	51,9	46,3	35,1
14/8	9:00	NUBLADO	16,9	20,2	20,4	20	20,2	27	24,8	26,6	26,1	74,8	88,6	93,1
14/8	11:00	NUBLADO	17,7	22,9	22,8	22,6	22,8	31,3	30	30,9	30,7	78,6	74,3	58,7
14/8	14:00	NUBLADO	17,8	24,7	23,6	23,7	24,0	33,1	31,2	31,3	31,9	74,2	69,1	63,7
14/8	16:00	NUBLADO	17,4	20,4	20,3	20,4	20,4	29,1	26,5	28,1	27,9	76,1	79	62,7
15/8	9:00	CHUVA	15,2	18,4	17,8	17,9	18,0	21,5	24,5	23,5	23,2	84,6	84,6	75,2
15/8	11:00	CHUVA	17,5	21,3	21,2	21,1	21,2	30,1	28,8	28,7	29,2	88,6	80,9	71,6
15/8	14:00	CHUVA	17,5	19,7	20,2	20,5	20,1	28,6	27,5	27,7	27,9	90,2	88,6	72,8
15/8	16:00	CHUVA	17	19	18,9	19,1	19,0	27,1	26,4	26,4	26,6	92,1	95,1	84,9
18/8	9:00	NUBLADO	21,6	22,8	23,7	23,4	23,3	31,4	31,2	31	31,2	82,7	77,6	60,1
18/8	11:00	SOL	22,8	29,5	28,6	29,2	29,1	36,1	35,3	34,9	35,4	68,2	64	56,7
18/8	14:00	SOL	25,2	28,3	28,6	28,4	28,4	36,3	34,6	35,3	35,4	79,9	68,8	58,9
18/8	16:00	SOL	23,7	28,2	27,7	27,5	27,8	36,2	35,2	35,5	35,6	77,7	70,6	55,4
19/8	9:00	SOL	21,2	27,4	26,2	27,1	26,9	35,8	33	34	34,3	84,7	71,1	54,3
19/8	11:00	SOL	25,7	34,6	35,6	33,5	34,6	44,4	42,9	42,7	43,3	67,2	62,5	46,2
19/8	14:00	SOL	24,9	34,7	34	33,1	33,9	42,4	42,2	42,4	42,3	74,4	64	45,6
19/8	16:00	CHUVA	20,4	21,5	21,4	21,2	21,4	27,5	27,3	27,6	27,5	91,4	89,2	80
20/8	9:00	SOL	19,8	29	27,5	29,1	28,5	34,9	32,9	33,4	33,7	85	65,9	54,8
20/8	11:00	SOL	23,7	34,4	34,2	34,4	34,3	41,2	39,8	38,3	39,8	75,1	49,1	42,5
20/8	14:00	SOL	26,6	35,3	34,7	35,7	35,2	45	42,8	44,8	44,2	67,4	49,7	37
20/8	16:00	SOL	25,2	25,6	25,4	25,2	25,4	34,3	33	33,6	33,6	72,3	72,8	45,2
21/8	9:00	SOL	20,1	27,5	25,6	28,1	27,1	33,7	32,5	32,8	33,0	70,3	64,9	48,2
21/8	11:00	SOL	23,6	36,3	35,8	36,2	36,1	45,5	43,4	41,5	43,5	57,2	44,5	30,7
21/8	14:00	SOL	26,8	38,6	38,3	38,2	38,4	47,4	45,7	46,7	46,6	52,5	42,6	28,1
21/8	16:00	SOL	24,8	29,2	28,8	28,5	28,8	39,1	37,9	38,2	38,4	60,6	56,8	43,1
22/8	9:00	SOL	23,3	31	28,9	31,5	30,5	40,7	39,1	39,1	39,6	72,1	53,6	40,5
22/8	11:00	SOL	26,8	34,8	37,9	35,6	36,1	46,5	46	44,7	45,7	51,1	43,3	29,7
22/8	14:00	SOL	29,8	36,8	37	35,8	36,5	48,3	47,4	48,1	47,9	44,5	37,7	25,3
22/8	16:00	SOL	28,1	33,9	33	32,8	33,2	46,2	44,6	45,5	45,4	41,8	40,9	28,2

