

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

LUIZ GUSTAVO WAGNER

**SISTEMA TÉRMICO DE HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DE LODO
DE ESGOTO MOVIDO A ENERGIA SOLAR E A BIOGÁS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2015

LUIZ GUSTAVO WAGNER

**SISTEMA TÉRMICO DE HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DE LODO
DE ESGOTO MOVIDO A ENERGIA SOLAR E A BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ GUSTAVO WAGNER

SISTEMA TÉRMICO DE HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DE LODO DE ESGOTO MOVIDO A ENERGIA SOLAR E A BIOGÁS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 08 de dezembro de 2015, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

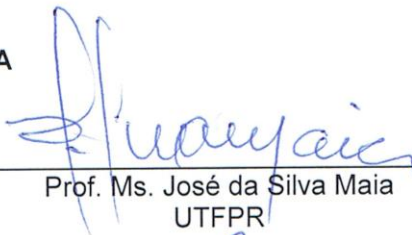


Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Coordenador do Curso de Especialização em Energias Renováveis

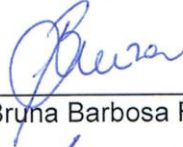


Prof. Dr. Paulo Cicero Fritzen
Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica


BANCA EXAMINADORA



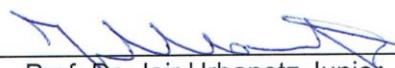
Prof. Ms. José da Silva Maia
UTFPR



Eng. Esp. Bruna Barbosa Fantoni



Prof. Dr. Gustavo Rafael Colfere Possetti
Coorientador



Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
Orientador - UTFPR

RESUMO

WAGNER, Luiz Gustavo. **Sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto movido a energia solar e a biogás.** 2015. 119p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O lodo de esgoto é um resíduo sólido oriundo do tratamento de esgotos domésticos. Sua destinação deve ser ambientalmente adequada, sanitariamente segura e economicamente viável, estando em conformidade com as legislações vigentes no Brasil. Para atender essa expectativa, o lodo deve ser submetido a um processo que promova sua higienização e sua secagem. Dentre as técnicas que podem ser utilizadas para esse fim, destaca-se a via térmica. No entanto, é necessária uma fonte de energia capaz de transferir calor ao lodo. Um sistema piloto constituído por 2 protótipos de leito de secagem foi construído para transferir calor ao lodo por meio de piso radiante, alimentado por energia solar e biogás. Os resultados obtidos demonstraram que a energia solar promove o pré-aquecimento do sistema e que o biogás atuando como fonte de energia complementar proporciona a elevação da temperatura do lodo de esgoto a patamares térmicos compatíveis a sua higienização e secagem. As temperaturas obtidas foram de 66,97 e 77,35 °C, respectivamente nos protótipos 1 e 2, de média durante o estágio de higienização, enquanto que o teor de sólidos totais foi de 86,69 e 88,07%, respectivamente. Verificou-se ainda que a produção de biogás em ETEs é suficiente para alimentar um sistema de higienização e secagem térmica de lodo de baixo custo, sendo que a autonomia foi de 164% no protótipo 1 e 295% no protótipo 2.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Biogás. Secagem térmica. Energia solar.

ABSTRACT

WAGNER, Luiz Gustavo. **Thermal system of hygienization and drying of the sewage sludge powered by solar energy and biogas.** 2015. 119p. Final paper (Specialization in Renewable Energy) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Sewage sludge is a solid waste arising from the treatment of domestic sewage. Its destination must be environmentally sound and sanitary safe, to comply with the laws in force in Brazil. To meet this expectation, the sludge must be subjected to a process that promotes its cleaning and drying. Among the techniques which can be used for this purpose, there is a thermal process. However, a power source capable of transferring heat to the sludge is necessary. A pilot system consisting of two prototype was built to transfer heat to sludge through underfloor heating, powered by solar energy and biogas. The results showed that solar energy promotes the preheating of system and when operated with biogas acting with complementary energy source, provides the increase in sewage sludge at thermal levels compatible to their cleaning and drying. The average temperatures obtained in the prototypes 1 and 2 they reached 66,97 and 77,35°C, respectively. The total solids concentration they reached 86,69 e 88,07%, respectively. It was also found that biogas production in Sewage Treatment Plants is sufficient to feed a Thermal system of hygienization and drying of the sewage sludge low cost. The prototype 1 presented a autonomy of 165%, while the prototype 2 presented a autonomy of 295%.

Keywords: Sewage sludge. biogas. Thermal Drying. Solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente.....	22
Figura 2 - Variação do volume de lodo em função do teor de sólidos.....	34
Figura 3 - Redução de volume de lodo em função do volume de água	35
Figura 4 - Poder calorífico inferior (PCI) do biogás	38
Figura 5 - Rotas de conversão de DQO e perdas de metano no reator anaeróbio ...	41
Figura 6 - Exemplos de curvas de biogás para um determinado intervalo de tempo	43
Figura 7 - Componentes da radiação solar	47
Figura 8 - Desenho esquemático de um coletor solar plano	49
Figura 9 - Coletor solar de tubos a vácuo	50
Figura 10 - Tubos a vácuo	50
Figura 11 - Esquema de um sistema de aquecimento operando por termossifão.....	54
Figura 12 - Representação esquemática do sistema piloto.....	58
Figura 13 – Fotografia da vista geral do sistema piloto	59
Figura 14 – Fotografia do coletor solar e reservatório térmico	61
Figura 15 – Fotografia dos revestimentos das tubulações	62
Figura 16 - Curva de desempenho da bomba de circulação.....	63
Figura 17 – Fotografia da bomba de circulação	64
Figura 18 - Representação esquemática do protótipo de leito de secagem 1	65
Figura 19 - Sequência de construção do protótipo 1.....	66
Figura 20 - Representação esquemática do protótipo de leito de secagem 2.....	67
Figura 21 - Construção do protótipo 2.....	68
Figura 22 – Fotografia do sensor de temperatura	69
Figura 23 – Fotografia do módulo de aquisição e registro de dados.....	69
Figura 24 – Fotografia do painel do sistema de comando.....	71
Figura 25 - Diagrama esquemático dos ensaios	72
Figura 26 - Lodo de esgoto depositado no protótipo 2	74
Figura 27 - Posição dos termopares	75
Figura 28 - Fixação dos termopares nos protótipos	76
Figura 29 – Fotografia dos protótipos com coberturas plásticas	76
Figura 30 - Coleta de amostras de lodo de esgoto.....	77
Figura 31 - Fluxograma do dimensionamento do sistema.....	80

Figura 32 - Evolução da temperatura no sistema utilizando energia solar (16/03/2015 – dia ensolarado).....	82
Figura 33 - Evolução da temperatura no protótipo 1 utilizando energia solar (16/03/2015 – dia ensolarado).....	82
Figura 34 - Evolução da temperatura no protótipo 2 utilizando energia solar (16/03/2015 – dia ensolarado).....	83
Figura 35 - Evolução da temperatura no sistema utilizando energia solar (23/03/2015 – dia nublado).....	84
Figura 36 - Evolução da temperatura no protótipo 1 utilizando energia solar (23/03/2015 – dia nublado).....	84
Figura 37 - Evolução da temperatura no protótipo 2 utilizando energia solar (23/03/2015 – dia nublado).....	85
Figura 38 - Demanda teórica de energia para aquecimento de 200 L de água	86
Figura 39 – Consumo de energia complementar em dia nublado	87
Figura 40 – Consumo de energia complementar em dia ensolarado	87
Figura 41 – Evolução da temperatura na massa de lodo (protótipo 1).....	88
Figura 42 - Evolução do teor de sólidos no lodo de esgoto (protótipo 1)	90
Figura 43 – Evolução do aspecto do lodo de esgoto ao longo do ensaio (protótipo 1)	90
Figura 44 - Evolução da temperatura na massa de lodo (protótipo 2).....	91
Figura 45 - Evolução do teor de sólidos do lodo de esgoto (protótipo 2)	93
Figura 46 – Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 1 dia)	97
Figura 47 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 1 dia).....	98
Figura 48 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 1 dia).....	98
Figura 49 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 2 dias)	99
Figura 50 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 2 dias).....	100
Figura 51 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 2 dias).....	100
Figura 52 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 3 dias)	101
Figura 53 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 3 dias).....	102

Figura 54 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 3 dias)	102
Figura 55 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 4 dias)	103
Figura 56 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 4 dias)	104
Figura 57 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 4 dias)	104
Figura 58 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 5 dias)	105
Figura 59 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível – Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 5 dias)	106
Figura 60 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível – Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 5 dias)	106
Figura 61 – Fotografia dos protótipos após a retirada do lodo de esgoto	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porte das estações de tratamento de esgoto	21
Tabela 2 - Valores usuais de densidades do lodo	26
Tabela 3 - Comparação do PCI do biogás e outros gases	39
Tabela 4 - Unidades de energia calorífica e elétrica	39
Tabela 5 - Relações unitárias de geração de metano e biogás em reatores anaeróbios.....	42
Tabela 6 - Características do materiais empregados no protótipo 1	66
Tabela 7 - Energia requerida para o estágio de higienização	94
Tabela 8 - Energia unitária requerida para higienização do lodo de esgoto.....	95
Tabela 9 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 1 dia	97
Tabela 10 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 1 dia	97
Tabela 11 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 2 dias.....	99
Tabela 12 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 2 dias.....	99
Tabela 13 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 3 dias.....	101
Tabela 14 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 3 dias.....	101
Tabela 15 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 4 dias.....	103
Tabela 16 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 4 dias.....	103
Tabela 17 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 5 dias.....	105
Tabela 18 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 5 dias.....	105

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	14
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS	15
1.4 OBJETIVOS.....	16
1.4.1 Objetivo Geral.....	16
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
1.5 JUSTIFICATIVA.....	17
1.6 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ESGOTO SANITÁRIO OU DOMÉSTICO	19
2.2 PARÂMETROS DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS	23
2.2.1 Sólidos	23
2.2.2 Matéria orgânica	24
2.2.3 Nitrogênio	24
2.2.4 Fósforo.....	24
2.2.5 Indicadores de contaminação fecal.....	25
2.3 LODO DE ESGOTO.....	25
2.4 DENSIDADE DE LODO	26
2.5 PRODUÇÃO DE LODO	27
2.6 FORMAS DE DESTINAÇÃO DE LODO	28
2.7 TRATAMENTO DE LODO	30
2.7.1 Adensamento.....	30
2.7.2 Condicionamento	30
2.7.3 Desaguamento.....	31
2.7.4 Estabilização.....	32
2.7.5 Higienização	32
2.7.6 Teor de umidade/Teor de sólidos	33
2.7.7 Secagem Térmica.....	35
2.8 BIOGÁS	37
2.8.1 Composição do biogás	39

2.8.2	Geração de biogás.....	40
2.8.3	Potencial energético do biogás	43
2.8.4	Usos do biogás	44
2.8.5	Purificação do biogás.....	44
2.9	ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA	45
2.9.1	Reservatório de água fria.....	47
2.9.2	Reservatório térmico.....	47
2.9.3	Coletores solares.....	48
2.9.4	Rendimento de um coletor solar	51
2.9.5	Circuito hidráulico	53
2.9.6	Fonte de energia complementar	53
2.9.7	Funcionamento do sistema de aquecimento de água por energia solar.....	54
2.9.8	Pisos radiantes por circulação de água	55
2.9.9	Demanda teórica de energia térmica para aquecer a água	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA PILOTO.....	57
3.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA PILOTO	57
3.3	COMPONENTES DO SISTEMA PILOTO.....	59
3.3.1	Coletor solar.....	59
3.3.2	Reservatório térmico.....	60
3.3.3	Resistência elétrica.....	61
3.3.4	Tubulações	61
3.3.5	Bombas de circulação.....	62
3.3.6	Protótipos de leito de secagem.....	64
3.3.7	Sensores de temperatura	68
3.3.8	Sistema de comando	70
3.3.9	Medidor de energia	70
3.4	ENSAIOS.....	71
3.4.1	Aquecimento dos protótipos com energia solar	73
3.4.2	Aquecimento dos protótipos com energia complementar à energia solar.....	73
3.4.3	Ensaio de higienização e secagem do lodo de esgoto	74
3.4.4	Teor de sólidos totais.....	77
3.4.5	Dimensionamento do sistema térmico	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81

4.1 REGISTROS DE TEMPERATURA DO SISTEMA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR	81
4.2 REGISTROS DE TEMPERATURA UTILIZANDO ENERGIA COMPLEMENTAR À ENERGIA SOLAR.....	85
4.3 HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DO LODO DE ESGOTO NO PROTÓTIPO 1 ...	88
4.4 HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DO LODO DE ESGOTO NO PROTÓTIPO 2 ...	91
4.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA TÉRMICO	93
4.6 CONDIÇÕES OPERACIONAIS NOS PROTÓTIPOS DE LEITOS DE SECAGEM	107
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
5.1 CONCLUSÕES.....	108
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIAS.....	112
APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

O lodo de esgoto é um subproduto do processo de tratamento de esgoto doméstico. Trata-se de um resíduo sólido rico em matéria orgânica e em nutrientes, porém concentrador de micro-organismos patogênicos (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Além disso, o lodo possui água em sua composição. A disposição sanitária e ambientalmente segura desse material exige que os micro-organismos patogênicos presentes em sua composição sejam eliminados ou significativamente reduzidos por meio de um processo de higienização (POSSETTI *et al.*, 2012).

O lodo também deve passar por uma etapa de desaguamento, de modo a reduzir o volume e, conseqüentemente, os custos de transporte, permitindo, assim, que haja viabilidade econômica para o seu uso. O desaguamento consiste na redução do teor de umidade do lodo e, por conseguinte, na elevação da concentração de sólidos totais (BORGES *et al.*, 2009).

O destino final ambientalmente adequado do lodo de esgoto é um fator fundamental para o sucesso de um sistema de saneamento. (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Segundo Borges *et al.* (2009) as agências ambientais têm incentivado o emprego agrícola do lodo, desde que apresente características adequadas a esta finalidade. De acordo com Bittencourt *et al.* (2009), a utilização do lodo na agricultura proporciona melhoria ao solo, aumento de produtividade dos cultivos e redução nos custos de produção.

Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) comentam que a reciclagem agrícola é a alternativa mais utilizada no mundo, juntamente com a recuperação de áreas degradadas, pastagens e silvicultura. No estado do Paraná é adotada a prática de destinação agrícola, utilizando o processo de estabilização alcalina prolongada para higienização (BITTENCOURT *et al.*, 2009).

Dessa forma, o objetivo do processo de higienização é proporcionar um material sanitariamente seguro em relação ao seu uso ou destino.

Existem diversos processos capazes de higienizar o lodo de esgoto, pautando-se principalmente em variações de temperatura, de potencial hidrogeniônico (pH) e de radiação (BRASIL, 2006; POSSETTI *et al.* 2012). É comum a prática do processo de estabilização alcalina prolongada, o qual consiste na adição de cal e armazenamento mínimo de 30 dias, período em que o pH é mantido acima de 12 (BITTENCOURT *et al.*, 2009). No entanto, a higienização por via térmica se mostra promissora, pois é capaz de promover a redução da umidade por meio da evaporação da água e a destruição dos organismos patogênicos (DAVID, 2002; POSSETTI *et al.*, 2009). Porém, um fator de grande importância para a higienização térmica é a fonte de energia para a geração de calor. Uma alternativa é o aproveitamento do biogás, pois se trata de uma fonte renovável e disponível na própria estação de tratamento de esgoto.

O biogás gerado em processos anaeróbios de tratamento de esgoto é composto majoritariamente por metano, nitrogênio e gás carbônico (LOBATO, 2011). O seu principal componente é o metano, um composto inflamável e com poder calorífico da ordem de 8.500 kcal/m³. O biogás com 60% de metano possui um poder calorífico aproximado de 5.250 kcal/m³ (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013b).

A utilização do biogás para higienização de lodos de esgotos já foi reportada na literatura e os resultados demonstraram que é possível executar a higienização do lodo por meio do aproveitamento térmico oriundo da queima do biogás e que essa pode ser uma alternativa viável para estações de tratamento de esgotos de médio e pequeno porte (POSSETTI *et al.*, 2012).

No entanto, dependendo das características do esgoto e do porte da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) a energia necessária para a higienização e secagem do lodo de esgoto pode não ser suficientemente encontrada apenas na recuperação do biogás gerado, necessitando de uma fonte complementar (POSSETTI *et al.*, 2013).

Uma alternativa é a utilização da energia solar ativa. Segundo o manual do Programa de Capacitação em Energias Renováveis, a utilização dessa forma de energia sempre induz uma redução no consumo de energia primária, podendo ser combinada com quase qualquer sistema auxiliar de respaldo (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

Os sistemas solares ativos são aqueles que usam equipamento específico para captar a energia solar: os coletores térmicos. O fluido aquecido pela energia solar que circula por seu interior pode direta ou indiretamente transferir sua energia ao destino ou aplicação final (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

Além de ser uma energia disponível quase que em qualquer lugar do mundo, o impacto ambiental do ciclo de vida inerente aos sistemas solares ativos é praticamente nulo (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a). Esses sistemas também se destacam por ter um custo previsível, já que o montante principal está associado ao investimento inicial, não dependendo de variações ou flutuações do mercado associados com o custo de combustíveis (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

Nesse sentido, torna-se oportuno a utilização da energia solar, por meio de coletores térmicos, em conjunto com a energia oriunda do biogás, para alimentar um sistema especialmente construído para tratamento do lodo de esgoto, buscando sua higienização e secagem, pré-requisitos para torná-lo apto para a reciclagem ou destinação ambientalmente adequada e sanitariamente segura.

Dessa forma, este trabalho reporta os resultados obtidos a partir de um sistema piloto, construído para transferir calor ao lodo por meio de piso radiante, alimentado por energia solar e por biogás.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo foi realizado a partir de dados coletados em um sistema de higienização e secagem térmica de lodo de esgoto, construído em escala piloto no pátio da ETE Padilha Sul, planta localizada no município de Curitiba – PR e pertencente à Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar.

O trabalho aborda os dados coletados com apenas um coletor solar inclinado conforme a latitude local. Não foram realizados experimentos com outras inclinações para o coletor solar.

A energia necessária de biogás para compor o sistema foi estimada a partir da mensuração de energia elétrica consumida por uma resistência elétrica, a qual foi utilizada como fonte complementar ao sistema de aquecimento solar.

Utilizaram-se equipamentos encontrados no comércio para compor o sistema piloto.

A transferência de calor ao lodo foi realizada por meio de pisos radiantes, que foram concebidos em dois diferentes protótipos de leitos de secagem.

O fluído utilizado para aquecer o piso radiante é a água fornecida pela concessionária local, a qual circula em baixa pressão nas tubulações e efetua a troca de calor em serpentinas de cobre embutidas nas bases dos pisos radiantes.

O lodo de esgoto avaliado é de origem doméstica e oriundo do processo de tratamento da ETE Padilha Sul.

O dimensionamento contempla apenas a energia demandada pelo biogás, atuando em conjunto de forma complementar a energia solar. Dessa forma, não foi indicada a quantidade de coletores solares e capacidade de armazenamento de reservatório térmico.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Segundo a Resolução SEMA nº 21/2009 (PARANÁ, 2009) o lodo de esgoto não tratado ou tratado inadequadamente, possui capacidade de atrair roedores, insetos ou outros vetores de agentes patogênicos.

Um sistema de transferência de calor que mantenha o lodo a pelo menos 70 °C por 30 minutos é capaz de higienizá-lo (BRASIL, 2006). Entretanto, também é possível higienizá-lo a 54 °C, desde que essa temperatura seja mantida pelo menos ao longo de 2 horas (HINDIYEH, 1995 *apud* POSSETTI *et al.*, 2012). Se o lodo for mantido nesse patamar térmico, então ele secará e seu volume será reduzido. (POSSETTI *et al.*, 2012). Esse processo, no entanto, precisa de energia.

O biogás oriundo do processo de tratamento de esgoto pode ser utilizado como fonte de energia renovável, minimizando impactos ambientais e reduzindo custos operacionais (LOBATO, 2011).

A energia solar pode ser utilizada como fonte complementar, sobretudo para o processo de secagem de lodos.