DATA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
SETEMBRO/2014														
10/9	9:00	SOL	20,8	24,2	24,3	24,9	24,5	31,7	31	31,2	31,3	62,2	66	52,6
10/9	11:00	SOL	23,8	27,8	29,2	26,7	27,9	36	34,9	35,4	35,4	59,1	64,8	41,8
10/9	14:00	SOL	27,1	32	30,9	30,6	31,2	39,2	38,2	40,7	39,4	46,5	55,4	35,1
11/9	9:00	SOL	21,1	24	23,3	24,2	23,8	34,6	30,6	30,5	31,9	65,6	71,8	53,1
11/9	11:00	SOL	25	32,7	31,5	31,9	32,0	42	41,2	40,9	41,4	51,9	61,8	36,1
11/9	14:00	SOL	28,2	36	34,3	34,1	34,8	44,6	44,2	44,8	44,5	65,1	56,3	29,6
11/9	16:00	SOL	26,7	30,6	30,7	29,9	30,4	41,1	39,8	40,7	40,5	47,2	55,7	34,4
12/9	9:00	SOL	23,2	24,6	24,1	24,9	24,5	36,4	33,2	33,8	34,5	60,9	66,5	49,2
12/9	14:00	SOL	28,9	36,3	35,7	35,2	35,7	47,3	47	47,1	47,1	40,3	44,9	23,2
12/9	16:00	SOL	28,9	33,6	33,7	32,7	33,3	42,2	40,1	41,4	41,2	51,4	53,6	37,5
15/9	9:00	SOL	23,4	30,3	28,3	28,7	29,1	38,1	38,6	36,9	37,9	48,8	48,3	34,,8
15/9	11:00	SOL	25,8	32,3	31,9	33,2	32,5	42,9	41,7	39,7	41,4	47,1	45,8	30,7
16/9	9:00	SOL	23,2	28,8	26,4	26,3	27,2	38,1	37,2	37,6	37,6	59,9	58,4	48,5
16/9	11:00	SOL	24,3	28	28	28,2	28,1	38,8	36,2	36,4	37,1	57,1	56,3	44,7
16/9	14:00	SOL	29,1	37	36,7	35,1	36,3	47,3	45,9	46,9	46,7	47,3	42,2	30,3
16/9	16:00	SOL	27,3	30,4	31	30,5	30,6	41	40,7	40,6	40,8	48,3	53,2	42,1
17/9	9:00	NUBLADO	21,1	24,5	24,3	25,1	24,6	33,2	30,2	32,6	32,0	77,7	69,9	57,8
17/9	11:00	NUBLADO	22,8	29,8	28,8	29,3	29,3	35,2	34,8	35,7	35,2	68,2	62,4	46,6
17/9	14:00	NUBLADO	23,5	26,9	26,9	26,8	26,9	36,7	35,7	35,9	36,1	72,6	67,2	54,8
17/9	16:00	NUBLADO	22,5	24,7	24,6	24,4	24,6	34,3	32,4	33,3	33,3	76,3	80	62,5
18/9	9:00	NUBLADO	23,5	31,2	29,1	29	29,8	38,7	37,7	37,6	38,0	67,7	58,8	55,3
18/9	11:00	NUBLADO	25,4	29,4	29,3	29,4	29,4	41	39,1	40,1	40,1	57,2	54,6	44,4
18/9	14:00	NUBLADO	26,6	29,9	29,4	29,7	29,7	40,4	39	39,8	39,7	54,1	52,5	38,9
18/9	16:00	NUBLADO	25	27,6	27,6	27,5	27,6	37,6	36,8	36,8	37,1	62,2	59,9	58,5
19/9	9:00	SOL	24,3	32,6	30,5	30,1	31,1	43,4	40,2	40,7	41,4	50,8	50,8	38,9
19/9	11:00	SOL	26,2	35,4	33,5	34,3	34,4	47,1	45,1	43	45,1	43,2	42	31,6
19/9	14:00	NUBLADO	25,8	30,7	30,6	28,5	29,9	39,6	39,3	39,4	39,4	49,8	52,5	40,6
19/9	16:00	NUBLADO	25,6	27,3	27,3	27,1	27,2	38,1	37,5	37	37,5	55,6	56	39,9
22/9	9:00	NUBLADO	18,8	27,7	21,4	22,3	23,8	31,1	29,1	29,6	29,9	75,2	71,1	62,9
22/9	14:00	SOL	25,4	29,1	28,4	28,8	28,8	36,2	35,1	34,8	35,4	73,7	69,1	58,6