Acredita-se que um sistema híbrido, utilizando energias solar e biogás, pode ser utilizado como fonte de energia para secar e higienizar o lodo de esgoto.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar o potencial de implementação de um sistema de secagem e higienização de lodo por meio de um piso radiante, aquecido a partir do aproveitamento energético da radiação solar e do biogás disponíveis em estações de tratamento de esgoto de pequeno e médio porte.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Construir um sistema piloto para higienização de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás;
- Medir a temperatura ganha pela água e pelos protótipos de leito de secagem, com o sistema vazio, e comparar as temperaturas atingidas em condições climáticas diferentes, sendo um dia nublado e um dia ensolarado, utilizando somente energia solar;
- Quantificar o consumo de energia complementar à energia solar, utilizada com o sistema a vazio, e comparar o consumo e temperaturas atingidas na água e nos protótipos de leito de secagem em condições climáticas diferentes, sendo um dia nublado e um dia ensolarado;
- Medir a temperatura do lodo de esgoto depositado sobre os dois protótipos de leito de secagem e realizar a comparação entre eles;
- Medir o teor de sólidos do lodo esgoto durante os processos de higienização e secagem;
- Dimensionar um sistema térmico de piso radiante capaz de transferir calor para lodo depositado sobre ele e determinar a autonomia da energia

demandada pelo biogás em relação à produção teórica de metano das estações de tratamento de esgoto de pequeno porte e que utilizam processo anaeróbio.

1.5 JUSTIFICATIVA

A Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como as diretrizes relativas a gestão integrada do gerenciamento de resíduos sólidos. Em seu artigo 9º a lei estabelece que os geradores de resíduos sólidos devem observar a seguinte ordem de prioridade na gestão dos mesmos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Segundo a mesma lei, rejeitos são os resíduos sólidos que não podem ser reutilizados ou reciclados, enquanto que disposição final ambientalmente adequada é a distribuição ordenada dos rejeitos em aterros sanitários.

Desta forma, conclui-se que a partir da publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, todos aqueles resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados, seguindo tecnologias disponíveis e economicamente viáveis, não podem ser dispostos em aterros sanitários.

No caso do lodo de esgoto, os processos de reciclagem para uso agrícola estão definidos nas resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) nº 375/2006, na esfera Nacional e pela resolução da Secretaria de Meio Ambiente (SEMA) nº 21/2009, no Estado do Paraná (BRASIL, 2006; PARANÁ, 2009).

Seguindo a mesma diretriz da ordem de prioridade, foi publicada no Estado do Paraná a resolução SEMA nº 16/2014, que define critérios da qualidade ar. Em seu artigo 58º, a resolução determina que o biogás gerado em reatores de digestão anaeróbia deve ser aproveitado e na impossibilidade de seu aproveitamento deve ser queimado (PARANÁ, 2014).

Portanto, a higienização e secagem térmica do lodo de esgoto, com a finalidade de condicioná-lo para uma destinação ambientalmente adequada, além da recuperação do biogás para seu aproveitamento energético, são medidas que estão

de acordo com as disposições legais vigentes. Essas medidas contribuem para o aumento da vida útil dos aterros sanitários, no caso da reciclagem do lodo, e para diminuir as emissões de gases indutores de efeito estufa, no caso da recuperação do biogás. No entanto, tais procedimentos ainda são incipientes no Brasil e, por isso, o desenvolvimento de soluções que atendam a tais expectativas é importante, pois poderão trazer diversos benefícios às companhias de saneamento, como utilização de fontes renováveis de energia disponíveis nas próprias estações de tratamento, benefícios à sociedade devido a não emissão do biogás na atmosfera e não utilização de aterros sanitários para destinação do lodo de esgoto.

1.6 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

No capítulo 1 é apresentada uma introdução, abordando brevemente o estado da arte relacionado ao tema, a delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos do trabalho e justificativa.

O capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica relacionada a tratamento de esgotos domésticos, manejo e destinação de lodo de esgotos, higienização e secagem térmica de lodo, o biogás de tratamento de esgotos, energia solar térmica, sistemas de aquecimento de água, e aspectos legais inerentes aos temas apresentados.

O capítulo 3 reporta o detalhamento dos procedimentos metodológicos, contemplando a descrição do sistema de aquecimento, as características de cada um de seus componentes e a forma de aquisição e estimativas de dados.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos e a avaliação do desempenho do sistema dimensionado em escala piloto.

O capítulo 5 é dedicado às conclusões e considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas para execução da pesquisa e apêndices pertinentes ao trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESGOTO SANITÁRIO OU DOMÉSTICO

Segundo a Resolução SEMA nº 21/2009, esgoto sanitário é o “*despejo líquido constituído de esgotos predominantemente domésticos, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária*”.

Esgotos domésticos são, portanto, aqueles oriundos de atividades humanas cotidianas e compõem-se essencialmente da água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes, águas de lavagem (Chagas, 2000).

Segundo David (2002), o esgoto sanitário contém, aproximadamente, 99,9% de água. O restante, 0,1%, é a fração que inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como os micro-organismos, sendo que do total de sólidos, 70 % constituem-se de matéria orgânica, como: proteínas, carboidratos e gorduras e 30 % de materiais inorgânicos, como: metais, sais e areia.

O lançamento de esgotos sem seu prévio tratamento pode trazer danos ao meio ambiente e à saúde humana. Um dos principais riscos associados ao esgoto doméstico é a presença de micro-organismos patogênicos, causadores de enfermidades em humanos. Alguns exemplos de enfermidades causados por micro-organismos presentes no esgoto são apresentados no Quadro 1.

MICRO-ORGANISMO	DOENÇA PRINCIPAL
Bactérias <i>Salmonella Typhi</i> <i>Salmonella paratyphi</i> Outras Salmonelas <i>Shigella</i> <i>Vibrio cholerae</i> <i>E coli enteropatogênica</i> <i>Yersinia enterocolitica</i> <i>Campylobacter jejuni</i>	Febre tifoide Febre paratifóide Salmonelose Desintéria bacilar Cólera Gastroenterite Gastroenterite Gastroenterite
Enterovirus Virus da pólio Virus da hepatie A Enterovirus (vários)	Poliomielite Hepatite infecciosa Meningite, encefalite

MICRO-ORGASNISMO	DOENÇA PRINCIPAL
Protozoários <i>Balantidium coli</i> <i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia lamblia</i>	Desintéria Desintéria amebiana Giardiase
Helmintos Nematóides <i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Trichuris trichiura</i> <i>Ancilostoma duodenale</i>	Ascaris lumbricoides Trichuris trichiura Ancilostoma duodenale

Quadro 1 - Micro-organismos presentes no esgoto
Fonte: Jordão e Pessoa (2011)

Outro problema relacionado ao não tratamento dos esgotos domésticos é a poluição de recursos hídricos e do solo, provocado pela presença de matéria orgânica, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e sólidos suspensos. Segundo Machado (2011), o lançamento de esgotos “*in natura*” no meio ambiente apresenta aspectos negativos entre os quais se destacam: a possibilidade de transmissão de doenças, o assoreamento e eutrofização de corpos hídricos.

Portanto, de uma maneira geral, pode-se dizer que o objetivo do tratamento de esgotos domésticos é a remoção da matéria orgânica, sólidos, nutrientes e dos micro-organismos patogênicos.

Para Junior (2008) o tratamento de esgoto consiste em separar as partes líquidas e sólidas do esgoto, para tratá-las separadamente, reduzindo ao máximo a carga poluidora, sem que o meio ambiente seja prejudicado.

Para Machado (2011), o objetivo do tratamento do esgoto é corrigir as suas características indesejáveis de tal maneira que seu uso ou disposição final possa ocorrer de acordo com os critérios definidos pelos órgãos regulamentadores.

Para promover o tratamento de esgotos domésticos, normalmente as cidades adotam sistemas públicos constituídos de estruturas para coletar e transportar os esgotos até uma ETE.

Diversas são as tecnologias utilizadas para tratar o esgoto, pautando-se na combinação de processos físicos, químicos e biológicos, conforme descrito no Quadro 2:

ETAPA	OBJETIVO
Tratamento preliminar	Retirada de materiais grosseiros e areia;
Tratamento primário	Retirada de sólidos sedimentáveis e flutuantes por meio de mecanismos físicos, via decantadores.
Tratamento secundário	Mecanismos biológicos, com objetivo principal de remoção de matéria orgânica e de nutrientes (nitrogênio e fósforo);
Tratamento terciário ou pós-tratamento	Remoção de poluentes tóxicos ou não biodegradáveis ou eliminação adicional de poluentes não degradados na fase secundária.

Quadro 2 - Etapas do tratamento de esgoto
 Fonte: adaptado de Von Sperling (1996)

Para os mecanismos biológicos tem-se basicamente dois tipos de tratamento: anaeróbio e aeróbio.

No estado do Paraná, existem aproximadamente 235 estações em operação, sendo que 234 utilizam o processo anaeróbio.

Do total de ETEs em operação no estado do Paraná, 81,43 % são de pequeno porte, 17,30 % são de médio porte e 1,27 % de grande porte, sendo que as ETEs de grande porte estão localizadas em Curitiba.

O porte das ETEs é definido pela resolução SEMA 21/2009, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Porte das estações de tratamento de esgoto

CLASSIFICAÇÃO	CAPACIDADE (habitantes atendidos)
Pequeno porte	≤ 30.000
Médio porte	> 30.000 e < 250.000
Grande porte	≥ 250.000

Fonte: PARANÁ (2009)

Atualmente, o processo aeróbio é utilizado apenas na ETE Belém, em Curitiba. É uma das maiores ETEs existentes no Paraná. Está em operação há mais

de 20 anos e foi projetada para atender 500 mil habitantes. Este tipo de ETE apresenta maior consumo de energia elétrica.

As demais estações utilizam o processo anaeróbio, sendo que 215 utilizam reatores anaeróbios do tipo UASB e RALF.

Os reatores UASB e RALF são unidades compactas constituídas basicamente de um tanque de fluxo vertical com câmaras de sedimentação e digestão anaeróbia sobrepostas e que não necessita de nenhum tipo de energia complementar para tratar o esgoto (JUNIOR, 2008).

Von Sperling (1996) descreve as principais características do tratamento de esgotos em reatores anaeróbios.

A Demanda bioquímica de Oxigênio (DBO) é estabilizada por bactérias dispersas no reator. O fluxo do líquido é ascendente. A parte superior do reator é dividida nas zonas de sedimentação e de coleta de gás. A zona de sedimentação permite a saída do efluente clarificado e o retorno dos sólidos (biomassa) ao sistema, aumentando sua concentração no reator. Entre os gases formados inclui-se o metano. O sistema dispensa decantação primária. A produção de lodo é baixa, e o mesmo já sai estabilizado. (VON SPERLING, 1996, p. 176).

Os componentes dos reatores anaeróbios podem ser observados na Figura 1.

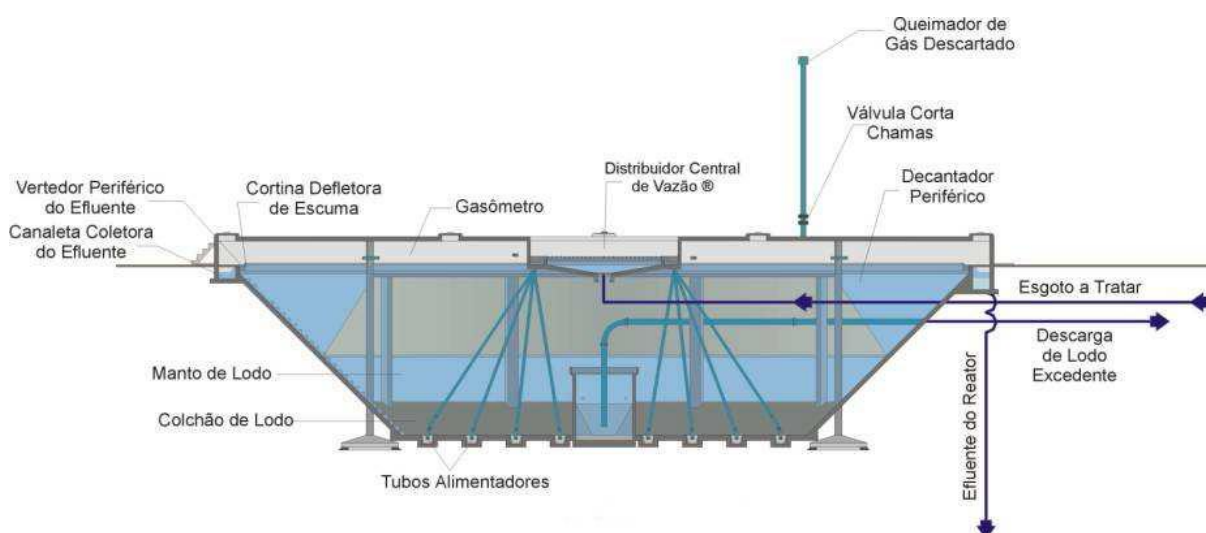


Figura 1 - Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente
 Fonte: Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar (2006)

O processo de tratamento de esgotos com reatores anaeróbios gera como principais subprodutos o efluente tratado, o lodo de esgoto e o biogás.

2.2 PARÂMETROS DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS

Segundo Von Sperling (1996), os principais parâmetros para os esgotos predominantemente domésticos são os seguintes: sólidos, indicadores de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e indicadores de contaminação fecal.

2.2.1 Sólidos

Os sólidos presentes em esgotos podem ser classificados de acordo com o Quadro 3.

Em relação ao seu tamanho e estado	- sólidos em suspensão - sólidos dissolvidos
Em relação às características químicas	- sólidos voláteis - sólidos fixos
Em relação à decantabilidade	- sólidos em suspensão sedimentáveis - sólidos em suspensão não sedimentáveis

Quadro 3 - Classificação de sólidos no esgoto doméstico

Fonte: Von Sperling (1996)

Com exceção dos gases dissolvidos, todos os contaminantes da água contribuem para a carga de sólidos (VON SPERLING, 1996).

2.2.2 Matéria orgânica

A matéria orgânica presente nos esgotos é a principal causadora do problema de poluição das águas: consumo de oxigênio por micro-organismos em seus processos metabólicos.

Os principais métodos para determinação da matéria orgânica em esgotos são os seguintes: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

A DBO é uma indicação indireta de carbono orgânico biodegradável. Retrata a quantidade requerida de oxigênio para estabilização, por meio de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea.

A DQO mede o consumo de oxigênio durante a oxidação química da matéria orgânica. Também é uma indicação indireta do teor de matéria orgânica presente no esgoto.

2.2.3 Nitrogênio

O nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas no meio aquático:

- a) Nitrogênio molecular (N_2)
- b) Nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão)
- c) Amônia (livre - NH_3 e ionizada - NH_4^+)
- d) Nitrito (NO_2^-)
- e) Nitrato (NO_3^-)

O nitrogênio é um elemento indispensável ao crescimento de algas, podendo conduzir a fenômenos de eutrofização de represas e lagos. Além disso, o nitrogênio em forma de amônia livre é tóxico aos peixes e o nitrogênio em forma de nitrato está relacionado a doenças como a metahemoglobinemia (VON SPERLING, 1996)..

2.2.4 Fósforo

Pode ser encontrado, principalmente, em três formas no meio aquático, sendo: ortofosfatos, polifosfatos e fósforo orgânico.

Sua presença pode conduzir fenômenos de eutrofização de lagoas e represas, pois é um nutriente essencial para o crescimento de algas (VON SPERLING, 1996).

2.2.5 Indicadores de contaminação fecal

Os principais indicadores de contaminação fecal utilizados são coliformes fecais e estreptococos fecais (VON SPERLING, 1996).

Coliformes fecais ou termotolerantes: A determinação de coliformes fecais é realizada em uma temperatura elevada, de modo a suprimir bactérias de origem não fecal (Thomann e Mueller, 1987 apud Von Sperling, 1996).

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, são bactérias gram-negativas, em forma de bacilos, oxidase-negativas, caracterizadas pela atividade da enzima β -galactosidase. Podem crescer em meios contendo agentes tenso-ativos e fermentar a lactose nas temperaturas próximas a 44°C ou 45°C, com produção de ácido, gás e aldeído. Além de estarem presentes em fezes humanas e de animais homeotérmicos, ocorrem em solos, plantas ou outras matrizes ambientais que não tenham sido contaminados por material fecal. A *Escherichia coli* pertence a esse grupo e é a única cujo habitat exclusivo é o intestino humano e de animais homeotérmicos (BRASIL, 2005).

De acordo com a Resolução Conama nº 274/2000, bactérias do grupo dos estreptococos fecais, pertencentes ao gênero *Enterococcus* (previamente considerado estreptococos do grupo D), o qual se caracteriza pela alta tolerância às condições adversas de crescimento, tais como: capacidade de crescer na presença de 6,5% de cloreto de sódio, a pH de 9,6 e nas temperaturas entre 10° e 45°C. A maioria das espécies dos *Enterococcus* é de origem fecal humana, embora possam ser isolados de fezes de animais (BRASIL, 2000).

2.3 LODO DE ESGOTO

O lodo de esgoto é o principal subproduto do tratamento de esgoto, em termos de volume e importância (VON SPERLING, 1996).

O lodo é uma mistura complexa de sólidos de origem biológica e mineral que são removidos do esgoto. Os lodos resultantes do processo de tratamento de esgoto são constituídos basicamente de materiais orgânicos (sólidos voláteis) e minerais (sólidos fixos), além de água e micro-organismos patogênicos (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001; DAVID, 2002; JUNIOR, 2008).

Segundo David (2002) a produção de lodo está relacionada ao número de habitantes atendidos pela ETE. Para tratamentos por reatores anaeróbios essa produção é da ordem 15 a 20 g SST/habitante.dia (ALEM SOBRINHO, 2001 *apud* DAVID, 2002).

O desaguamento do lodo de esgoto é uma das mais importantes tarefas na diminuição dos custos operacionais, visto que o teor de sólidos do lodo anaeróbio se encontra na faixa de 5 – 10%, o que representa cerca de 80 – 90% da massa do lodo (FERREIRA *et al.*, 2003).

A secagem de lodo em leitos de secagem convencionais pode variar entre 30 e 45 dias dependendo das condições climáticas, obtendo-se ao final desse período um lodo com 45-50% de sólidos totais (FERREIRA, *et al.*, 2003).

2.4 DENSIDADE DE LODO

Segundo Jordão e Pessôa (2011) a densidade de uma amostra de lodo é definida como a razão entre o peso dessa amostra, incluindo todos os componentes do lodo, e o peso de igual volume de água. Para baixos teores de sólidos totais, da ordem de 3 a 5%, o lodo de esgoto possui densidade próxima ou igual a 1,0.

Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) relacionam os valores usuais de densidade do lodo, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Valores usuais de densidades do lodo

Tipo de lodo	Densidade	Massa específica (kg/m³)
Lodo primário	1,02 – 1,03	1020 - 1030
Lodo secundário anaeróbio	1,02 – 1,03	1020 - 1030
Lodo secundário aeróbio	1,005 – 1025	1005 – 1025

Tabela 2 - Valores usuais de densidades do lodo

Tipo de lodo	Densidade	Massa específica (kg/m ³)
Lodo adensado	1,02 – 1,03	1020 – 1030
Lodo digerido	1,03	1030
Lodo desidratado	1,05 – 1,08	1050 - 1080

Fonte: Andreoli, Sperling e Fernandes (2001)

2.5 PRODUÇÃO DE LODO

A quantidade de lodo produzida está relacionada aos processos de tratamento utilizados. Segundo Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), a produção de lodo em reatores tipo RALF é da ordem de 0,2 a 0,6 litros/habitantes.dia. No entanto, isso não significa que na prática haja descarte diário deste volume

Segundo Chernicharo (1997) a produção volumétrica diária de lodo em reatores anaeróbios pode ser estimada por meio da Equação 1:

$$V_{lodo} = \frac{P_{lodo}}{\gamma \times C} \quad (1)$$

Em que:

V_{lodo} é a produção volumétrica de lodo (m³/dia);

P_{lodo} é a produção de sólidos no sistema (kgSST/d);

γ é a massa específica do lodo (1020 a 1040 kg/m³);

C é a concentração de sólidos secos do lodo (%).

A produção de sólidos no sistema pode ser calculada por meio da Equação

2.

$$P_{lodo} = Y \times CO_{DQO} \quad (2)$$

Em que:

P_{lodo} é a produção de sólidos no sistema (kgST/dia);

Y é o coeficiente de sólidos no sistema (kgSST/kgDQOaplicada);
CO_{DQO} é a carga média de DQO aplicada ao sistema (kgDQO/dia).

2.6 FORMAS DE DESTINAÇÃO DE LODO

Diversas são as formas de destinação de lodo de esgoto reportadas na literatura. Jordão e Pessôa (2011) relacionam as seguintes possibilidades de disposição final para o lodo de esgoto:

- Aterros sanitários;
- Incineração;
- Usos agrícolas diversos, como: aplicação no solo, aplicação em áreas de reflorestamento, produção de composto ou fertilizante organo-mineral, restauração de terras;
- Reuso industrial na produção de agregado leve para a construção civil;
- Reuso industrial na fabricação de cimento e de produtos cerâmicos;

Lima (2010) separa as formas de destinação entre aquelas que valorizam o potencial de seus componentes e aquelas que não valorizam. Um exemplo de destinação que não valoriza o potencial dos componentes é a disposição em aterros sanitários. Dentre as alternativas que valorizam o potencial dos componentes do lodo de esgoto estão a utilização agrícola do lodo e a recuperação de áreas degradadas.

Jordão e Pessôa (2011) destacam que alguns parâmetros devem ser levados em consideração para o planejamento da destinação final do lodo de esgoto, como pH, concentração de compostos orgânicos, nutrientes, metais pesados, compostos orgânico tóxicos e organismos patogênicos.

Segundo Lima (2010), o lodo de esgoto pode conter quantidades significativas de nutrientes e outros elementos essenciais às plantas, levando a um melhor desenvolvimento. Portanto, a reciclagem agrícola do lodo é uma alternativa interessante de destinação.

Para Machado (2011) a reciclagem agrícola do lodo de esgoto contribui para melhorar o clima e combater o efeito estufa, assim como evita o lançamento do lodo nos aterros sanitários, fato que pode aumentar os custos de operação das estações de tratamento de chorume e os riscos de poluição ambiental.

A Resolução Conama nº 375/2006 estabelece requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto para destinação agrícola, classificando-os em A e B, conforme o Quadro 4.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes < 10 ³ NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g de ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes Termotolerantes < 10 ⁶ NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g de ST

Quadro 4 - Classificação e requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto
Fonte: Resolução Conama nº 375 – BRASIL (2006)

Notas:

NMP: Número Mais Provável; ST: Sólidos Totais; UFP: Unidade Formadora de Placa; UFF: Unidade Formadora de Foco

Os lodos de esgoto ou produtos derivados enquadrados como classe A podem ser utilizados para quaisquer culturas, exceto em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo (BRASIL, 2006).

A utilização de lodo de esgoto ou produto derivado enquadrado como classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação, respeitadas as restrições previstas no art. 15 e no inciso XI, do art. 18 da Resolução Conama nº 375/2006 (BRASIL, 2006).

2.7 TRATAMENTO DE LODO

O lodo a partir de sua geração passa por algumas etapas de tratamento antes de sua disposição final. As etapas são as seguintes:

2.7.1 Adensamento

O adensamento é mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros biológicos percoladores (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Consiste no aumento da concentração de sólidos totais nele contido, por meio da remoção parcial de água que caracteriza seu teor de umidade. A finalidade é, portanto, a redução no volume do lodo para o manuseio e destinação final. É comum essa etapa ser realizada por meio de gravidade, flotação, centrífugas e mesas de esteiras (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

O teor de sólidos totais de lodos adensados situa-se entre 1 a 8%, dependendo do sistema e do processo adotado (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

2.7.2 Condicionamento

Esse processo, normalmente, antecede o desaguamento e tem como objetivo melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo, por meio de formação de agregados de partículas (flocos) para promover essa separação (DAVID, 2002; ROSA; SCHROEDER; 2009).

Neste processo são utilizados produtos químicos (polieletrólitos orgânicos, sais: férrico, ferroso, de alumínio e óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio) para melhorar a captura de sólidos (DAVID, 2002).

2.7.3 Desaguamento

Para Rosa e Schoroeder (2009) o desaguamento consiste de um processo físico cujo objetivo é a redução do teor de água presente no lodo.

David (2002) relaciona algumas razões para que o lodo de esgoto seja desaguado:

- Redução do volume para tratamentos posteriores;
- Diminuição do custo de transporte;
- Melhoria no manuseio;
- Redução da produção de chorume, caso o lodo seja enviado para aterros sanitários.

O desaguamento de lodo pode ser realizado por técnicas naturais ou mecanizados, sendo que as técnicas mais utilizadas são: centrífugas, filtros-prensa, técnicas mecanizadas e comum em ETEs de grande porte, e leitos e lagoas de secagem, técnicas naturais, sendo que as características do lodo e o espaço disponível para tratamento determinam qual a técnica será mais adequada (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001; ROSA; SCHROEDER; 2009).

No estado do Paraná, é comum a utilização de leitos de secagem para promover o desaguamento do lodo de esgoto. Os leitos de secagem são unidades de tratamento, normalmente, constituídos de tanque de armazenamento, construídos com tijolos na base e alvenaria nas paredes, e camada drenante. Nessas unidades, o processo de secagem do lodo é realizado por meio de drenagem e evaporação da água, demandando tempo de exposição e área para disposição do lodo (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001; JORDÃO; PESSÔA, 2011).

A secagem de lodo em leitos de secagem convencionais pode variar entre 30 e 45 dias dependendo das condições climáticas, obtendo-se ao final desse período um lodo com 45-50% de sólidos totais (FERREIRA *et al.*, 2003).

2.7.4 Estabilização

Rosa e Schoroeder (2009) comentam que o objetivo da estabilização do lodo de esgoto é reduzir sólidos voláteis, diminuindo a produção de odores e como consequência eliminar a atração de animais vetores de doenças e insetos.

A Resolução CONAMA nº 375/2006 define estabilização de lodos de esgoto como o “processo que leva os lodos de esgoto destinados para o uso agrícola a não apresentarem potencial de geração de odores e de atratividade de vetores, mesmo quando reumidificados” (BRASIL, 2006).

David (2002) destaca os processos de estabilização por meio de: redução biológica dos componentes voláteis, oxidação química dos materiais voláteis, adição de produtos químicos para eliminação de organismos patogênicos e aplicação de calor para desinfecção.

Segundo Von Sperling (1996) o lodo resultante do processo de tratamento com reatores tipo RALF já é estabilizado.

2.7.5 Higienização

Segundo a Resolução CONAMA nº 375/2006 lodo de esgoto higienizado é o “lodo de esgoto ou produto derivado submetido a processo de tratamento de redução de patógenos de acordo com os níveis estabelecidos na norma” (BRASIL, 2009).

A higienização busca, portanto, reduzir a concentração de micro-organismos patogênicos para não causar riscos à saúde da população e proporcionar um material sanitariamente seguro em relação ao seu uso ou destino (PINTO, 2001 *apud* LIMA, 2010; POSSETTI *et al.*, 2012).

A resolução Conama nº 375/2006 apresenta os processos de higienização dos lodos de esgoto necessários para obtenção do lodo de esgoto tipo A e B, conforme Quadro 5:

Tipo do lodo	Processo	Condição
A (redução adicional de patógenos)	Compostagem confinada ou leiras aeradas	3 dias a 55 °C
	Compostagem com revolvimento das leiras	15 dias a 55°C com revolvimento mecânico por 5 dias ao longo dos 15 dias do processo
	Secagem térmica direta ou indireta	Redução da umidade a 10% ou menos e temperatura das partículas do lodo > 80 °C
	Tratamento térmico	180 °C por 30 minutos
	Digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio	10 dias a temperaturas de 55 a 60 °C
	Processos de irradiação com raios beta	1 megarad a 20 °C
	Processos de irradiação com raios gama	1 megarad a 20 °C a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137
	Processos de pasteurização	70 °C por 30 minutos
B (redução significativa de patógenos)	Digestão aeróbia	40 dias a 20 °C 60 dias a 15 °C
	Secagem em leitos de areia	3 meses
	Digestão anaeróbia	15 dias a 35-55 °C ou 60 dias a 20 °C
	Compostagem	40 °C por 5 dias e pico de 55 °C por 4 horas
	Estabilização com cal	pH ≥ 12 por 2 horas

Quadro 5 - Processos de higienização do lodo de esgoto
Fonte: Brasil (2006)

Segundo a Resolução Conama 375/2006, outros processos de higienização podem ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência e seja aceito pelo órgão ambiental. Diante disso, no estado do Paraná a resolução SEMA nº 21/2009 também relaciona como processo de redução adicional de patógenos a estabilização alcalina prolongada, pela adição de quantidade suficiente de reagente alcalino para elevação e manutenção do pH em no mínimo 12, por período mínimo de 30 dias (PARANÁ, 2009).

2.7.6 Teor de umidade/Teor de sólidos

O Teor de Sólidos é a relação entre a massa de sólido seco e a massa de sólido úmido, conforme Equação 3:

$$TS = \frac{Md}{Ma+Md} \quad (3)$$

Em que:

Md é a massa de sólido seco

Ma é a massa de sólido úmido

Um lodo com teor de sólidos secos de 2,0 % possui uma umidade de 98 %. Assim, em 100 kg de lodo, 98 kg são de água e 2 kg são de sólidos (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

O teor de sólidos tem grande influência no volume de lodo a ser manuseado, conforme pode ser observado na Figura 2.

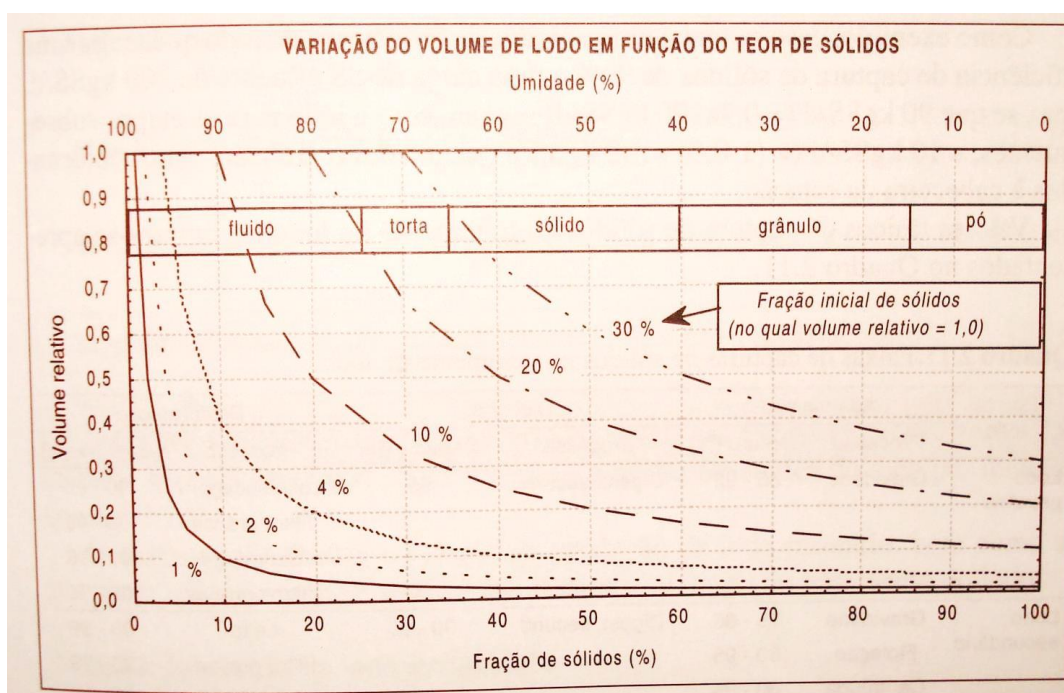


Figura 2 - Variação do volume de lodo em função do teor de sólidos
Fonte: Andreoli, Sperling e Fernandes (2001)

Para exemplificar as curvas de volume relativo, um lodo com teor de sólidos totais inicial de 2% possui um volume relativo de 1,0 (100%). Quando esse lodo passa a ter 5% de teor de sólidos totais, seu volume relativo passou a ser $1,0 \times (2,0/5,0) = 0,4$, ou seja, 40% de seu volume inicial (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Jordão e Pessôa (2011) exemplificam o comportamento da redução de volume de 1 m³ de lodo com 95% de teor de umidade (5% de teor de sólidos) em função da redução do volume de água (Figura 3).

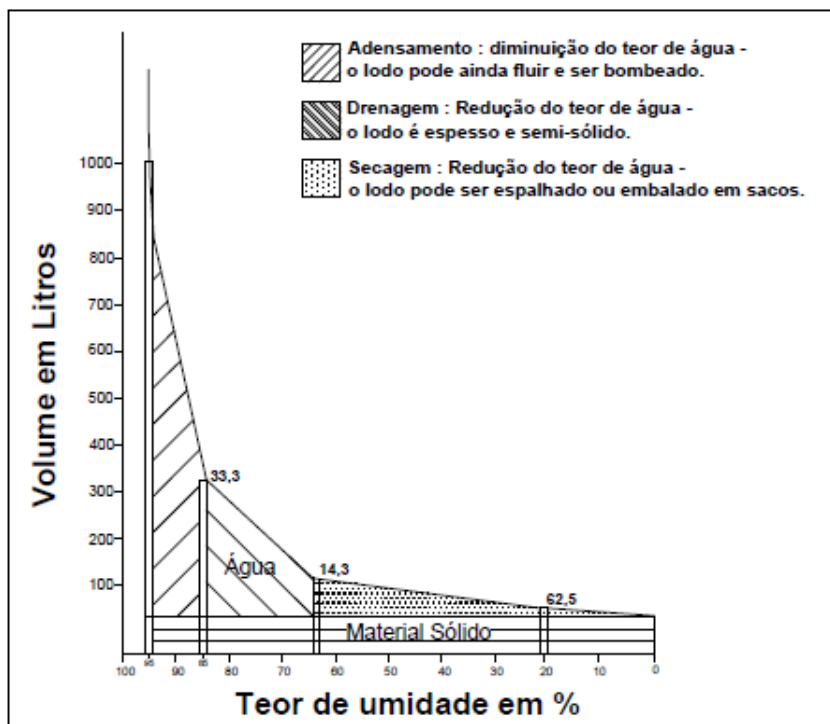


Figura 3 - Redução de volume de lodo em função do volume de água
 Fonte: Jordão e Pessôa (2011)

2.7.7 Secagem Térmica

Para Machado (2011) a secagem térmica de lodos é um processo de redução de umidade por meio da evaporação de água para um meio insaturado e, deste, para a atmosfera com a aplicação de energia térmica.

O principal objetivo é a redução do teor de umidade da massa de lodo de modo a diminuir o custo do transporte de material para sua disposição final (MACHADO, 2011).

David (2002) destaca que a secagem térmica remove apenas a água presente no lodo, mantendo os sólidos totais praticamente inalterados, podendo, dessa forma, ser utilizado como fertilizante na agricultura, desde que os micro-organismos patogênicos também sejam eliminados.

Para Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) o processo baseia-se na aplicação de calor para evaporação da umidade presente no lodo, possuindo como vantagens: significativa redução no volume de lodo, redução nos custos de transporte e estocagem, produto final estabilizado, produto livre de organismos patogênicos, produto final com retenção das características de condicionador de solo associadas ao lodo de esgoto, produto final apropriado para uso agrícola e possibilidade de acondicionamento em embalagens de pequeno porte.

Os principais inconvenientes nos processos de secagem térmica são a liberação de gases para atmosfera, produção de efluente líquido, risco de liberação de odores e geração de ruídos (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Os secadores térmicos mais utilizados no Brasil são de secagem direta, de tambor rotativo, que possui elevado custo de aquisição e de operação, justificando seu emprego apenas nos casos em se dá viabilidade econômica pela redução de volume e conseqüente redução de custos de transporte (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

Jordão e Pessôa (2011) comentam que o consumo de combustível é o principal fator gerador dos elevados custos operacionais e devem ser cuidadosamente analisados. Nesse sentido, alguns estudos de pasteurização e secagem térmica do lodo, envolvendo a utilização do biogás produzido na própria ETE vêm sendo reportados na literatura.

Ferreira *et al.* (2003) realizaram experimentos utilizando a energia proveniente do biogás para aquecer óleo para transferir calor em leitos de secagem cobertos com estufa plástica tipo "Túnel Hermano". Os tratamentos com aquecimento alcançaram redução de 100% dos ovos viáveis de helmintos em 10 dias, submetendo a massa de lodo a uma temperatura média de 46,16 °C, em todo o seu perfil e temperatura máxima de 72 °C na camada inferior do perfil. A higienização do lodo também foi verificada quando a massa de lodo permaneceu sob uma temperatura média de 38,06 °C, considerando todo o seu perfil e temperatura máxima de 64 °C na parte inferior do perfil. Neste último caso foram necessários 20 dias de tratamento (FERREIRA, *et al.*, 2003).

Borges *et al.* (2009) submeteram o lodo de esgoto a temperaturas de 55 a 65 °C, durante 3 a 5 horas, utilizando como fonte de energia o biogás. A permanência do lodo de esgoto aos patamares de temperatura e por esse período de tempo resultou na completa eliminação de ovos viáveis de helmintos.

Borges *et al.* (2009) observaram que o lodo tratado termicamente perde menos água por drenagem do que o lodo “*in natura*” e que o desaguamento é maior por evaporação do que por drenagem em lodos tratados termicamente, sendo esse processo influenciado pela temperatura ambiente e pela umidade relativa do ar.

Possetti *et al.* (2012) investigaram a eficiência de um sistema de higienização baseado em piso radiante para transferir calor ao lodo de esgoto e biogás como fonte de energia. Na ocasião, foi utilizado um aquecedor de água adaptado para funcionar com biogás. O lodo de esgoto tratado neste sistema foi submetido a uma temperatura média de 59 °C em sua camada ao longo de 3,5 dias, resultando na eliminação de *salmonellas* e obtenção de número de ovos viáveis de helmintos inferiores àqueles preconizados pela resolução Conama 375/2006.

A base de custo operacional de um sistema de secagem térmica é o combustível. Como esse processo é oneroso, a busca por alternativas de energias é importante para redução do custo (GONÇALVES *et al.*, 2001; DAVID, 2002).

Entre as fontes de energia possíveis está o biogás gerado na ETE (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

A energia solar como fonte para sistemas de secagem térmica de lodos de esgoto também vem sendo reportada, sendo os resultados relacionados à diminuição de mão de obra, transporte e custos de disposição final do lodo (SALIHOGU *et al.*, 2007; BENNAMOUN, 2012).

Mathioudakis *et al.* (2009) realizaram um estudo para de secagem solar de lodos de esgoto, sendo eficiente para a remoção de água e redução de volume, onde o teor de sólidos totais chegou a 90% e redução de volume correspondente de 85%. O tempo do processo de secagem foi de 7 a 12 dias, durante o verão e de 32 dias durante o outono.

2.8 BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa, combustível, resultante da degradação anaeróbia de matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos tratados pelo processo anaeróbio (MACHADO, 2011; CETESB, 2006).

Segundo Junior (2008), o biogás de ETEs normalmente é queimado para evitar a emissão de metano na atmosfera. Porém, essa forma de tratamento pode ter um fim mais nobre, utilizando o biogás como combustível, contribuindo para eficiência energética das ETEs. (JUNIOR, 2008).

Jordão e Pessôa (2011) destacam outros usos para o biogás de ETEs:

- Geração de energia elétrica;
- Geração de energia térmica, aquecendo digestores;
- Geração conjunta de energia elétrica e térmica, a que se dá o nome de cogeração;
- Combustível para secadores térmicos.

Machado (2011) comenta que o aproveitamento energético do biogás melhora o desempenho global do processo de tratamento de esgoto, uma vez que esse subproduto se transforma em matéria-prima energética.

Segundo a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2013b), o Biogás com 60% de metano possui um poder calorífico aproximado de 5.250 kcal/Nm³.

Lima (2005) comenta que o poder calorífico do biogás depende do teor de metano, conforme Figura 4.

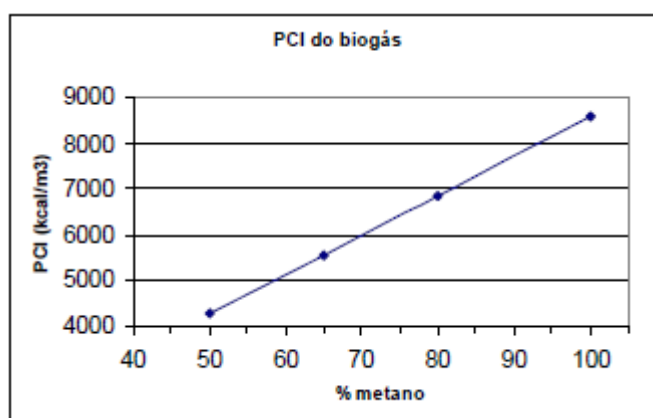


Figura 4 - Poder calorífico inferior (PCI) do biogás
Fonte: Pauss (1987) *apud* Lima (2005)

Junior (2008) relatou a comparação do Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás em relação a outros gases, conforme apresentado na Tabela 3, enquanto que a Tabela 4 relaciona as unidades de energia mais usuais.