DATA	HORA	ESTADO DO TEMPO	TEMP. AMBIENTE (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T1 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T2 (°C)	TEMP. ESTUFA SIMPLES T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA SIMPLES (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T1 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T2 (°C)	TEMP. ESTUFA BIOGÁS T3 (°C)	TEMP. MÉDIA ESTUFA BIOGÁS (°C)	UMIDADE ESTUFA SIMPLES (%)	UMIDADE ESTUFA BIOGÁS (%)	UMIDADE AMBIENTE (%)
22/9	16:00	NUBLADO	24,8	30,8	30,7	30,1	30,5	39,6	37,2	37,5	38,1	52,7	49,8	38,7
23/9	9:00	SOL	20,1	28,5	30,8	32,3	30,5	40,4	37,8	39	39,1	54,7	51,6	40
23/9	11:00	SOL	27,1	38,5	37,8	39,1	38,5	48,4	49,8	49,3	49,2	45,5	30,9	23
23/9	14:00	SOL	28,3	35,3	35,6	34,8	35,2	48,3	47,6	47,4	47,8	34,4	31,3	21,1
23/9	16:00	SOL	26,6	31,8	31,7	30,1	31,2	43,3	43,7	44	43,7	32,2	30,2	24,9
24/9	9:00	SOL	21,4	29,4	26,9	27,7	28,0	34,7	34,3	32,8	33,9	38,8	40	34,8
24/9	11:00	SOL	26,2	35,8	35,9	36,5	36,1	45,1	43,1	41,1	43,1	40,5	35,3	27,9
24/9	14:00	SOL	27,1	36,8	35,1	34,7	35,5	45,4	44,5	45,7	45,2	38,3	37,7	32,3
24/9	16:00	SOL	25,9	31,2	31,1	30,9	31,1	42	41,6	41,4	41,7	41,8	39,7	32,5
25/9	9:00	SOL	23,4	30,8	29,5	29,5	29,9	43,7	41,9	43,1	42,9	41,6	40,9	40,7
25/9	11:00	SOL	27,3	35,8	34,6	35,3	35,2	47	44,7	45,4	45,7	41,5	39,3	30,7
25/9	14:00	SOL	28,3	36,4	36,7	35,5	36,2	47,2	54,6	47,1	49,6	38,9	37,7	26,9
25/9	16:00	SOL	27,7	32,4	32,5	32,9	32,6	45,2	43,4	43,8	44,1	36,3	37,9	28,1
26/9	9:00	SOL	23,1	31	30,4	30,7	30,7	42,8	40,9	42,9	42,2	53,7	48	42,8
26/9	11:00	SOL	27	33,5	33,6	35,5	34,2	42,2	42,7	44,2	43,0	45,2	38,3	31,5
26/9	14:00	SOL	28,3	36,4	36,4	34	35,6	46,5	44,5	46,4	45,8	34,2	34,6	24,8
26/9	16:00	NUBLADO	28,2	30	29,9	29,5	29,8	40,3	40,1	40,4	40,3	38,9	40,2	31,4