Tabela 3 - Comparação do PCI do biogás e outros gases

GÁS	PCI (kcal/m ³)
Metano (CH ₄)	8.500
Propano (C ₃ H ₈)	22.000
Butano (C ₄ H ₁₀)	28.000
Gás natural	7.600
Biogás	5.500

Fonte: Junior (2008)

Tabela 4 - Unidades de energia calorífica e elétrica

Unidade	MÉTRICA		CALORÍFICA	ELÉTRICA
	kJ	BTU	kcal	kWh
BTU	1,055	1	0,252	2,931x10 ⁻⁴
KJ	1	0,948	0,239	0,000277778
kcal	4,187	3,966	1	0,001163
kWh	3600	3412	859,845	1

Fonte: Jordão e Pessoa (2011)

O biogás gerado em ETEs geralmente está a uma pressão muito baixa, com isto é necessário adicionar um compressor ao conjunto, quando a pressão de alimentação do combustível não for suficiente (JUNIOR, 2008).

O biogás de ETEs deve passar por um sistema de purificação antes de ser utilizado energeticamente (JUNIOR, 2008).

2.8.1 Composição do biogás

Jordão (2011) relaciona os componentes do biogás da seguinte forma:

- Metano - CH₄: 60 a 75%
- Gás Carbônico, CO₂: 25 a 35%
- Óxido de Carbono, CO: 2 a 4%
- Oxigênio, nitrogênio, hidrocarbonetos, gás sulfídrico, em menores quantidades.

Machado (2011) cita que a composição típica do biogás é, aproximadamente: 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, amônia, gás sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio.

O biogás gerado em reatores anaeróbios possui composição característica, possuindo alto teor de nitrogênio e alta concentração de sulfeto de hidrogênio (LOBATO, 2011; PROBIOGÁS, 2015).

Para Lobato (2011) o biogás gerado em reatores anaeróbios possui a seguinte composição volumétrica:

- Metano – CH₄: 60 a 85%
- Gás carbônico – CO₂: 5 a 15%
- Monóxido de carbono – CO: 0 a 0,3%
- Nitrogênio – N₂: 10 a 25%
- Hidrogênio – H₂: 0 a 3%
- Sulfeto de hidrogênio – H₂S: 1000 a 2000 ppm
- Oxigênio – O₂: Traços %

O alto teor de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico afluente ao reator (PROBIOGÁS, 2015).

2.8.2 Geração de biogás

A produção de biogás pode ser estimada a partir da porcentagem de redução de sólidos voláteis, podendo variar dependendo da quantidade desses sólidos contida no lodo e da atividade biológica no digestor (METCALF, 2003 *apud* MACHADO, 2011).

Segundo David (2002), a geração de biogás em digestores é resultado direto da destruição dos sólidos voláteis pelos micro-organismos metanogênicos.

Mello (2007) comenta que a geração de biogás é da ordem de 0,17 Nm³ por m³ de esgoto tratado, baseando em dados de uma ETE Los Angeles (EUA).

Para Metcalf e Eddy (2003) *apud* David (2002), a produção de biogás é da ordem 0,75 a 1,12 m³ / kgSSV destruído.

Segundo Jordão (2011) a produção de biogás em processos anaeróbios pode variar entre 5 a 20 L/hab.dia. Porém, em reatores anaeróbios, esses valores podem estar superestimados, pois não levam em consideração todas as parcelas de conversão de matéria orgânica (DQO), bem como, não estimam as perdas de metano no sistema (PROBIO, 2015).

Nesse sentido, Lobato (2011) desenvolveu um modelo matemático para estimar a produção de biogás, incluindo todas as rotas possíveis de conversão de matéria orgânica e perdas no reator anaeróbio tratando esgoto doméstico (Figura 5).

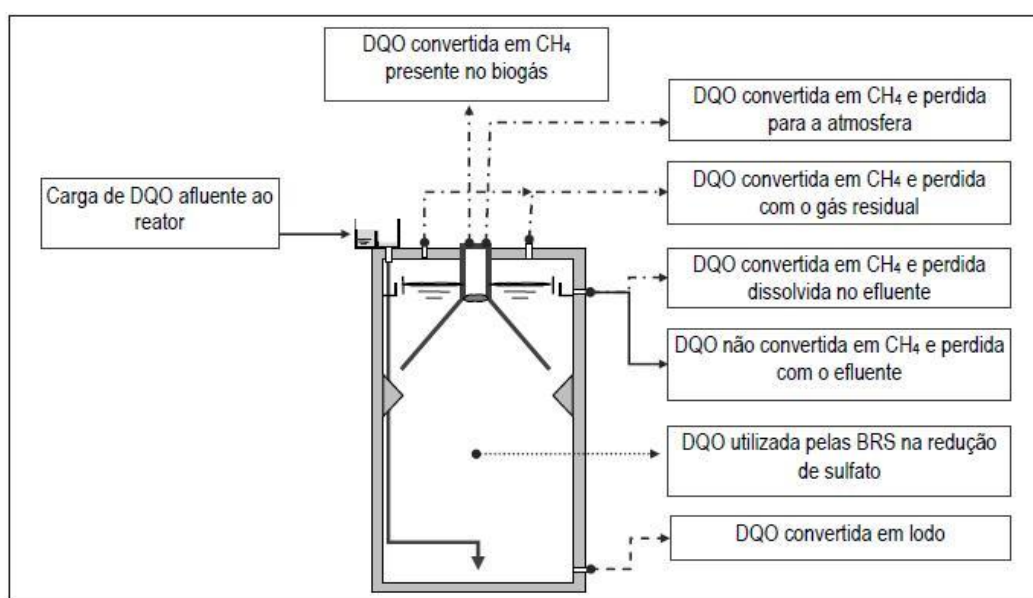


Figura 5 - Rotas de conversão de DQO e perdas de metano no reator anaeróbio
 Fonte: Lobato (2011)

Esse modelo serviu de base para o programa computacional *ProBio 1.0*, o qual foi desenvolvido por meio de uma parceria técnica entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), para estimativa da produção de biogás em reatores anaeróbios (PROBIO, 2015).

Na ausência de dados relacionados aos parâmetros físico químicos de uma determinada ETE, o programa oferece a opção denominada “análise rápida”, a qual retorna os valores de produção de biogás relacionadas a vazão ou população atendida (PROBIO, 2015).

As relações unitárias de produção de metano estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Relações unitárias de geração de metano e biogás em reatores anaeróbios

Relação unitária	Unidade	Pior situação			Situação típica			Melhor situação		
		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄ produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	9,9	3,6	6,8	13,3	7,4	10,2	16,7	11,1	13,7
	NL.m ⁻³ esgoto	81,7	16,7	42,2	103,7	34,8	64,2	134,6	51,8	81,3
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	154,1	66,0	113,4	185,8	124,2	158,3	219,1	173,9	196,0
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	14,1	5,2	9,8	17,7	9,9	13,6	20,8	13,9	17,1
	NL.m ⁻³ esgoto	116,7	23,8	60,3	138,3	46,4	85,6	168,3	64,8	101,6
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	220,1	94,3	162,0	247,8	165,6	211,1	273,9	217,4	245,0

Fonte: Lobato (2011)

Adicionalmente, Possetti *et al.* (2013) realizaram medições em uma ETE de grande porte dotada de reatores anaeróbios, onde foi constatado que, de modo geral, a produção de biogás, bem como o teor de metano, segue um comportamento temporal variável, periódico e não-estacionário, conforme apresentado na Figura 6, sendo que a produção de biogás descreve uma curva padrão de aproximadamente 1 dia, onde as vazões máximas ocorrem entre 0 e 2 horas e as vazões mínimas entre 12 e 14 horas.

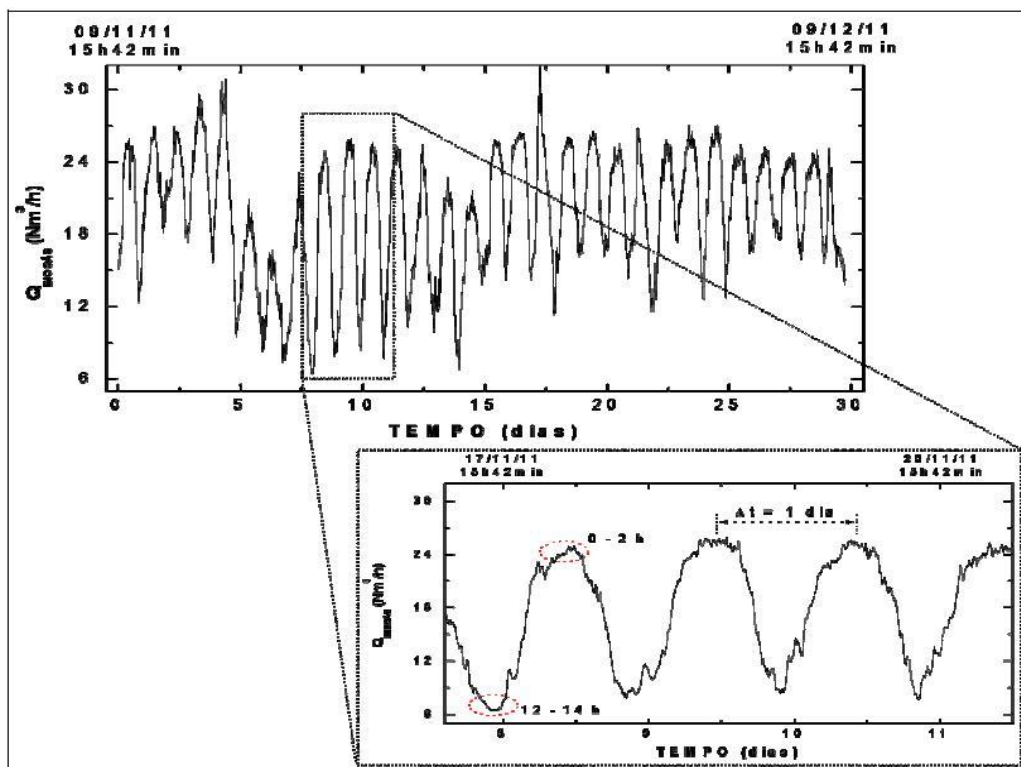


Figura 6 - Exemplos de curvas de biogás para um determinado intervalo de tempo
 Fonte: Possetti *et al.* (2013)

2.8.3 Potencial energético do biogás

Segundo Junior (2008), a energia química disponível oriunda do biogás pode ser calculado por meio da Equação 4.

$$PE = Q_{\text{biogás}} \times PCI_{\text{biogás}} \quad (4)$$

Em que:

PE é o potencial energético do biogás (kW)

$Q_{\text{biogás}}$ é a produção média de biogás (m^3/s)

$PCI_{\text{biogás}}$ é o poder calorífico inferior do biogás (kJ/m^3)

2.8.4 Usos do biogás

Segundo Machado (2011), a crise energética ocorrida nos anos 1970 e a alta do preço de combustíveis convencionais, fizeram com que se despertasse o interesse por pesquisas relacionadas ao uso energético do biogás.

Junior (2008) comenta que o biogás gerado em ETEs pode ser utilizado em abastecimento de frota veicular, aquecimento de caldeiras, fogões, processos de resfriamento, geração de energia elétrica e secagem de lodos.

Também é uma prática comum a utilização do biogás no setor agrícola, recuperando-o do processo de tratamento de dejetos em granjas e convertendo em energia elétrica ou térmica (COSTA, 2006).

O biogás pode ser usado nas condições em que é gerado e, dependendo da aplicação, pode ser necessária a redução da concentração de sulfeto de hidrogênio e de dióxido de carbono, e também a redução da umidade e/ou a elevação da pressão (MACHADO, 2011).

A utilização de equipamentos movidos a biogás ainda é incipiente no Brasil. Machado (2011) comenta que muitas vezes para utilizar equipamentos movidos a biogás são necessárias adaptações.

2.8.5 Purificação do biogás

Para conversão em energia térmica a partir da queima do biogás é importante sua purificação, buscando a eliminação de substâncias não combustíveis, como gás carbônico e água, e substâncias que provocam perda de potência e corrosão de equipamentos, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S) (MACHADO, 2011).

A aplicação do biogás para a obtenção de calor por combustão direta é a que menos requisitos de qualidade necessita, enquanto sua aplicação em pilhas combustíveis e injeção nas linhas de distribuição de gás natural são as que exigem um maior nível de pureza (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013b).

Mercado (2010) relaciona algumas técnicas para remoção dessas substâncias do biogás, conforme Quadro 6.

Impureza	Descrição	Detalhes
Umidade	Adsorção	Sílica gel
		Peneira molecular
		Alumina
	Absorção	Etileno Glicol (temperatura - 6,7 °C) Selexol
	Refrigeração	Resfriamento a 2 °C
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
		Potássio quente e potássio inibido
		Alcalonaminas
		Mono, di-tri-etanol amina
		Deglicolamina
		Água (em contra corrente ao gás)
		Soluções aquosas (alcalonamina)
	Urcarsol-CR	
	Adsorção	Peneiras molecular
		Óxido de ferro
Carvão ativado		
Separação por membranas	Membrana de fibra de oca	

Quadro 6 - Técnicas de remoção de impurezas do biogás
Fonte: Mercado (2010)

2.9 ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

A energia solar é uma fonte de energia renovável e possui um elevado potencial de utilização, devido a sua grande disponibilidade e as vantagens associadas, como a economia de equivalente grandeza das fontes convencionais para cada kWh de energia captada pelo sol, além de não liberar nenhum tipo de poluente, contribuindo para preservação do meio ambiente (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

O princípio comum a todos os sistemas solares térmicos é o de que a radiação solar é captada e utilizada para aquecer um fluido (normalmente um

líquido, ainda que também possa ser um gás como ar ou CO₂) (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

A radiação solar é a energia radiante que vem do Sol e em seu espectro podem ser distinguidas igualmente as distintas regiões do visível, infravermelho e ultravioleta. O máximo de intensidade do espectro solar está no centro do espectro visível que se estende de 0,38 a 0,74 μm .

Segundo o manual do Programa de Capacitação em Energias Renováveis da ONUDI (2013a), a radiação solar se divide em três frações: radiação difusa, radiação direta e radiação refletida (albedo).

A dispersão da radiação solar provoca múltiplas mudanças em sua direção e, junto com a absorção, uma considerável redução de energia. A fração da radiação solar que chega à superfície terrestre sem uma trajetória definida (radiação multidirecional) se denomina radiação solar difusa. A radiação difusa varia em uma gama de menos de 10% da radiação global, para condições de céu claro e elevações solares altas (meio dia), até o 100% quando o disco solar não está visível devido à presença de nuvens.

A radiação solar direta é aquela fração da radiação solar que chega à superfície terrestre com uma trajetória bem definida, que une o Sol com o ponto em que está situado um observador na superfície terrestre. Este componente pode significar uma fração de 90% da radiação global em dias muito ensolarados, sendo nula em dias completamente cobertos por nuvens.

A radiação refletida, também denominada albedo, é a radiação que chega a uma superfície determinada como consequência da reflexão da radiação solar no solo ou em superfícies verticais. Normalmente, essa parcela representa uma fração muito pequena da radiação solar global, mas pode chegar a ser algo mais de 40% da radiação global.

A radiação global sobre uma superfície horizontal é a soma destes três componentes (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

A Figura 7 exemplifica as componentes da radiação solar.

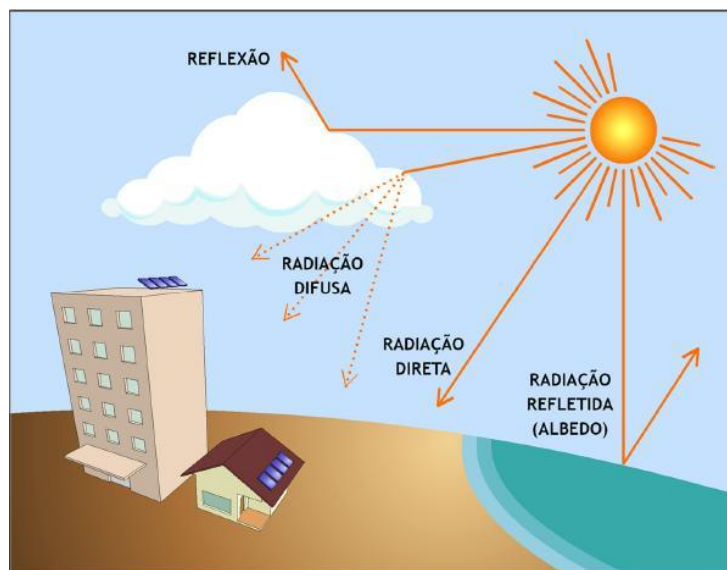


Figura 7 - Componentes da radiação solar
 Fonte: Urbanetz (2014)

2.9.1 Reservatório de água fria

É o componente responsável pelo fornecimento de água fria ao sistema. Em sistemas residenciais utiliza-se o próprio reservatório (caixa d'água) para abastecer o Sistema solar. No entanto, também se pode fazer uso de um reservatório exclusivo. Esse reservatório deve ser posicionado em um nível superior ao Sistema de aquecimento, permitindo que água seja conduzida por gravidade (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

2.9.2 Reservatório térmico

Também conhecido como *boiler*, trata-se de um recipiente com características especiais onde a água aquecida é armazenada para ser consumida (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

Segundo Cavalcanti *et al.* (2008) o reservatório térmico é constituído basicamente de dois cilindros, um interno e outro externo, separados por uma camada de material isolante. O cilindro interno fica em contato direto com a água e, portanto, deve ser confeccionado com material resistente à corrosão. A camada isolante é constituída de material de baixa condutividade térmica, sendo comum a utilização de mantas de lã de vidro, lã de rocha e poliuretano expandido. O cilindro

externo tem a função de proteger a camada isolante e contribuir para aumentar a rigidez mecânica do reservatório, sendo confeccionado normalmente pelo mesmo material utilizado no cilindro interno, como aço inox, aço galvanizado, alumínio, material plástico, entre outros.

Os reservatórios são classificados em função da pressão máxima que podem suportar, sendo de baixa pressão os que suportam até 10 mca. e de alta pressão, os que suportam até 40 mca (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

Os reservatórios devem ser equipados com um respiro, para aliviar pressões positivas ou negativas. Os respiros devem ser instalados na parte superior da lateral do reservatório (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

2.9.3 Coletores solares

Os coletores solares são muito utilizados no aquecimento de água para várias finalidades, como calefação residencial, aquecimento de piscinas, secagem de grãos e processos industriais de aquecimento (VETTORAZZI, 2011).

De acordo com a NBR 11569 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 2008) os coletores solares são responsáveis pelo aquecimento do fluido de trabalho a partir da energia solar captada.

Há diferentes tipos de coletores solares, sendo os mais comuns os coletores planos, abertos e fechados, e os coletores de tubos a vácuo (ELETROBRAS PROCEL, 2012).

Nos coletores solares planos (Figura 8) o absorvedor é formado por aletas e tubos, que ficam alocados em uma caixa isolada termicamente e que pode receber uma cobertura transparente. Nesse caso são chamados de coletores planos fechados. Os modelos mais simples, sem a cobertura transparente são denominados de coletores planos abertos (MESQUITA, 2013).

Nos coletores planos o fluxo da radiação incidente (irradiância) é uniforme para toda a sua superfície coletora, sendo destinado para aquecer água a temperaturas de uso sanitário (COMGAS, 2011).

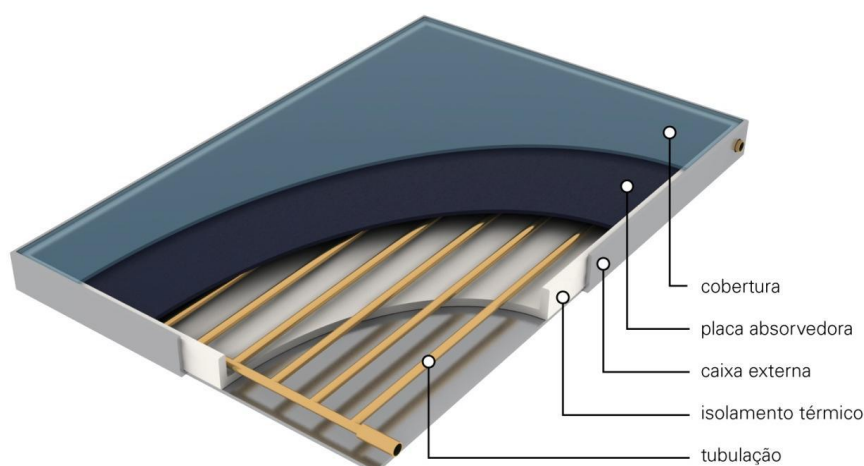


Figura 8 - Desenho esquemático de um coletor solar plano
Fonte: Comgás (2011)

Os coletores solares de tubos a vácuo possuem uma cobertura dupla envolvente, fechada, isolada do interior e do exterior, na qual é feito vácuo, cuja finalidade é a redução de perdas térmicas no coletor (VETTORAZZI, 2011).

O vácuo não apenas contribui para a redução de perdas, mas também para minimizar a influência das condições climáticas externas sobre o funcionamento do coletor, sendo indicado para regiões frias e com elevadas diferenças de temperatura entre o coletor e o ambiente (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

A Figura 9 exemplifica um coletor solar de tubos a vácuo, enquanto que a Figura 10 apresenta o seu princípio de funcionamento.



Figura 9 - Coletor solar de tubos a vácuo
Fonte: COMGAS (2011)

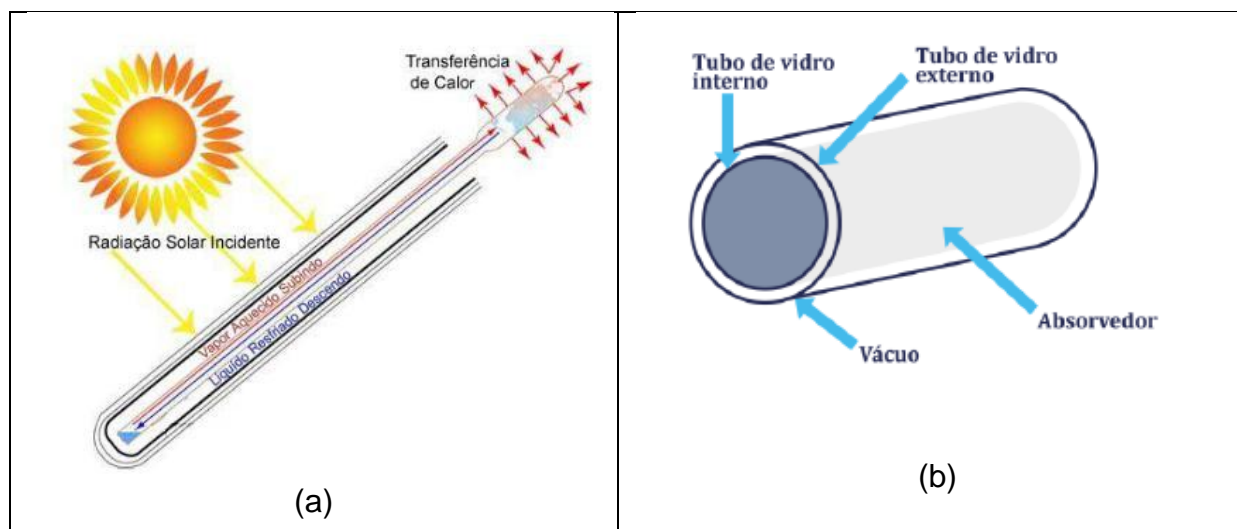


Figura 10 - Tubos a vácuo – (a) funcionamento do tubo de calor; (b) detalhamento do tubo
Fonte: (a) Manea (2012); (b) Organização das nações unidas para o desenvolvimento industrial (2013b)

As reduzidas perdas de calor dos coletores à vácuo fazem com que esses sejam vantajosos para operação em temperaturas mais altas, tipicamente acima de 75°C (MESQUITA, 2013).

Ferasso (2013) comenta que coletores solares com tubos a vácuo apresentam um rendimento médio maior do que os coletores planos, operando em temperaturas que podem ser superiores aos 100 °C.

2.9.4 Rendimento de um coletor solar

De acordo com a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento industrial (2013a), o funcionamento térmico de um coletor solar térmico é determinado pelo chamado rendimento global, definido como a relação entre a potência térmica que é capaz de proporcionar, ou potência térmica útil, e a potência procedente do Sol tomada como referência, conforme Equação 5.

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{solar}}} \quad (5)$$

Em que:

η é o rendimento global;

$P_{\text{útil}}$ é a potência térmica útil;

P_{solar} é a potência procedente do sol.

A potência térmica procedente do Sol, P_{solar} , é o produto da área líquida do coletor que intercepta a radiação solar e da irradiância solar tomada como referência, conforme Equação 6.

$$P_{\text{solar}} = A_c \times E_c \quad (6)$$

Em que:

A_c é a área líquida do coletor;

E_c é irradiância solar.

Em estado estacionário a potência térmica útil é o resultado do balanço entre a potência energética absorvida pelo receptor e a potência que este perde para o ambiente, conforme Equação 7.

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{absorvida}} - P_{\text{perdida}} \quad (7)$$

Em que:

$P_{absorvida}$ é a potência energética absorvida pelo receptor;
 $P_{perdida}$ é a potência perdida para o ambiente.

Nem toda a potência solar pode ser absorvida pelo receptor. Existe uma série de perdas de energia inerentes à geometria e à óptica do coletor e às propriedades dos materiais do próprio receptor. Rendimento óptico é o fator de correção da potência absorvida pelo receptor a partir da potência solar considerada, conforme Equação 8.

$$P_{Absorvida} = \eta_{opt} \times P_{solar} \quad (8)$$

Em que:

η_{opt} é o rendimento óptico do absorvedor

O receptor perde energia ao exterior já que, ao incidir a radiação solar sobre ele, é aquecido, isto é, aumenta sua temperatura com relação à temperatura ambiente. Assim, quanto maior for a diferença de temperaturas entre o absorvente e o ambiente, maiores serão as perdas de energia. As perdas do receptor também devem ser proporcionais à área de intercambio desta energia, isto é, à área do absorvente. O fator de proporcionalidade deste conjunto de variáveis é denominado coeficiente global de perdas do receptor e considera todos os intercâmbios de energia entre o absorvente e o ambiente. Dessa forma, pode-se escrever que:

$$P_{perdida} = U_L \times A_A (T_{Absorvente} - T_{amb}) \quad (9)$$

Em que:

U_L é o coeficiente global de perdas;

A_A é a área do absorvente;

$T_{Absorvente}$ é a temperatura do absorvente;

T_{amb} é a temperatura do ambiente

O posicionamento do conjunto de coletores solares é essencial para o desempenho do sistema de aquecimento solar. Como regra básica, é recomendada

que a instalação possua uma inclinação equivalente à latitude da região onde será instalado o sistema solar, somando-se 10°. Dessa forma, nos meses de inverno haverá uma maior incidência de radiação solar sobre o coletor, se comparado a uma instalação com a inclinação igual a latitude do local (COMGÁS, 2011).

O maior aproveitamento ocorre quando os coletores solares são direcionados para o Norte Geográfico (quando instalados no hemisfério Sul como no caso do Brasil) (COMGÁS, 2011).

2.9.5 Circuito hidráulico

As tubulações do circuito hidráulico possuem grande importância para o desempenho de sistemas de aquecimento de água. As tubulações para circulação de água aquecida deverão ser preferencialmente de cobre, e revestidas com material isolante. As tubulações também podem ser de CPVC (Clorato de Polivinila Clorado), quando a temperatura de trabalho for inferior a 80 °C (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

Os materiais normalmente utilizados para isolamento são uma camada de poliestileno expandido e alumínio corrugado (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

2.9.6 Fonte de energia complementar

A fonte de energia complementar tem a função de aquecer a água em períodos onde não há radiação solar ou para proporcionar a temperatura de água para consumo desejado quando somente a energia solar não é suficiente.

As fontes mais comuns são a gás, por meio de um aquecedor de passagem e energia elétrica, por meio de uma resistência acoplada ao reservatório térmico.

Quando utilizado o complemento a gás, um aquecedor de passagem é colocado entre o reservatório e o consumo, aproveitando desta forma todo o calor acumulado no reservatório (FERASSO, 2013).

2.9.7 Funcionamento do sistema de aquecimento de água por energia solar

No sistema termossifão a circulação do fluido é realizada pelo seu aquecimento por meio da energia solar, fazendo com que sua massa específica diminua e seu volume aumente, produzindo um fluxo convectivo do fundo do tanque para entrada do coletor, da entrada para saída do coletor e da saída do coletor para o topo do reservatório (AITA, 2006).

A Figura 11 apresenta uma representação esquemática do funcionamento de um sistema de termossifão.

Para o bom funcionamento do Sistema de aquecimento de água, deverá haver um desnível mínimo de 30 cm entre a parte superior do coletor solar e a parte inferior do reservatório (h da Figura 11) (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

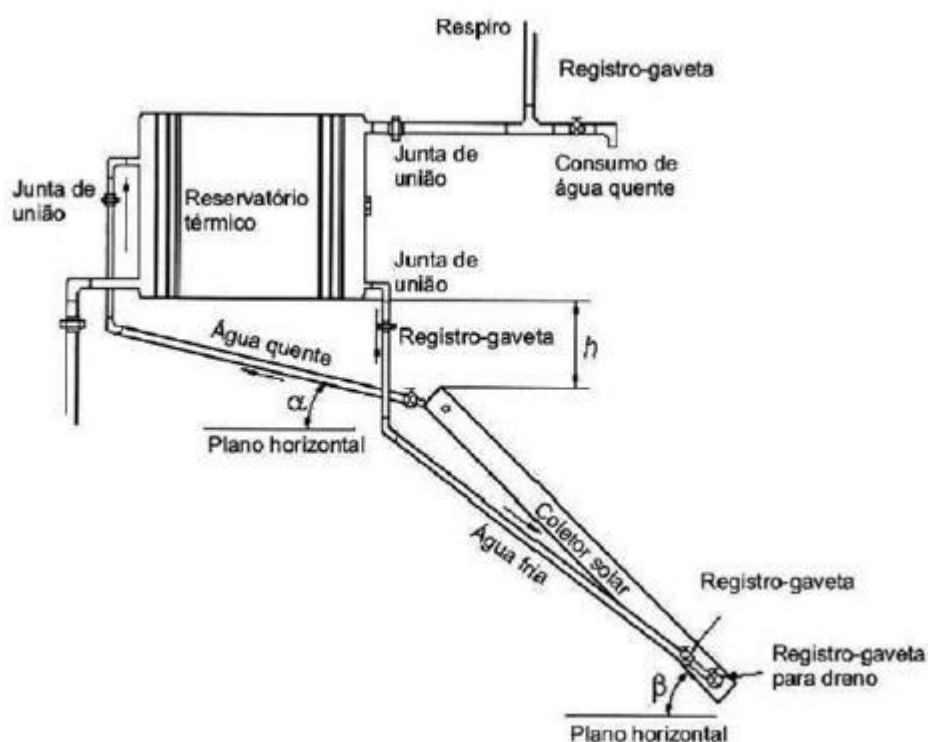


Figura 11 - Esquema de um sistema de aquecimento operando por termossifão
Fonte: NBR 15569 (ASSOCIAÇÃO..., 2008)

Nos sistemas de circulação forçada, a circulação de água entre os coletores solares e o reservatório térmico é realizada pela força de uma bomba hidráulica.

Essa bomba é comandada por um sensor diferencial de temperatura da água, que mede a diferença de temperatura da água entre o reservatório térmico e o coletor solar, sendo acionada quando for detectada energia solar captada pelo coletor (maior temperatura da água no coletor) (CAVALCANTI *et al.*, 2008).

2.9.8 Pisos radiantes por circulação de água

O piso radiante é um sistema de aquecimento que utiliza um circuito hidráulico fechado cujos tubos circulam sob o piso, promovendo seu aquecimento (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2013a).

Esse sistema inclui dois trocadores de calor: entre a fonte de calor e a água e entre a água e o ambiente. São importantes parâmetros de projeto o diâmetro dos tubos, o distanciamento entre eles, a velocidade da água, o regime do escoamento da água e a disposição dos tubos. O desempenho do sistema está relacionado à condutividade térmica e a emissividade dos materiais que o constituem (OLESEN, 2002 *apud* VETTORAZZI, 2011).

2.9.9 Demanda teórica de energia térmica para aquecer a água

A energia necessária para aquecer um determinado volume de água pode ser calculada pela Equação 10 (ABRAVA, 2008).

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (10)$$

Em que:

ΔQ é a energia térmica requerida (kcal)

m é a massa de água aquecida (kg)

c é o calor específico da água (1 kcal/kg. °C)

Δt é a variação da temperatura (°C)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Silva e Menezes (2005), o estudo em questão classifica-se como de natureza científica aplicada, de caráter exploratório e experimental, pois tem como objetivo gerar conhecimento para aplicação de novos métodos operacionais para o tratamento de lodo de esgoto, coletando dados a partir de experimentos realizados em escala piloto.

Um sistema capaz de transferir calor ao lodo de esgoto foi construído. O sistema é constituído por dois protótipos de leito de secagem, estruturas onde o lodo de esgoto é depositado, denominados protótipos 1 e 2, respectivamente, concebidos com diferentes materiais na base de transferência de calor para permitir a comparação entre eles.

O sistema foi concebido para operar com energia solar e energia oriunda do biogás, por meio da queima em aquecedores de água encontrados no comércio, porém adaptados para funcionarem com o biogás. Porém, para quantificar a energia necessária proveniente do biogás, optou-se em utilizar uma resistência elétrica, que foi acoplada ao reservatório térmico, para aquecer a água e estimar o equivalente em volume de biogás. Dessa forma, neste trabalho não foi utilizado o biogás para funcionamento do sistema.

Os ensaios foram realizados, primeiramente, com o sistema vazio, isto é, sem lodo de esgoto disposto sobre os protótipos. Esta condição foi respeitada nos dois primeiros ensaios, cujo objetivo foi comparar as temperaturas proporcionadas pelo sistema em dias ensolarados e dias nublados, verificando a contribuição da energia solar. Já o terceiro ensaio foi realizado com o lodo de esgoto depositado sobre os protótipos, contando com monitoramento da temperatura na massa e coletas de amostras para medir a evolução do teor de sólidos totais.

Este capítulo aborda, portanto, os detalhes da concepção do sistema piloto, a localização de instalação, as características dos materiais empregados, esquema de funcionamento, metodologia adotada para a realização dos ensaios e dimensionamento.

3.1 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA PILOTO

O sistema piloto de higienização e secagem de lodo de esgoto foi construído no pátio da ETE Padilha Sul, localizada na cidade de Curitiba. A ETE Padilha Sul é constituída de um sistema anaeróbio com gradeamento, desarenador, seis reatores anaeróbios e complementados por um sistema de polimento com lagoas aeradas. O tratamento de lodo resultante do sistema de tratamento de esgoto é efetuado por um sistema constituído de adensador por gravidade, secagem mecânica por centrífugas, pátio de cura e higienização de lodo desidratado com cal.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA PILOTO

O sistema piloto de higienização e secagem de lodo de esgoto, cujo desenho esquemático está representado na Figura 12, consiste de dois protótipos de leitos de secagem de lodo de esgoto, constituídos de pisos radiantes, construídos com diferentes materiais e que são capazes de transferir calor ao lodo de esgoto depositado sobre eles. Para tanto, os protótipos são dotados de serpentinas confeccionadas com tubos de cobre, por onde circula água aquecida para transferir calor aos pisos. A água da rede pública de abastecimento é enviada a um reservatório de 200 litros e seu aquecimento é realizado por meio de sua circulação em um coletor solar, dotado de 15 tubos a vácuo, que direciona a água aquecida novamente ao reservatório térmico pelo processo de termossifão.

Quando a energia solar não é suficiente para elevar a temperatura da água ao patamar desejado, é acionada uma resistência elétrica que está acoplada ao reservatório térmico.

A água, depois de aquecida, circula pelos protótipos de leito secagem, com auxílio de uma bomba, retornando ao reservatório térmico após trocar calor nas serpentinas em um circuito fechado. Dessa forma, o consumo de água é desprezível.

A temperatura da água para circulação adotada é de 90 °C.

O sistema também é constituído por um aquecedor de passagem movido a biogás e sistemas de captação e purificação do biogás. No entanto, esses

elementos não foram utilizados nesta pesquisa, sendo que a quantidade requerida de biogás foi simulada pela resistência elétrica acoplada ao reservatório térmico.

Os protótipos estão dentro de um laboratório construído em alvenaria especialmente concebido para abrigar esses experimentos e, portanto, estão protegidos de intempéries (Figura 13).

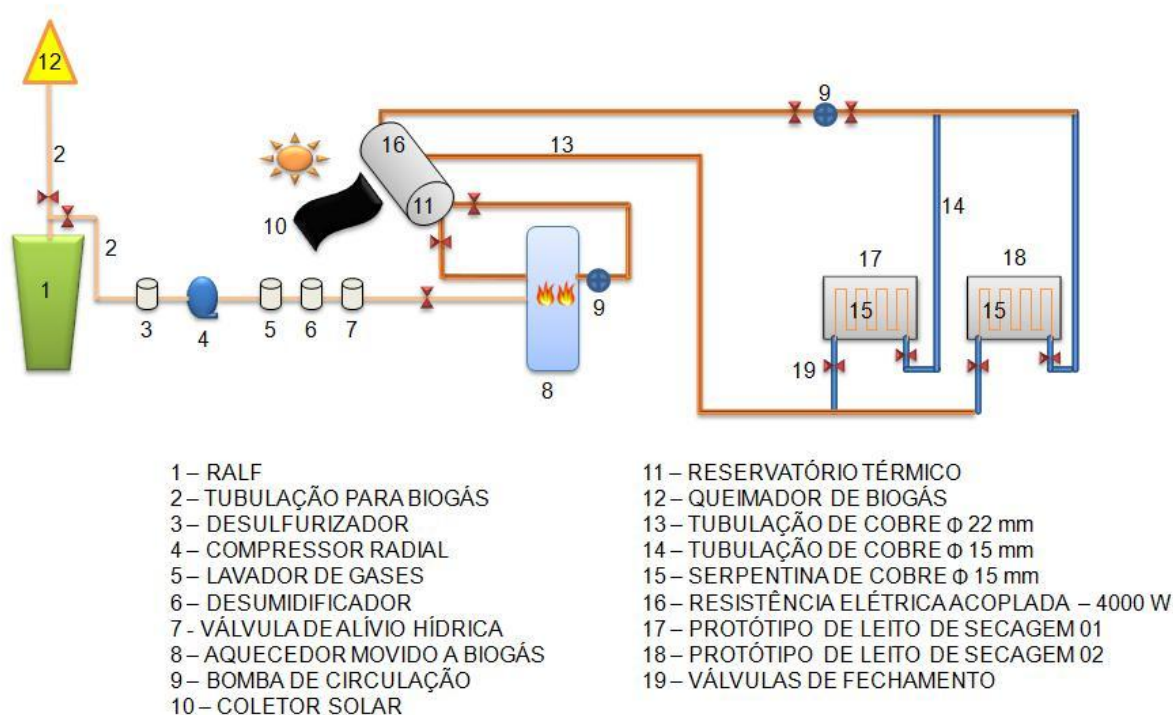


Figura 12 - Representação esquemática do sistema piloto
Fonte: Autoria própria.



Figura 13 – Fotografia da vista geral do sistema piloto
Fonte: Autoria própria.

3.3 COMPONENTES DO SISTEMA PILOTO

3.3.1 Coletor solar

O coletor solar utilizado no sistema é do tipo tubos à vácuo, para sistemas de baixa pressão e composto por 15 tubos, fabricado pela empresa Solarvac Brasil, contendo as seguintes características:

- Comprimento dos tubos: 1800 mm;
- Material dos tubos: Vidro borosilicato;
- Diâmetro externo dos tubos: 58 mm;
- Diâmetro interno dos tubos: 47 mm;
- Área do absorvedor: 1215900 mm²;
- Transmissividade: 92 % a 96 %;
- Rendimento em litros para 15 tubos: 200 litros aquecido;
- Comprimento do coletor: 2000 mm;
- Altura do coletor: 170 mm;
- Peso do coletor seco: 44 kg.