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS VOLÁTEIS

DATA	DIAS APÓS A DESCARGA	HORA	PONTO AMOSTRAL	UMIDADE (%)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SV/ST
02/06/14	0	10:16	Leito 1 A	96,1	39.425	24.500	0,62
06/06/14	4	10:20	Leito 1 A	84,8	152.500	80.100	0,53
13/06/14	11	10:07	Leito 1 A	75,7	243.100	118.300	0,49
16/06/14	14	10:00	Leito 1 A	64,4	355.600	164.500	0,46
24/06/14	22	10:08	Leito 1 A	38,5	615.000	278.600	0,45
02/06/14	0	10:16	Leito 1 B	96,1	39.425	24.500	0,62
06/06/14	4	10:23	Leito 1 B	84,3	156.800	82.300	0,52
13/06/14	11	10:09	Leito 1 B	71,4	285.700	142.100	0,50
16/06/14	14	10:20	Leito 1 B	60,4	395.600	184.700	0,47
24/06/14	22	10:10	Leito 1 B	33,6	664.400	310.400	0,47
02/06/14	0	10:16	Leito 2A	96,1	39.425	24.500	0,62
06/06/14	4	10:27	Leito 2 A	82,1	179.300	97.400	0,54
13/06/14	11	10:11	Leito 2 A	60,6	394.200	185.000	0,47
16/06/14	14	10:05	Leito 2 A	50,3	497.200	243.000	0,49
24/06/14	22	10:11	Leito 2 A	11,5	885.300	412.400	0,47
02/06/14	0	10:16	Leito 2B	96,1	39.425	24.500	0,62
06/06/14	4	10:29	Leito 2 B	78,7	212.700	116.800	0,55
13/06/14	11	10:15	Leito 2 B	61,5	385.000	188.000	0,49
16/06/14	14	10:06	Leito 2 B	46,6	534.200	242.000	0,45
24/06/14	22	10:12	Leito 2 B	16,5	835.200	381.800	0,46
07/07/14	0	09:50	Leito 1 A	96,3	36.200	23.800	0,66
11/07/14	4	09:10	Leito 1 A	84,4	156.000	27.400	0,18
18/07/14	11	10:15	Leito 1 A	71,8	282.300	162.000	0,57
21/07/14	14	11:00	Leito 1 A	66,4	335.900	187.500	0,56
28/07/14	21	10:00	Leito 1 A	58,5	415.100	211.300	0,51
07/07/14	0	09:50	Leito 1 B	96,3	36.200	23.800	0,66
11/07/14	4	09:11	Leito 1 B	88,7	112.900	57.600	0,51
18/07/14	11	10:07	Leito 1 B	71,1	289.200	155.100	0,54
21/07/14	14	11:03	Leito 1 B	67,4	325.900	179.800	0,55
28/07/14	21	10:02	Leito 1 B	47,1	528.600	277.700	0,53
07/07/14	0	09:50	Leito 2A	96,3	36.200	23.800	0,66
11/07/14	4	09:14	Leito 2 A	82,6	174.400	108.500	0,62
18/07/14	11	10:10	Leito 2 A	54,4	474.100	251.100	0,53
21/07/14	14	11:07	Leito 2 A	52,6	437.600	214.700	0,49
28/07/14	21	10:05	Leito 2 A	27,7	723.000	378.200	0,52
07/07/14	0	09:50	Leito 2B	96,3	36.200	23.800	0,66
11/07/14	4	09:16	Leito 2 B	83,1	168.700	105.800	0,63
18/07/14	11	10:13	Leito 2 B	62,7	373.300	213.900	0,57
21/07/14	14	11:10	Leito 2 B	54,4	455.600	242.300	0,53
28/07/14	21	10:07	Leito 2 B	32,0	679.700	351.700	0,52