Segundo o selo do INMETRO presente no coletor, esse modelo possui o seguinte desempenho:

- Pressão de funcionamento: até 50 kPa (5 m.c.a)
- Eficiência energética média: 64,8 %
- Produção mensal de energia por m² de coletor: 79,82 kWh/mês.m²
- Produção mensal de energia por coletor: 170,30 kWh/mês

O coletor do sistema possui sensores analógicos que permitem o monitoramento da temperatura da água na entrada, antes de passar pelos tubos, e na saída, após passar pelos tubos.

O coletor solar foi instalado em direção ao norte geográfico, com inclinação de 25°, equivalente à latitude da cidade de Curitiba - Paraná.

3.3.2 Reservatório térmico

O reservatório térmico utilizado possui capacidade de 200 litros, baixa pressão, fabricado pela empresa Mastersol[®], contendo uma resistência elétrica acoplada. Segundo o fabricante, sua construção é em aço inox, com solda automatizada, isolamento térmico em poliuretano expandido especial, livre de CFC, revestimento externo em alumínio, pés de aço com pintura eletrostática, tampas em ABS com anti-UV. O reservatório térmico possui as seguintes características:

- Modelo: BMPS 200
- Volume: 200 L
- Pressão máxima de trabalho: 29,4 kPa (3m.c.a)
- Grau de proteção: IP 24
- Comprimento externo: 1050 mm
- Diâmetro externo: 630 mm
- Material do corpo interno: aço inox
- Material de isolamento térmico: poliuretano
- Perda específica de energia mensal: 0,17 kWh/mês/l

O reservatório térmico e o coletor solar são apresentados na Figura 14.



Figura 14 – Fotografia do coletor solar e reservatório térmico
Fonte: Autoria própria

3.3.3 Resistência elétrica

No interior do reservatório térmico foi acoplada uma resistência elétrica, a qual possui as seguintes características:

- Potência elétrica: 4.000 W;
- Tensão elétrica: 220 V;
- Corrente elétrica: 13,7 A;
- Disjuntor de proteção: 20 A;
- Frequência: 60 Hz;

3.3.4 Tubulações

As tubulações utilizadas nas ligações entre o coletor solar e o reservatório, assim como na alimentação de água até os protótipos são de cobre com diâmetro nominal de 22 mm (3/4 pol.), sendo de classificação leve “E”, conforme NBR 13.206: 2010.

As tubulações para circulação de água entre os protótipos e nas serpentinas são de cobre, com diâmetro nominal de 15 mm (1/2 pol.) e espessura da parede de 0,50 mm, sendo de classificação leve “E”, conforme NBR 13.206: 2010.

Para minimizar trocas de calor com o ambiente, todas as tubulações foram revestidas com isolante térmico de polietileno expandido (internas e externas). As tubulações externas também foram cobertas com alumínio corrugado, para maior proteção (Figura 15).



Figura 15 – Fotografia dos revestimentos das tubulações: (a) polietileno expandido; (b) alumínio corrugado.

Fonte: Autoria própria.

3.3.5 Bombas de circulação

A bomba utilizada para circulação de água entre os protótipos e retorno ao coletor solar possui as seguintes características:

- Fabricante: ROWA S.A.;
- Modelo: RW S50;
- Potência elétrica: 67 W;
- Tensão elétrica: 220 V (+6% / -10%);
- Frequência: 60 Hz;
- Velocidade máxima do motor: 3.450 rpm;
- Grau de proteção: IP42;
- Entrada e saída com rosca: 1”;
- Comprimento máximo (entre sucção e recalque): 180mm;
- Pressão máxima: 1,5 bar = 1,5 kgf/cm² = 15 mca.;

- Vazão máxima: 3,1 m³/h;
- Pressão mínima de entrada na sucção da bomba: 0,06 bar (0,60 mca) (a 60 °C);
- Variação de temperatura admissível: -10 até 110 °C;
- Temperatura máxima do ambiente: 40 °C;
- Fluidos permitidos: água potável.

A bomba pode operar em três velocidades distintas, conforme curva de desempenho apresentada na Figura 16. A bomba de circulação instalada pode ser visualizada na Figura17.

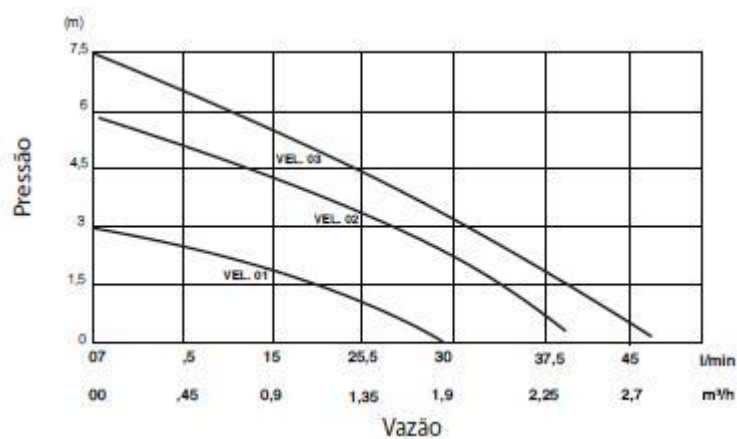


Figura 16 - Curva de desempenho da bomba de circulação
Fonte: Manual ROWA S50



Figura 17 – Fotografia da bomba de circulação
Fonte: Autoria própria.

3.3.6 Protótipos de leito de secagem

Com o intuito de transferir calor ao lodo de esgoto foram confeccionados 2 protótipos de leitos de secagem, construídos com diferentes materiais, conforme segue:

Protótipo 1: o protótipo de leito de secagem 1, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 18, é um piso radiante construído em concreto convencional, onde é depositado o lodo de esgoto a ser higienizado, contendo em seu interior uma serpentina de tubos de cobre de 15 mm de diâmetro. Possui uma área igual a 1 m² e foi construído no interior de uma caixa confeccionada em chapas metálicas de 1,5 mm de espessura. Abaixo do piso de concreto convencional há uma camada de concreto leve, confeccionado com adição de vermiculita expandida. Entre as camadas de concreto leve e concreto convencional, foi colocada uma chapa de poliestireno expandido (EPS) de 15 mm de espessura, com o intuito atuarem como isolantes térmicos. Na parte frontal foi instalada uma chapa de vidro para permitir a visualização do lodo no interior do protótipo, durante os ensaios de higienização.

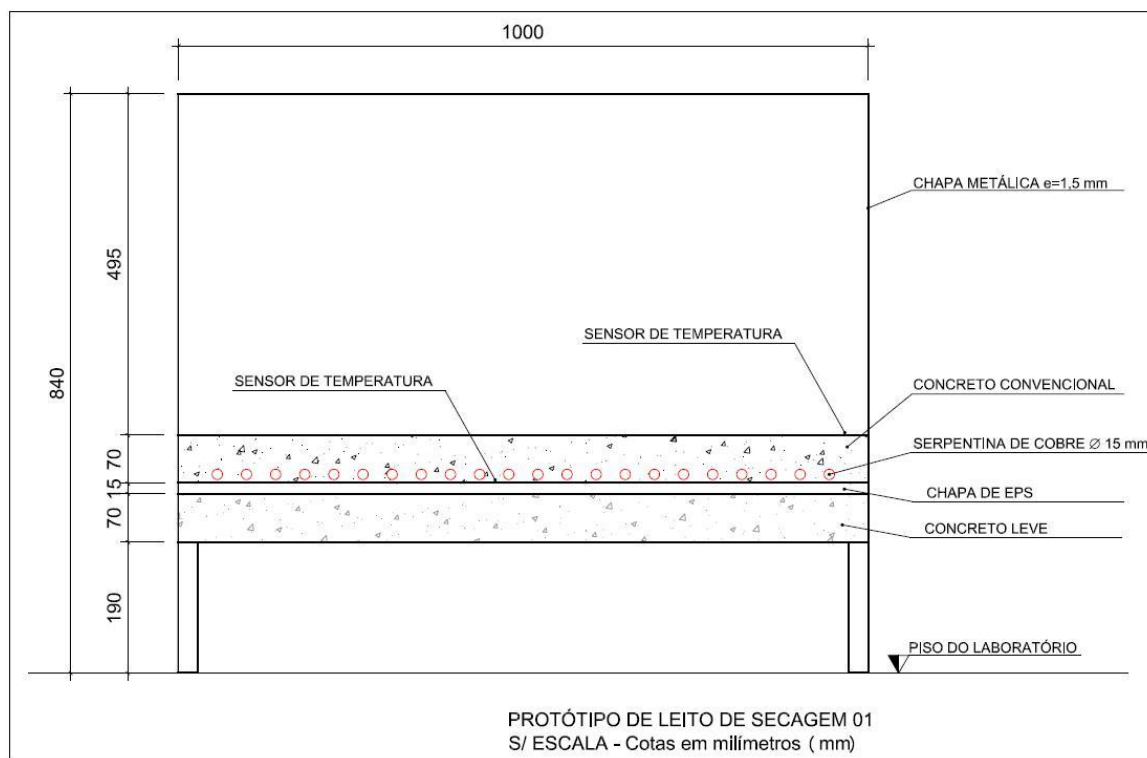


Figura 18 - Representação esquemática do protótipo de leito de secagem 1
Fonte: Autoria própria.

Instalaram-se sensores de temperatura analógicos para monitorar a temperatura da água no início e final da serpentina (entrada e saída da água no protótipo), no interior do piso (altura da serpentina) e na base do piso de concreto convencional.

Também foram instaladas nas tubulações, válvulas de fechamento que impedem a circulação de água pelo protótipo.

A sequência da construção do protótipo 1 pode ser visualizada na Figura 19, enquanto que a Tabela 6 apresenta algumas características dos materiais empregados.

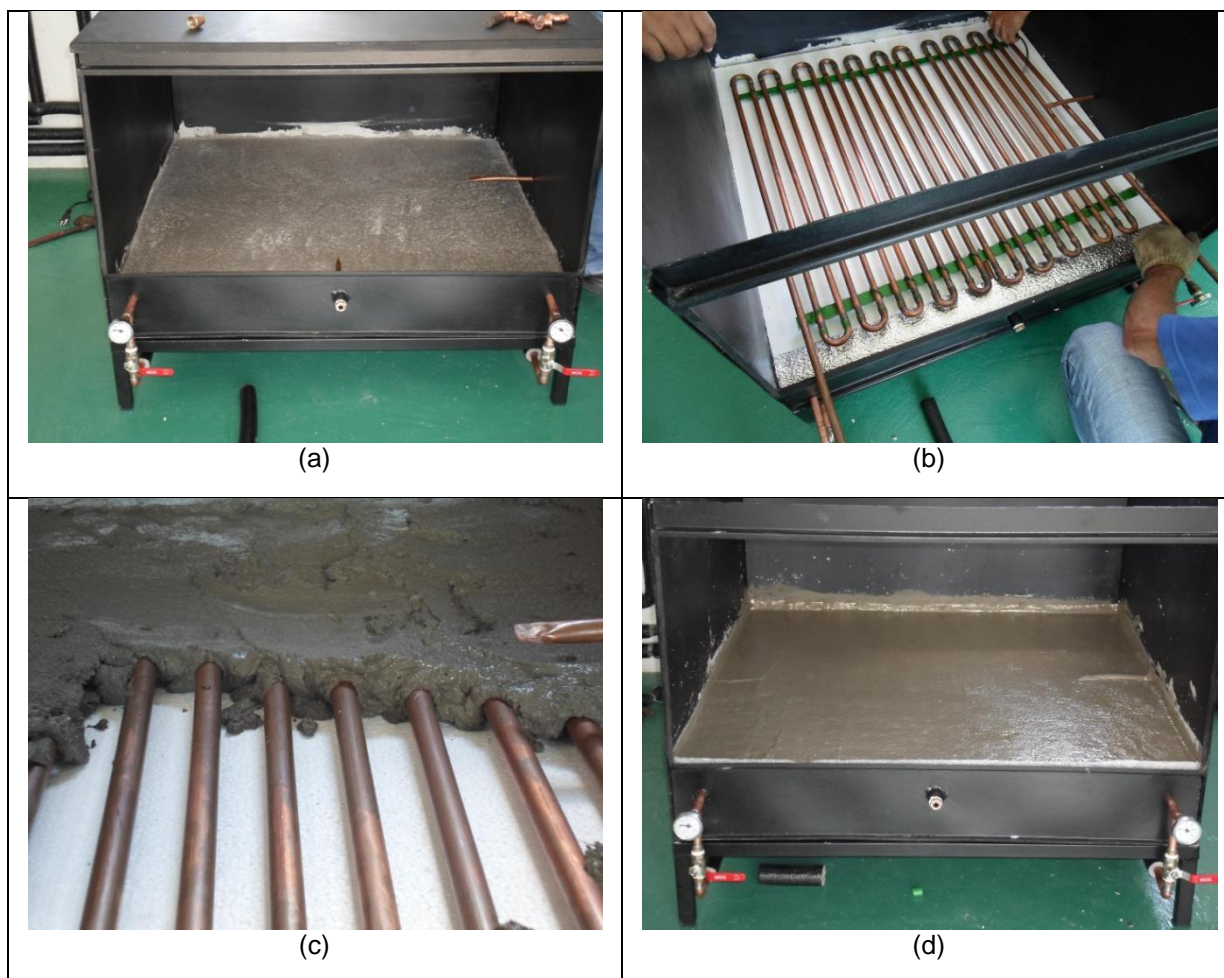


Figura 19 - Sequência de construção do protótipo 1: (a) protótipo 1 somente com a base de concreto leve e sensores de temperatura; (b) colocação da chapa de EPS e da serpentina; (c) concretagem do piso; (d) protótipo 1 finalizado.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Características dos materiais empregados no protótipo 1

Material	Densidade de massa aparente (ρ) (kg/m^3)	Condutividade térmica (λ) (W/m.K)	Calor específico (c) (kJ/kg.K)
Concreto convencional	2200 – 2400	1,75	1,00
Concreto Leve	400 - 800	0,24 – 0,31	1,00
Poliestileno Expandido – EPS ^[1]	27,5	<0,035	1,42
Cobre	8900	380	0,38

Fontes: NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003)

[1] Informações fornecidas pelo fabricante.

Protótipo 2: o protótipo de leito de secagem 2, cuja representação esquemática pode ser visualizada na Figura 20, possui área em sua base igual a 1

m² e foi construído no interior de uma caixa metálica. Foi construído com base de concreto leve e uma serpentina de tubos de cobre de 15 mm de diâmetro nominal, contendo uma chapa metálica na base da serpentina. Neste protótipo, o lodo de esgoto é depositado diretamente sobre a serpentina onde se realiza a transferência de calor.

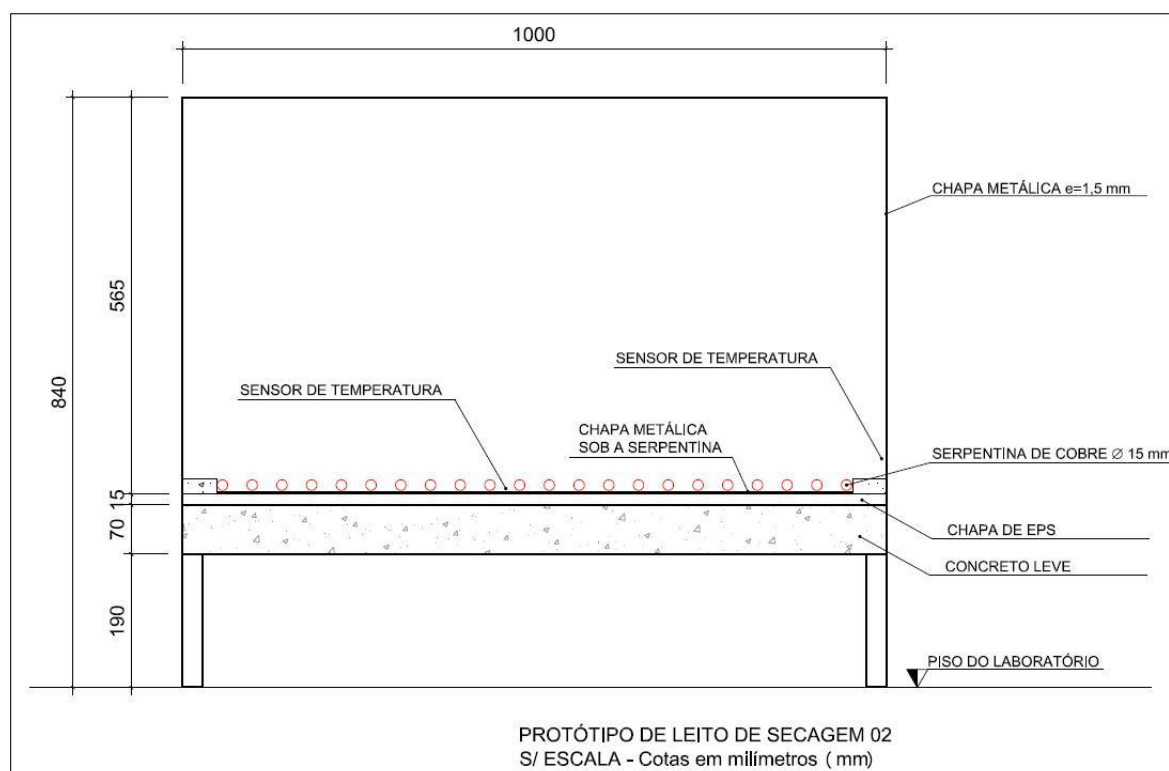


Figura 20 - Representação esquemática do protótipo de leito de secagem 2
Fonte: Autoria própria.

Entre a base de concreto e a serpentina foi colocada uma chapa de EPS com espessura de 15 mm (Figura 21). Nas bordas, entre a serpentina e caixa metálica, foi colocada uma camada de concreto, para impedir infiltrações do lodo de esgoto. Na parte frontal foi instalada uma chapa de vidro, para permitir a visualização do lodo no interior do protótipo, durante os ensaios de higienização.

Instalaram-se sensores de temperatura analógicos para monitorar a temperatura da água no início e final da serpentina (entrada e saída da água no protótipo), na altura da serpentina e um sensor que mede a temperatura no interior da camada de lodo (aproximadamente 5 cm acima da serpentina).

Também foram instaladas nas tubulações, válvulas de fechamento que impedem a circulação de água pelo protótipo.

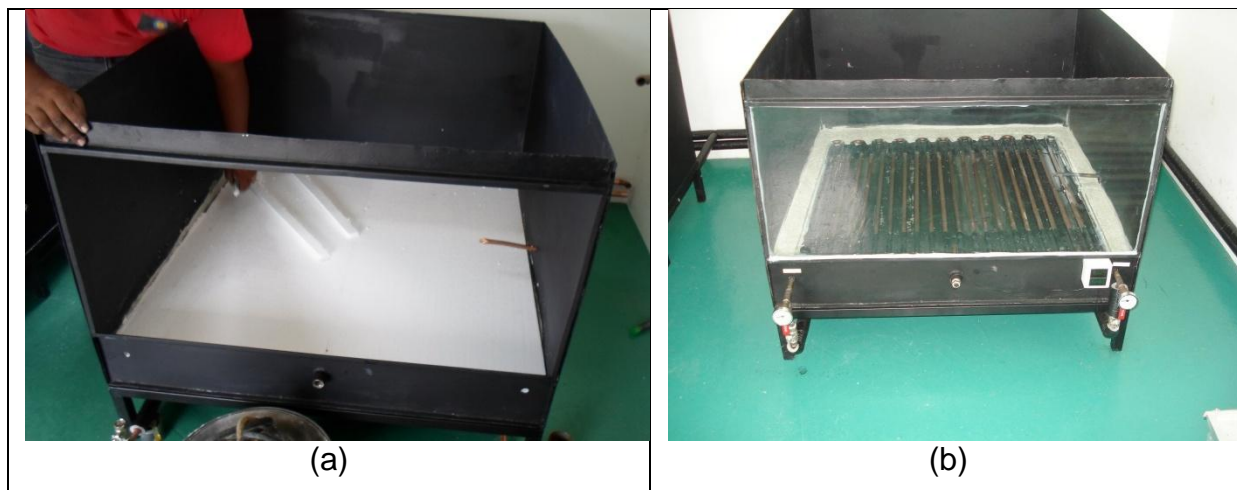


Figura 21 - Construção do protótipo 2: (a) base de concreto leve e chapa de EPS; (b) protótipo 2 finalizado.

Fonte: Autoria própria.

3.3.7 Sensores de temperatura

O sensor utilizado para medir a temperatura da água no interior das tubulações (Figura 22) possui as seguintes características:

- Fabricante: BRASITERM;
- Modelo: BT D50R 120;
- Faixa de medição: 0 a 120 °C;
- Temperatura máxima: 120 °C;
- Haste: metálica;
- Comprimento da haste: 10 mm;
- Diâmetro da haste: 9 mm.



Figura 22 – Fotografia do sensor de temperatura
Fonte: Autoria própria.

Para monitoramento da temperatura no manto de lodo depositado sobre os protótipos utilizaram-se termopares tipo K, conectados a um módulo de aquisição e registro de dados (Figura 23).

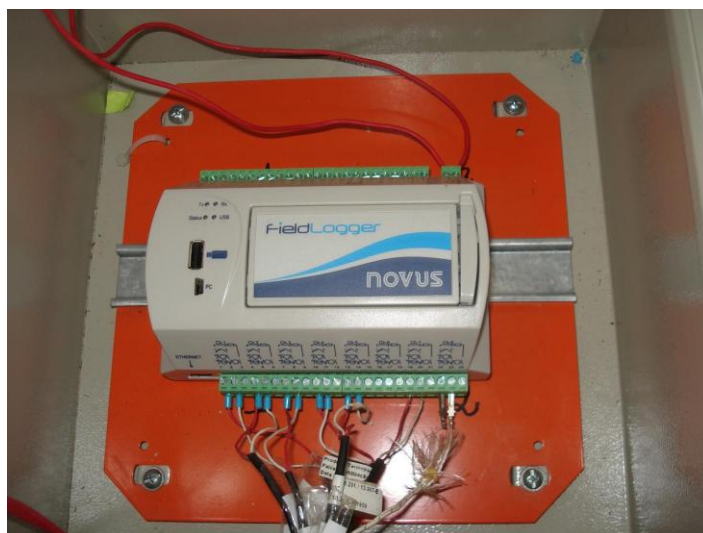


Figura 23 – Fotografia do módulo de aquisição e registro de dados
Fonte: Autoria própria.

3.3.8 Sistema de comando

O sistema de comando permite a programação de acionamento das bombas que realizam a circulação de água entre os protótipos do sistema, a partir do monitoramento da temperatura de água no ponto de consumo do reservatório térmico. Para monitorar a temperatura no ponto de consumo do reservatório térmico foram instalados três termostatos digitais, de modo a controlar o acionamento da circulação de água, podendo ser:

- a) Circulação utilizando somente energia solar;
- b) Circulação utilizando energia solar e energia do biogás;
- c) Circulação utilizando energia solar e energia elétrica.

As características dos termostatos digitais são apresentadas a seguir:

- Fabricante: Full Gauge®;
- Modelo: TIC-17RGT;
- Alimentação direta: 115 ou 230 Vac;
- Temperatura de controle: - 50 a 105 °C;
- Temperatura de operação: 0 a 50 °C;
- Resolução: 0,1 °C (entre -10 e 10 °C) e 1 °C no restante da faixa;
- Corrente máxima: 16(8)A / 250 Vac 1HP;
- Umidade de operação: 10 a 90 % UR (sem condensação);
- Dimensões: (71 x 28 x 71) mm.

3.3.9 Medidor de energia

O medidor de energia elétrica permite monitorar o consumo oriundo da resistência elétrica. As características são apresentadas a seguir:

- Fabricante: R. E. Eletricidade;
- Umidade para operação: $\leq 85\%$;
- Umidade para armazenamento: $\leq 95\%$;
- Temperatura de operação: - 20 até +50 °C;
- Temperatura de armazenamento: - 30 até +70 °C;
- Padrão internacional: IEC 62053-21;

- Grau de proteção: IP 51;
- Classe de proteção isolante: II;
- Tensão nominal: 230 Vac 110 Vac;
- Corrente máxima avaliada (Imax): 100 A;
- Alcance da frequência operacional: 45 ~ 66Hz \pm 10%;
- Consumo de potência interna: \leq 2W/10VA;
- Memória de dados: 20 anos.

O painel do sistema de comando e o medidor de energia elétrica estão representados na Figura 24.



Figura 24 – Fotografia do painel do sistema de comando
Fonte: Autoria própria.

3.4 ENSAIOS

Para avaliar a eficiência do sistema de aquecimento para higienização e secagem de lodo de esgoto executaram-se, ao todo, três ensaios. Os dois primeiros foram realizados sem a adição do lodo aos protótipos e o objetivo foi avaliar o comportamento do sistema apenas em relação ao aquecimento da água utilizada para circulação, fazendo uso somente de energia solar, no primeiro ensaio, e

energia solar complementada com energia elétrica, que simula a energia oriunda do biogás, no segundo ensaio.

Já o terceiro ensaio foi realizado com os protótipos alimentados com lodo de esgoto monitorando-se os patamares térmicos atingidos no manto de lodo, avaliando dessa forma, sua capacidade de higienização. Também se avaliou a capacidade do sistema em secar o lodo, por meio de análises de teor de sólidos totais realizados antes e depois do processo, assim como também se quantificou a energia oriunda do biogás requerida pelo sistema, por meio de simulação com a resistência elétrica acoplada ao reservatório térmico. A Figura 25 apresenta um diagrama esquemático dos três ensaios que foram realizados.

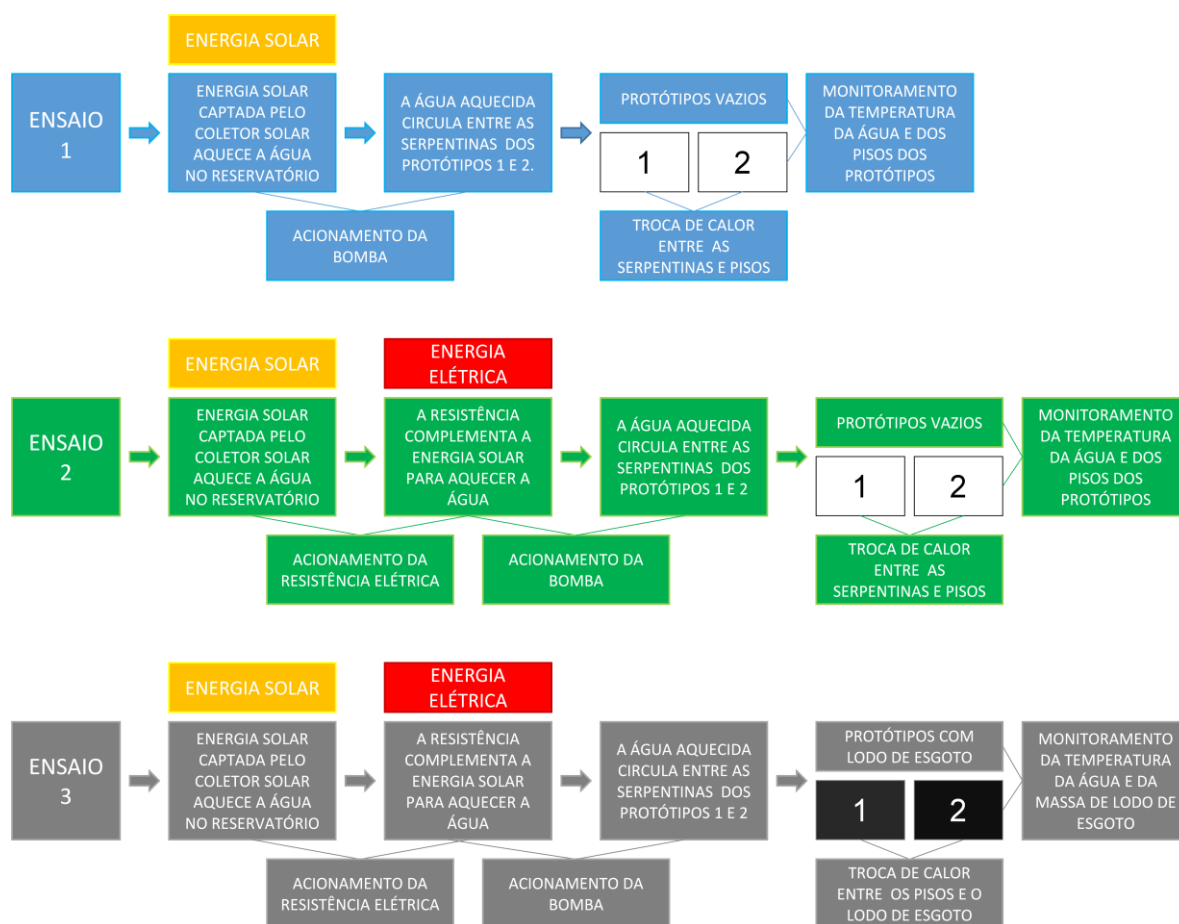


Figura 25 - Diagrama esquemático dos ensaios
Fonte: Autoria própria

3.4.1 Aquecimento dos protótipos com energia solar

O primeiro ensaio teve como objetivo avaliar o desempenho do sistema de aquecimento utilizando somente a energia solar foi executado em dois dias com condições climáticas distintas, sendo um dia ensolarado e um dia nublado. Os ensaios ocorreram nos dias 16/03/2015 e 23/03/2015. A vazão da bomba foi ajustada para trabalhar na velocidade 3, uma vazão equivalente a 2,7 m³/h, considerando que o sistema trabalhava em baixa pressão.

Durante o período de circulação de água entre os protótipos foram registradas as temperaturas do sistema, conforme segue:

- Na entrada e saída do coletor solar;
- No ponto de consumo do reservatório térmico;
- Na entrada e saída dos protótipos 1 e 2 (temperatura da água antes e após circular pelas serpentinas);
- No interior do piso de concreto do protótipo 1;
- Na superfície do piso de concreto do protótipo 1;
- Na superfície (altura da serpentina) do protótipo 2;

3.4.2 Aquecimento dos protótipos com energia complementar à energia solar

Esse ensaio foi realizado em dois dias distintos, sendo o primeiro no dia 30/03/2015 com o tempo nublado e o segundo no dia 13/04/2015, com o dia ensolarado. Para o aquecimento do sistema, utilizou-se energia solar e energia oriunda de uma resistência elétrica, que foi programada para atuar até a temperatura da água atingir 90,0 °C. Quando a temperatura da água atingia esse patamar a resistência era desligada, sendo automaticamente religada sempre que a temperatura decaía 2 °C. Ou seja, quando a temperatura da água registrava 88 °C, a resistência era novamente acionada, mantendo, dessa forma, a temperatura da água próxima aos 90 °C para circulação entre os protótipos.

Durante o período de circulação de água entre os protótipos foram registradas os seguintes dados:

- Temperatura na entrada e saída do coletor solar;
- Temperatura no ponto de consumo do reservatório térmico;

- Temperatura na entrada e saída dos protótipos 1 e 2 (temperatura da água antes e após circular pelas serpentinas);
- Temperatura no interior do piso de concreto do protótipo 1;
- Temperatura na superfície do piso de concreto do protótipo 1;
- Temperatura na superfície (altura da serpentina) do protótipo 2;
- Consumo de energia elétrica total.

3.4.3 Ensaio de higienização e secagem do lodo de esgoto

O ensaio de higienização e secagem de lodo de esgoto foi realizado simultaneamente nos protótipos 1 e 2.

Os dois protótipos foram alimentados com uma camada de 10 cm de lodo de esgoto, oriundo do sistema de tratamento da ETE Padilha Sul. O lodo foi coletado no pátio de cura, após passar por adensamento em centrífuga. O lodo foi transportado com auxílio de um carrinho de mão e assentado nos protótipos utilizando-se uma pá e uma colher plástica (Figura 26).

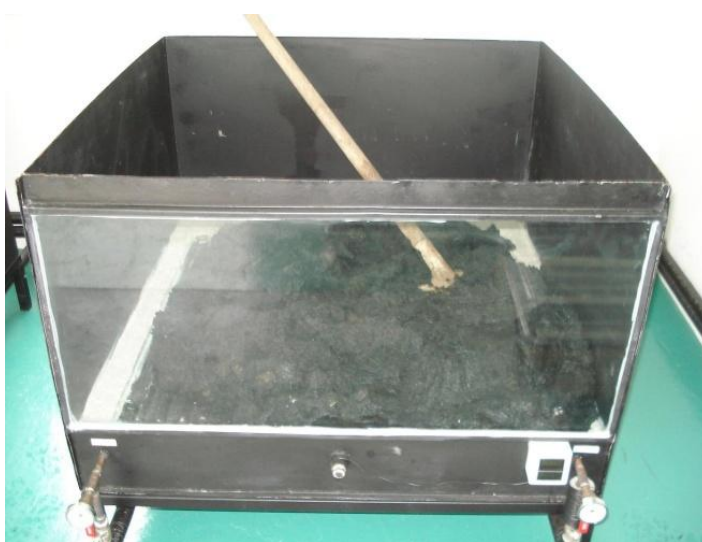


Figura 26 - Lodo de esgoto depositado no protótipo 2
Fonte: Autoria própria.

Para monitorar a temperatura no manto de lodo depositado sobre os protótipos foram instalados termopares do tipo K, sendo um par por protótipo. Os

termopares foram posicionados em altura aproximada de um terço inferior da camada de lodo, ou 3,3 cm a partir da base dos protótipos (Figura 27). Os termopares foram posicionados com auxílio de um tubo de PVC (Figura 28), para servir de suporte e assegurar a fixação correta na altura desejada, durante todo o ensaio. Os termopares foram conectados a um módulo de aquisição de dados, que foi programado para registrar a temperatura a cada 30 segundos.

Após a fixação dos termopares, os protótipos foram cobertos com sacos plásticos com o objetivo de se manter a umidade no manto de lodo, conforme Figura 29.

Com os protótipos cobertos deu-se início a circulação de água, que foi aquecida até atingir o patamar de 90 °C, sendo mantida constante durante o restante do ensaio.

Os protótipos permaneceram com as coberturas plásticas durante os três primeiros dias do ensaio, denominando-se o período de estágio de higienização. Após exatas 72 horas de operação do sistema, as coberturas plásticas foram retiradas, denominando-se o período restante de estágio de secagem.

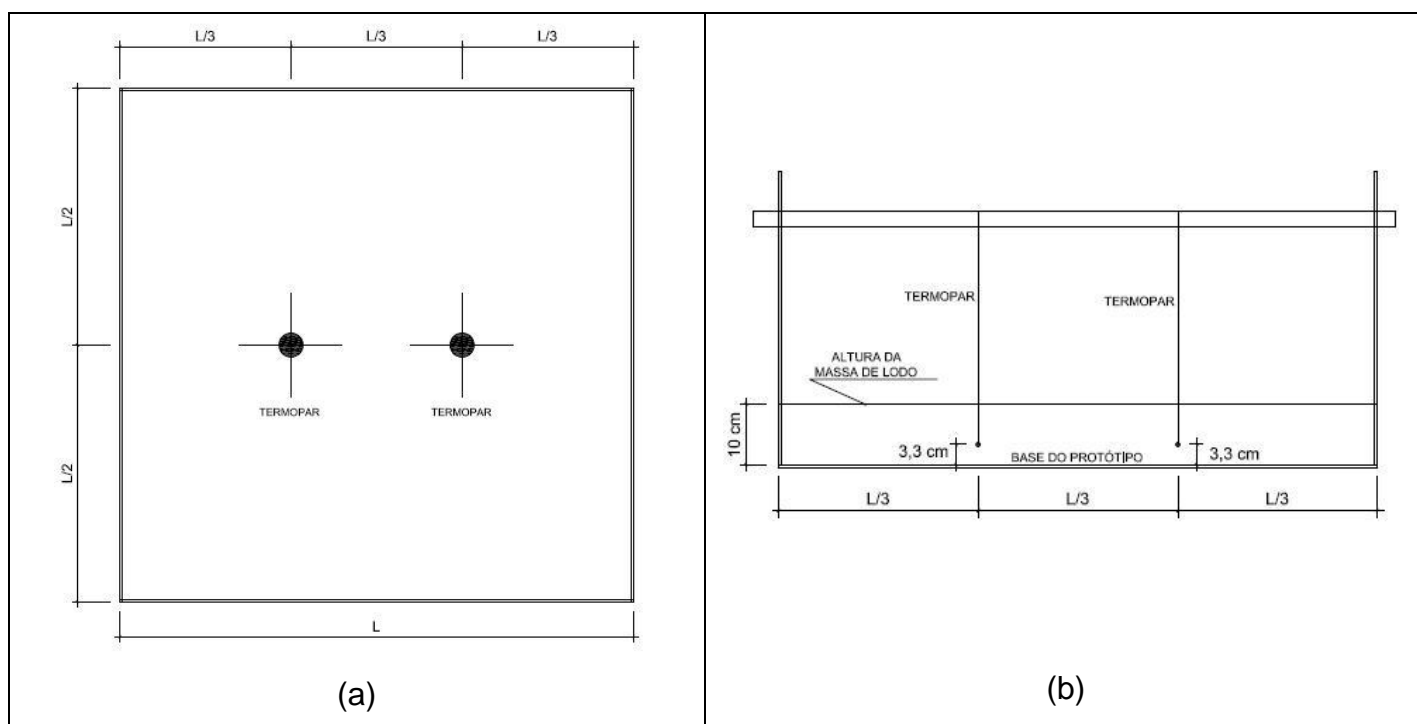


Figura 27 - Posição dos termopares: (a) vista em planta; (b) vista em corte
Fonte: do autor



Figura 28 - Fixação dos termopares nos protótipos
Fonte: Aatoria própria.



Figura 29 – Fotografia dos protótipos com coberturas plásticas
Fonte: Aatoria própria.

O próximo estágio consistiu em operar o sistema para avaliar a secagem do lodo de esgoto. Para isso, o sistema permaneceu em operação por mais 7 dias com os protótipos descobertos.

3.4.4 Teor de sólidos totais

As coletas de amostras para monitoramento do teor de sólidos totais foram realizadas com auxílio de uma colher de metal, retirando exemplares de nove pontos distintos dentro de cada protótipo. Os exemplares foram misturados em um balde de plástico e a amostra composta foi disposta em recipientes plásticos, onde havia a identificação do protótipo e data da coleta (Figura 29). O excedente de lodo coletado foi devolvido aos respectivos protótipos. As coletas de amostras de lodo ocorreram com 0, 3, 7 e 10 dias corridos de operação do sistema, sendo determinado o teor de sólidos totais pelo método de balança termogravimétrica.



Figura 30 - Coleta de amostras de lodo de esgoto
Fonte: Autoria própria

3.4.5 Dimensionamento do sistema térmico

A finalidade desse dimensionamento é verificar se uma ETE de pequeno ou médio porte tem quantidade suficiente de biogás para higienizar o lodo de esgoto, considerando as mesmas condições dos ensaios. Portanto, faz-se necessário saber, primeiramente, a quantidade de energia consumida para higienização, a quantidade de lodo de esgoto e a quantidade de biogás produzido em uma ETE.

Para o dimensionamento foram respeitadas as condições utilizadas nos ensaios em relação à altura da camada de lodo depositada nos protótipos e o teor de sólidos do lodo bruto (lodo depositado nos protótipos antes do início do ensaio).

A quantidade de energia necessária foi mensurada a partir do consumo da resistência elétrica acoplada ao reservatório térmico. Sabendo-se o total de horas de funcionamento, tem-se a medida unitária de energia consumida por dia pelo sistema.

Para calcular a quantidade de energia necessária para higienização do lodo de esgoto, adotou-se o critério de se mensurar o tempo em que a massa de lodo demora até atingir sua temperatura de saturação adicionando o tempo de permanência, conforme segue:

- 30 minutos, quando a temperatura na massa de lodo for superior a 70 °C;
- 2 horas, quando a temperatura na massa de lodo estiver entre 54 e 70 °C.

Portanto, a energia total para higienização do lodo de esgoto foi calculada somando-se os tempos para a massa atingir sua temperatura de saturação e tempo de permanência necessário.

A energia total para higienização foi então dividida pela área e pelo volume de esgoto depositado nos protótipos, resultando em medidas unitárias de energia por m² de leito de secagem e energia por m³ de esgoto higienizado, respectivamente.