DATA	DIAS APÓS A DESCARGA	HORA	PONTO AMOSTRAL	UMIDADE (%)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SV/ST
04/08/14	0	10:12	Leito 1 A	96,2	38.400	24.200	0,63
08/08/14	4	09:38	Leito 1 A	81,5	185.000	107.800	0,58
15/08/14	11	10:10	Leito 1 A	66,8	331.900	204.800	0,62
18/08/14	14	10:00	Leito 1 A	63,2	367.600	215.400	0,59
25/08/14	21	10:00	Leito 1 A	18,1	819.300	490.600	0,60
04/08/14	0	10:12	Leito 1 B	96,2	38.400	24.200	0,63
08/08/14	4	09:37	Leito 1 B	80,8	192.000	109.700	0,57
15/08/14	11	10:12	Leito 1 B	65,4	346.500	215.800	0,62
18/08/14	14	10:02	Leito 1 B	56,2	438.400	256.500	0,59
25/08/14	21	10:03	Leito 1 B	13,1	869.200	447.000	0,51
04/08/14	0	10:12	Leito 2 A	96,2	38.400	24.200	0,63
08/08/14	4	09:32	Leito 2 A	77,8	222.000	129.000	0,58
15/08/14	11	10:16	Leito 2 A	38,0	620.200	367.600	0,59
18/08/14	14	10:05	Leito 2 A	36,7	632.700	380.700	0,60
25/08/14	21	10:06	Leito 2 A	10,1	899.200	457.000	0,51
04/08/14	0	10:12	Leito 2B	96,2	38.400	24.200	0,63
08/08/14	4	09:30	Leito 2 B	78,1	218.600	129.200	0,59
15/08/14	11	10:17	Leito 2 B	46,4	586.300	354.100	0,60
18/08/14	14	10:06	Leito 2 B	41,4	535.600	331.500	0,62
25/08/14	21	10:08	Leito 2 B	11,0	889.800	468.300	0,53
08/09/14	0	10:10	Leito 1 A	96,1	38.900	25.300	0,65
12/09/14	4	09:30	Leito 1 A	80,1	204.200	120.900	0,59
19/09/14	11	10:00	Leito 1 A	59,4	523.100	273.000	0,52
22/09/14	14	10:55	Leito 1 A	47,4	675.700	371.600	0,55
29/09/14	21	09:30	Leito 1 A	8,9	198.900	107.200	0,54
08/09/14	0	10:10	Leito 1 B	96,1	38.900	25.300	0,65
12/09/14	4	09:27	Leito 1 B	82,9	190.800	111.100	0,58
19/09/14	11	10:08	Leito 1 B	59,1	486.600	278.800	0,57
22/09/14	14	10:57	Leito 1 B	41,6	706.000	405.000	0,57
29/09/14	21	09:47	Leito 1 B	8,4	915.900	465.000	0,51
08/09/14	0	10:10	Leito 2 A	96,1	38.900	25.300	0,65
12/09/14	4	09:35	Leito 2 A	79,6	198.900	107.200	0,54
19/09/14	11	10:03	Leito 2 A	47,7	406.300	236.800	0,58
22/09/14	14	11:00	Leito 2 A	32,4	526.400	288.500	0,55
29/09/14	21	09:41	Leito 2 A	6,8	933.000	485.200	0,52
08/09/14	0	10:10	Leito 2 B	96,1	38.900	25.300	0,65
12/09/14	4	09:32	Leito 2 B	80,9	171.400	102.500	0,60
19/09/14	11	10:05	Leito 2 B	52,1	565.100	251.400	0,44
22/09/14	14	11:04	Leito 2 B	29,4	583.800	301.300	0,52
29/09/14	21	09:38	Leito 2 B	6,7	931.900	477.000	0,51

APÊNDICE C - ALTERAÇÕES NO EXPERIMENTO

A proposta inicial do projeto de pesquisa previa que as coletas e análises do lodo de esgoto seriam realizadas entre os meses de março a setembro de 2014, entretanto conforme descrito abaixo, as análises de umidade realizadas nos meses de março, abril e maio serviram para subsidiar intervenções para aperfeiçoar a estrutura física do experimento.

Analisando os resultados das amostras obtidos nas coletas do mês de março, não foram observadas diferenças significativas em relação à redução de umidade e a temperatura interna da estufa, quando foram comparados os leitos com queima e sem queima de biogás.

Dessa forma, algumas alterações na estrutura física do experimento foram realizadas no início do mês de abril no intuito de obter melhores resultados com a queima do biogás. Contudo, as alterações realizadas no mês de abril não apresentaram resultados positivos, ao contrário retardou a secagem do lodo e desencadeou a presença de moscas no interior da estufa e mal cheiro na área da ETE.

Assim, no início do mês de maio foram realizadas novas alterações no experimento que apresentaram resultados satisfatórios tanto de redução de umidade quanto homogeneidade e elevação da temperatura do ar interno nas estufas. Com essa nova estruturação do experimento, em junho, iniciou-se a coleta de dados que subsidiaram a dissertação.

ALTERAÇÕES INICIAIS

Conforme descrito anteriormente foram realizadas alterações no experimento em dois momentos: as primeiras no mês de abril e as demais no mês de maio. O Quadro 1 apresenta as modificações na estrutura física do experimento realizadas em abril e os resultados/consequências dessas alterações.

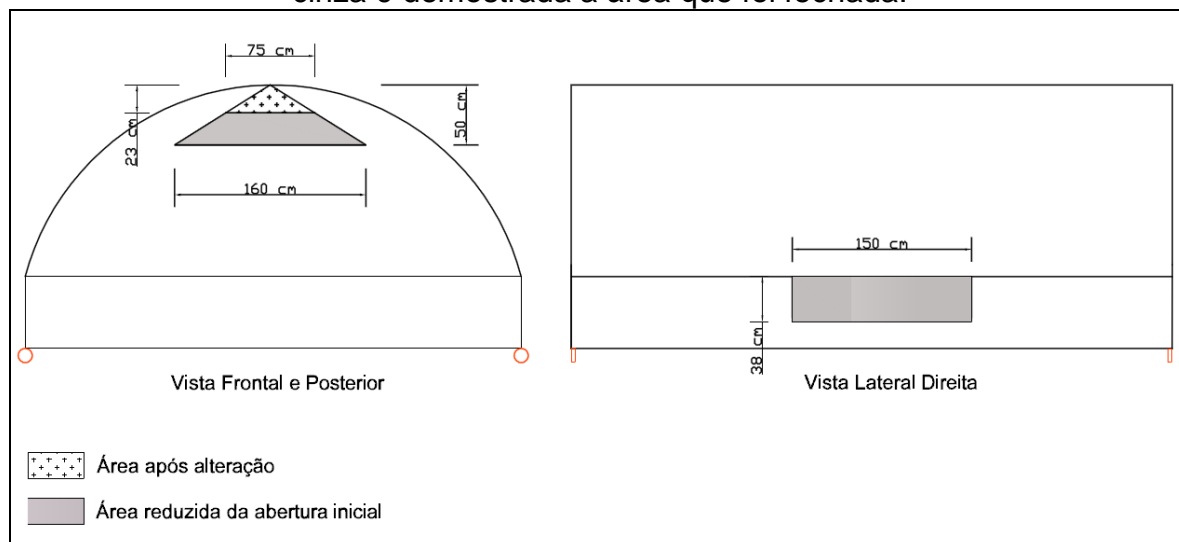
Quadro 1 – Primeiras alterações realizadas no experimento, em abril/2014.

ALTERAÇÃO NA ESTRUTURA	INICIAL	MODIFICADO	RESULTADOS
Fechamento total da abertura lateral da estufa	Área de 5100 cm ²	Totalmente fechado	Devido ao fechamento das aberturas laterais, a circulação do ar interno nas estufas ficou comprometida. Como consequência a evaporação da água do lodo diminuiu, retardando a secagem e desencadeando a presença de moscas no interior da estufa e mal cheiro forte (H ₂ S) na área da ETE.
Redução da área das duas aberturas superiores da estufa	4002 cm ²	861 cm ²	
Aumento das medidas laterais dos chapéus japonês (ampliação móvel)	30,5 cm	70 cm	
Aumento da área da base dos chapéus japonês (ampliação móvel)	903,25 cm ²	4900 cm ²	
Redução da altura da base do chapéu japonês em relação à chama	2,0 cm	0 (zero)	

Fonte: Produção própria.

A Figura 1 apresenta a redução das áreas de abertura lateral e superior da estufa realizadas em abril de 2014.

Figura 1– Redução das áreas de abertura lateral e superior das estufas. Na cor cinza é demonstrada a área que foi fechada.



Fonte: Produção própria.

No intuito de aumentar a retenção do calor sob os chapéus japoneses, ampliou-se a dimensão de cada lado do chapéu (de 30,5 para 70 cm), conforme apresentado na Figura 2. Contudo, devido ao comprometimento da circulação do ar interno na estufa não foi possível verificar resultados positivos com ampliação do chapéu.

Figura 2 – Ampliação das dimensões laterais de cada chapéu japonês.



Fonte: Fotos do autor.

ALTERAÇÕES FINAIS

O Quadro 2 apresenta as modificações na estrutura física do experimento realizadas em maio/2014 e os resultados/consequências dessas alterações.

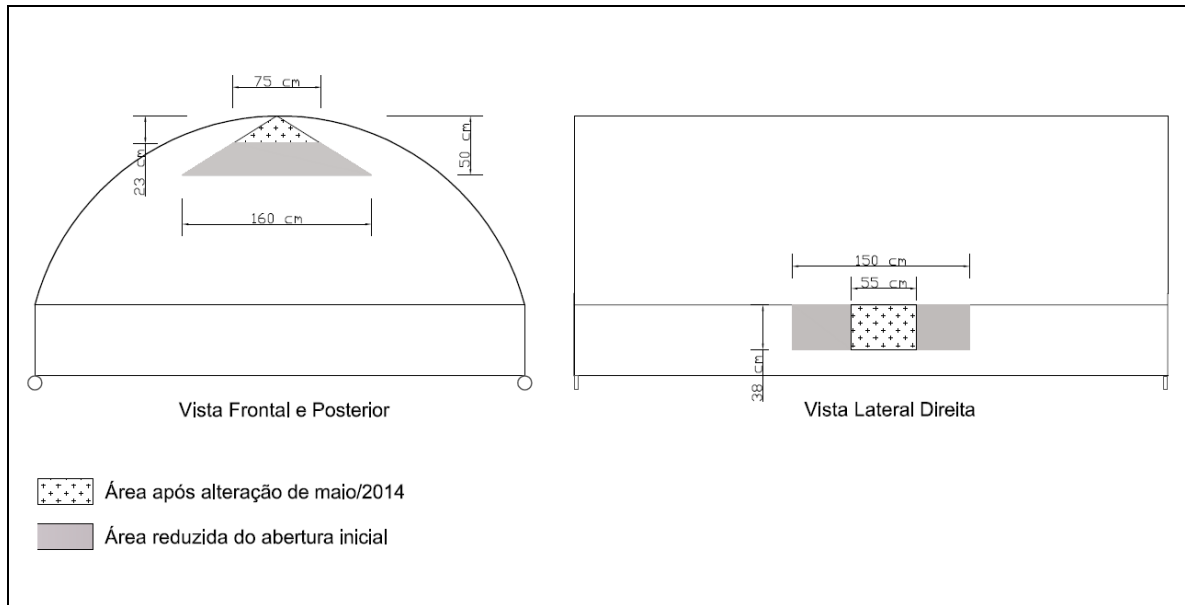
Quadro 2 – Alterações realizadas no experimento em maio/2014.

ALTERAÇÃO NA ESTRUTURA	INICIAL	MODIFICADO	RESULTADOS
Disponibilização de pequena área para entrada de ar pela abertura lateral da estufa	Totalmente fechado	2090 cm ²	Devido à disponibilização de uma pequena área para a entrada lateral de ar nas estufas, a circulação interna de ar foi favorecida, entretanto proporcionou aumento homogêneo da temperatura ao longo da estufa. Como consequência, a evaporação da água do lodo foi favorecida, acelerando o processo de secagem. Não foi identificada presença de moscas nem de mal cheiro forte (H ₂ S) na área da ETE.
Redução da altura da tubulação de biogás em relação ao leito de secagem	36 cm	16 cm	
Confecção de rolo compressor para quebrar os torrões de lodo seco.	-	-	

Fonte: Produção própria.

A Figura 3 apresenta as áreas de abertura lateral que foram disponibilizadas para a passagem do ar realizadas em maio de 2014. A abertura superior não sofreu alteração em maio/2014.

Figura 3 – Áreas livres para a passagem do ar tanto na abertura lateral como na superior da estufa. Na cor cinza é demonstrada a área que permaneceu fechada.



Fonte: Produção própria.

Ao decorrer da secagem do lodo de esgoto, conforme previsto por Tao, Peng e Lee (2006) e Font, Gomez-Rico e Fullana (2011), foram formados torrões de lodo que dificultam a transferência de calor (Figura 4). Assim, adotou-se um procedimento para quebrar esses torrões e para revolver o lodo. A quebra dos torrões foi realizada a partir de um rolo compressor desenvolvido para a pesquisa a partir de tubo de PVC (policloreto de vinil) de 150 mm de diâmetro e 60 cm de comprimento preenchido com cimento (Figura 5) e o revolvimento foi feito com vassoura metálica de jardim.

Figura 4 – Torrões de lodo formado no processo de secagem.



Fonte: Foto do autor.

Figura 5 – Rolo compressor desenvolvido para a pesquisa.



Fonte: Foto do autor.