Para estabelecer uma equivalência energética com o biogás, inicialmente, a energia foi correlacionada ao metano, para, em seguida, correlacionar ao biogás. Nesse sentido, foi adotado um biogás com 70% de metano.

Para estabelecer a equivalência energética em volume de metano, o valor em kWh é dividido pelo seu PCI, que equivale a 9,9 kWh/m³. Uma vez estabelecido o volume de metano, é preciso considerar a eficiência do equipamento que realiza a sua queima, que foi adotado em 80%. Portanto, dividindo-se o volume de metano pela eficiência do queimador, temos o volume necessário de metano. O biogás, por sua vez, dependerá do teor de metano que o compõe para saber o volume necessário. Nesse caso, adotou-se 70%, portanto, o volume necessário é o volume de metano dividido pelo teor de metano.

Para cálculo da área necessária para higienização de lodo é necessário saber a produção de lodo da ETE e seu teor de sólidos totais iniciais (teor em que o

lodo é descartado). Assim, a estimativa de produção de lodo, assim como o teor de sólidos totais, é o resultado da média medida em ETEs que atendem entre 10.000 e 100.000 habitantes do ano de 2014.

O lodo de esgoto dos ensaios possuía 20% de teor de sólidos totais. Portanto, inicialmente, calculou-se a redução no volume do lodo, a partir de seu teor de sólidos totais inicial, até atingir os 20%. Dessa forma, esse dimensionamento leva em consideração que haverá uma etapa de desaguamento inicial para elevar o teor de sólidos totais do lodo de esgoto até 20%.

Sabendo-se o volume de lodo a ser higienizado, a área requerida pode ser calculada dividindo-se o volume pela altura da camada de lodo depositada sobre o leito de secagem, que no caso dos ensaios foi de 10 cm.

Para estimativa da quantidade biogás necessário, para ETEs com capacidade entre 10.000 e 100.000 habitantes, segue-se o mesmo procedimento descrito para estabelecer as medidas unitárias por m² de leito de secagem ou m³ de lodo higienizado.

A autonomia do sistema foi determinada a partir da comparação entre volume de metano requerido e o volume de metano teoricamente disponível.

A produção de metano pode ser estimada a partir do programa computacional denominado Probio versão 1.0, o qual foi desenvolvido pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), onde as taxas de produção de biogás são calculadas a partir de um conjunto de parâmetros físico-químicos inerentes ao esgoto, baseando-se no modelo proposto por Lobato (2011). Na ausência dos parâmetros físico-químicos do esgoto, os valores da produção de biogás são estimados a partir da vazão de operação ou população atendida pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

A produção teórica de metano foi estimada a partir da população atendida pela ETE, considerando a produção de 6,8 NL/hab.dia, que corresponde a produção média nas piores condições em reatores anaeróbios, de acordo com Lobato (2011).

A Figura 31 apresenta o fluxograma com as etapas do dimensionamento.

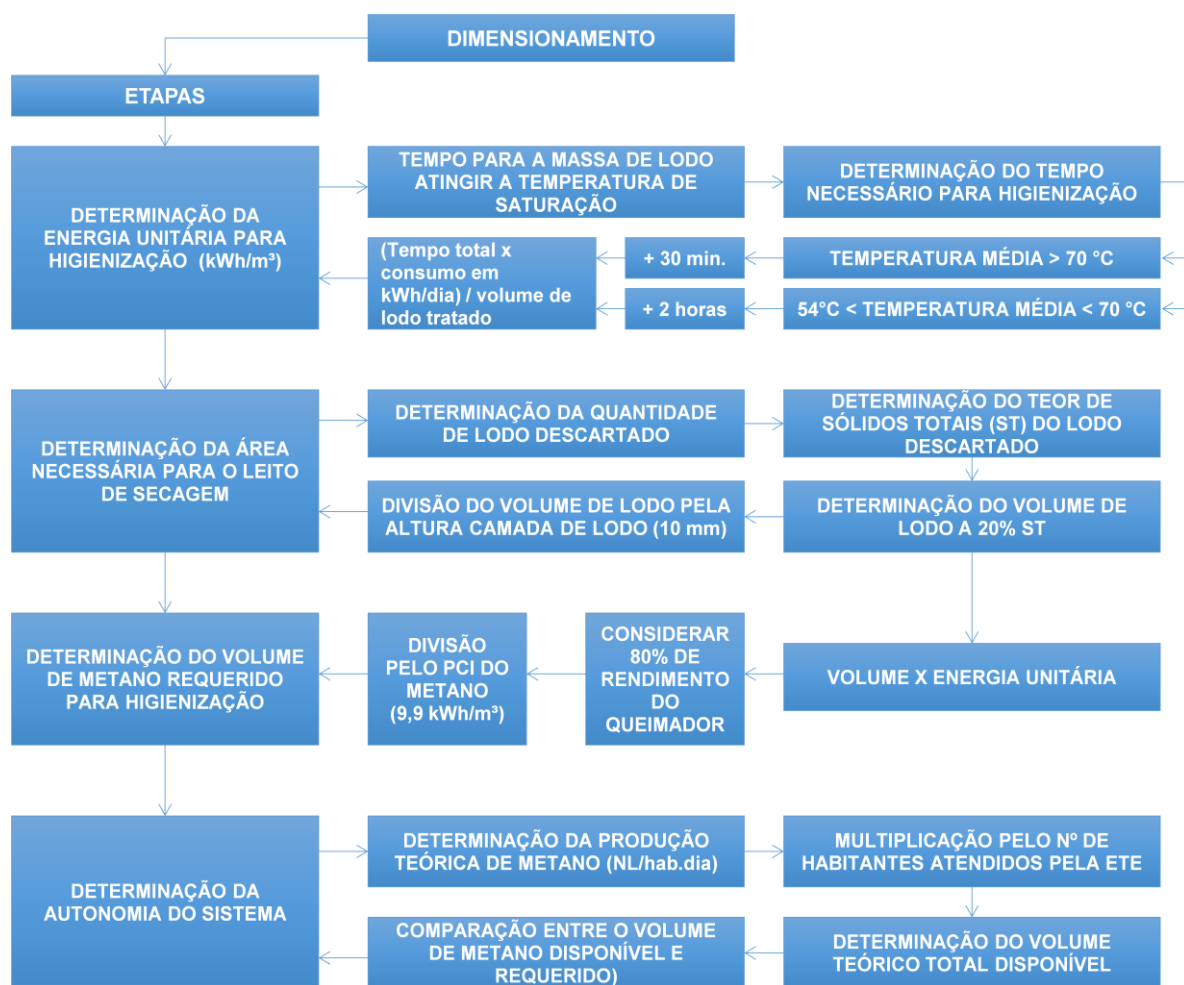


Figura 31 - Fluxograma do dimensionamento do sistema
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 REGISTROS DE TEMPERATURA DO SISTEMA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

O desempenho do sistema de aquecimento utilizando somente energia solar foi avaliado em duas oportunidades, nos dias 16/03/2015 e 23/03/2015. No primeiro dia havia sol e poucas nuvens, enquanto que no segundo dia o tempo estava nublado.

No primeiro dia avaliado, a energia solar elevou a temperatura da água até 63,5° C no ponto de consumo, enquanto não havia circulação de água entre os protótipos e o reservatório térmico. A temperatura ambiente no início do ensaio era de aproximadamente 24 °C. A energia necessária para elevar a temperatura de 200 litros de água de 24 °C até 90 °C equivale a 15,34 kWh. O coletor solar elevou a temperatura a 63,5 °C, portanto gerou 9,18 kWh de energia térmica, equivalendo a 60% da energia demandada para elevar temperatura da água a 90 °C.

A partir das 11 horas e 30 minutos, iniciou-se a circulação de água entre as serpentinas, com a temperatura da água em 63,5 °C, para troca de calor entre os pisos radiantes dos protótipos de leito de secagem. A partir deste instante, a temperatura da água no ponto de consumo caiu gradativamente, enquanto que as temperaturas nos pisos dos protótipos 1 e 2 aumentaram e se mantiveram praticamente inalteradas durante o período avaliado (Figuras 32, 33 e 34). A diferença de temperatura entre a entrada e saída do coletor solar foi em média igual a 7,3 °C.

A temperatura na superfície do protótipo 1 no início do ensaio era de 24 °C. A circulação da água aquecida pelo coletor solar elevou a uma temperatura de saturação em aproximadamente uma hora de funcionamento do sistema. A temperatura média nesse período foi de 37,5 °C. Essa temperatura se manteve até o desligamento do sistema, que ocorreu às 16 horas. A diferença de temperatura medida entre a entrada e saída da serpentina do protótipo foi, em média, de 1,7 °C.

Já no protótipo 2 a temperatura medida em sua superfície elevou-se rapidamente após o início da circulação da água na serpentina, sendo elevada a 46,0 °C em 15 minutos. Após esse instante a temperatura registrou leve decaimento

ao longo do ensaio, sendo que a temperatura média no período de funcionamento do sistema foi de 43,3 °C. A diferença de temperatura entre a entrada e saída da serpentina foi de aproximadamente 0,5 °C.

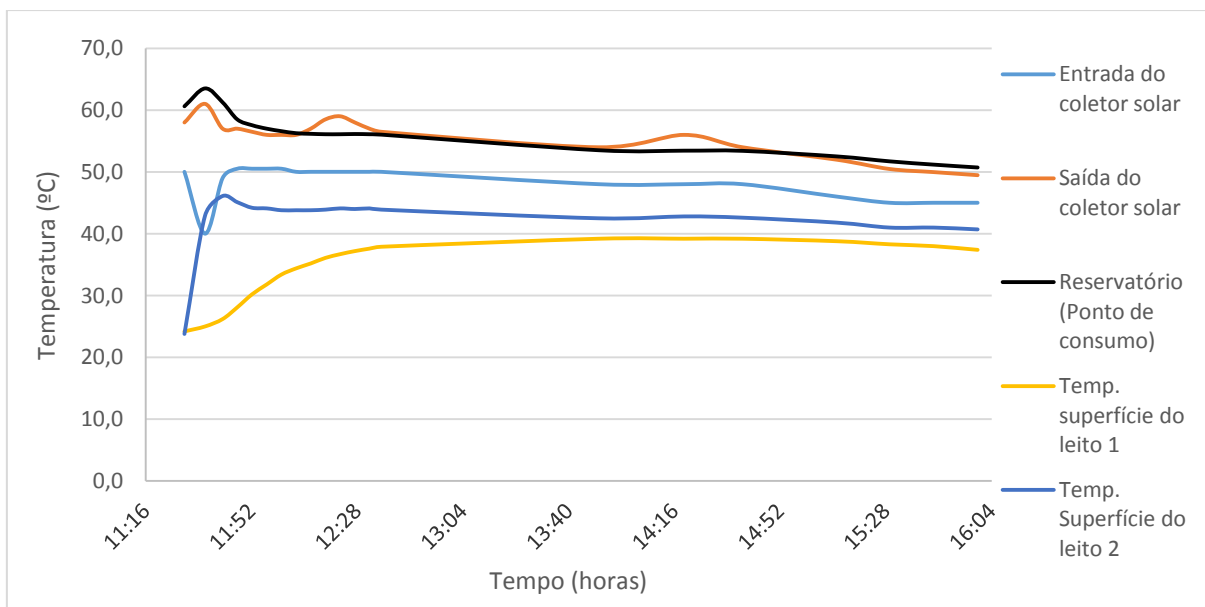


Figura 32 - Evolução da temperatura no sistema utilizando energia solar (16/03/2015 – dia ensolarado)

Fonte: Autoria própria.

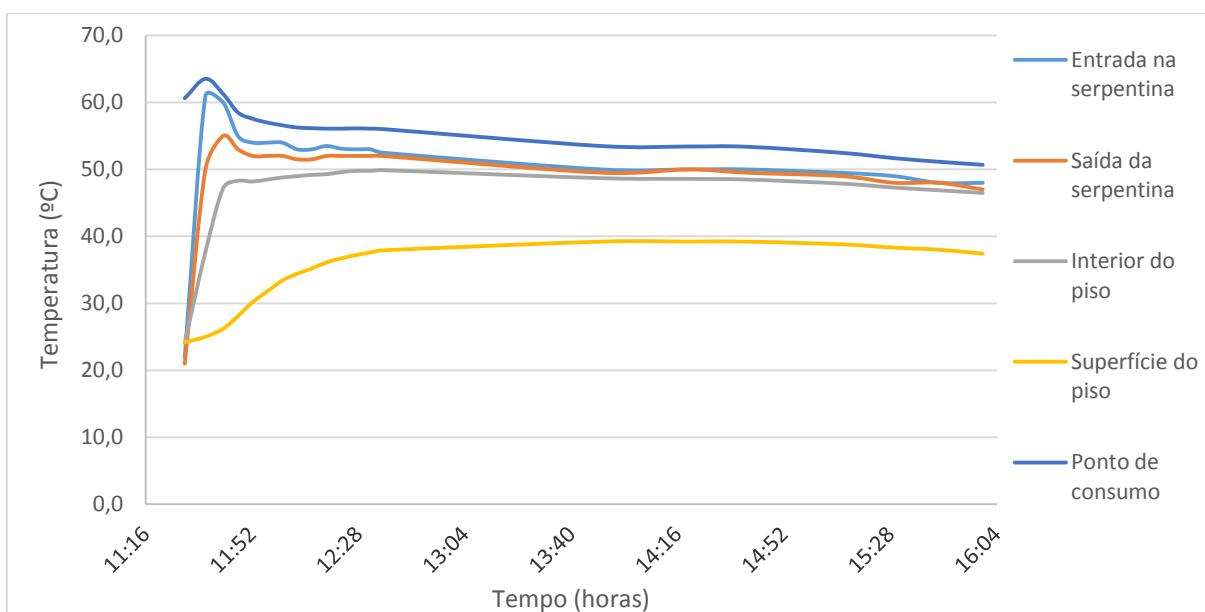


Figura 33 - Evolução da temperatura no protótipo 1 utilizando energia solar (16/03/2015 – dia ensolarado)

Fonte: Autoria própria.

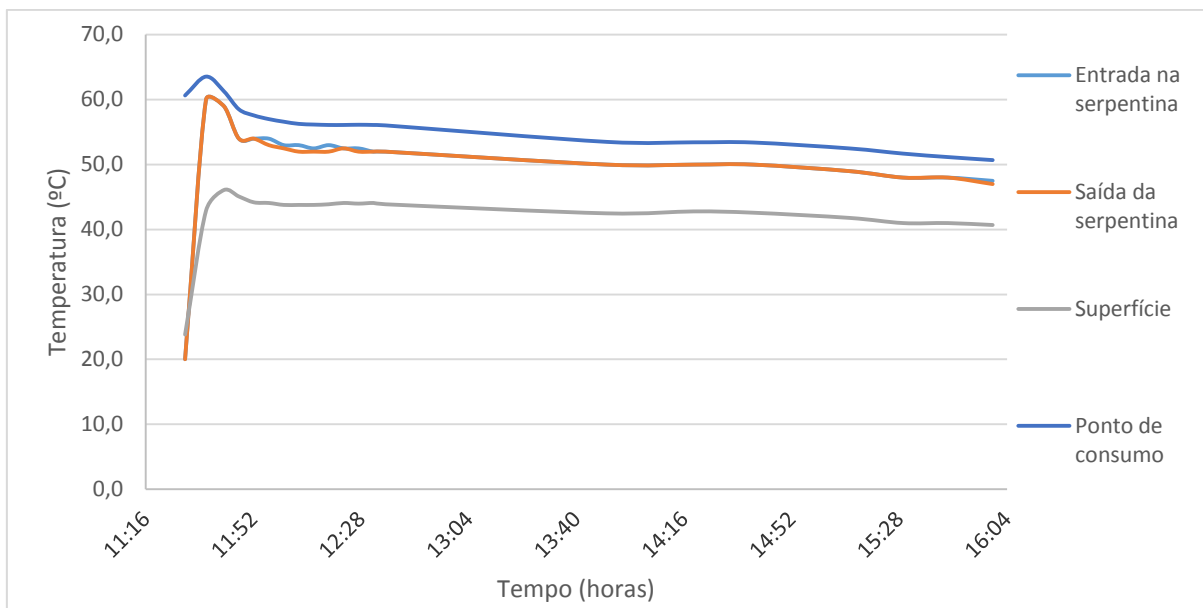


Figura 34 - Evolução da temperatura no protótipo 2 utilizando energia solar (16/03/2015 – dia ensolarado)

Fonte: Autoria própria.

No segundo dia de avaliação, que ocorreu no dia 23/03/2015, o tempo estava nublado e a temperatura ambiente no início do ensaio era de aproximadamente 21 °C, enquanto que a temperatura da água no ponto de consumo era 47,9 °C. A energia necessária para elevar 200 litros de água de 21 até 90 °C equivale a 16,04 kWh. O coletor solar proporcionou uma elevação da temperatura da água a 47,9 °C, gerando 6,25 kWh, o que equivale a 39 % da energia requerida para aquecer os 200 litros da água.

Após o início de ensaio, a temperatura da água no ponto de consumo teve uma queda de aproximadamente 4 °C nos primeiros 20 minutos e se manteve praticamente inalterada ao longo do período avaliado, sendo, em média, igual 44,2 °C.

A diferença de temperatura entre a entrada e saída do coletor solar foi em média igual 7,0 °C.

A circulação de água aquecida no protótipo 1 elevou a temperatura de sua superfície de 21,2 °C para 33,2 °C ao final do período, enquanto que a diferença da temperatura medida na entrada e na saída da serpentina foi, em média, igual a 1,4 °C.

A temperatura na superfície do protótipo 2 se manteve constante durante todo o período de circulação de água aquecida, sendo em média igual a 35,0 °C.

Praticamente não houve diferença nas temperaturas registradas na entrada e na saída da serpentina. Os registros de temperatura relativos ao ensaio de aquecimento do sistema por meio de energia solar, do dia 23/03/2015, são apresentados nas Figuras 35, 36 e 37.

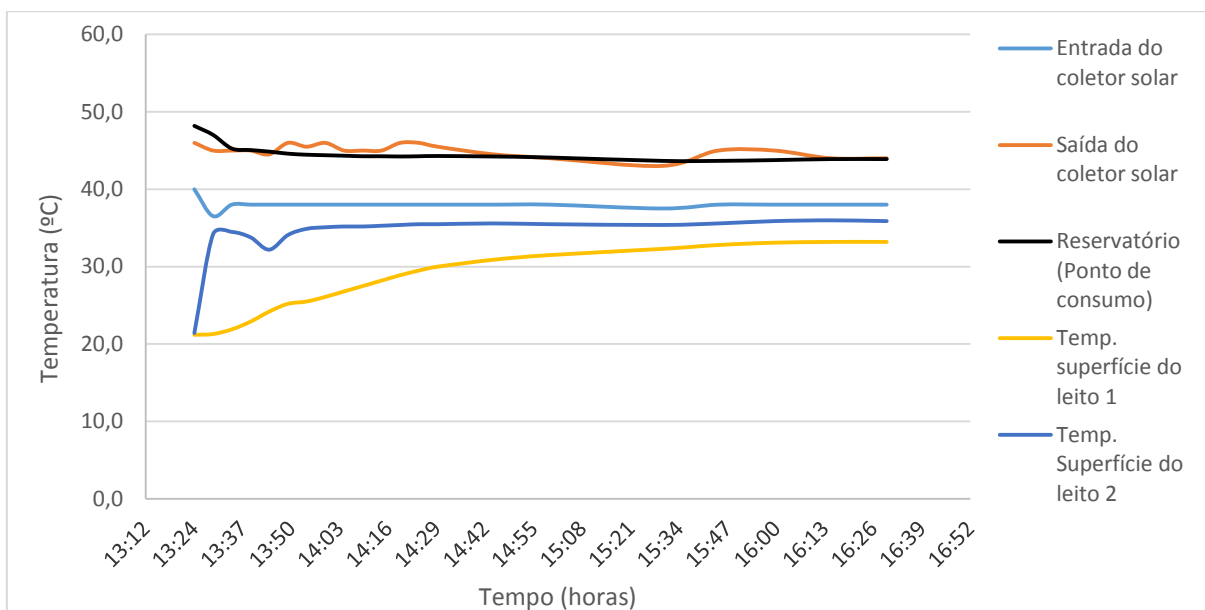


Figura 35 - Evolução da temperatura no sistema utilizando energia solar (23/03/2015 – dia nublado)

Fonte: Autoria própria.

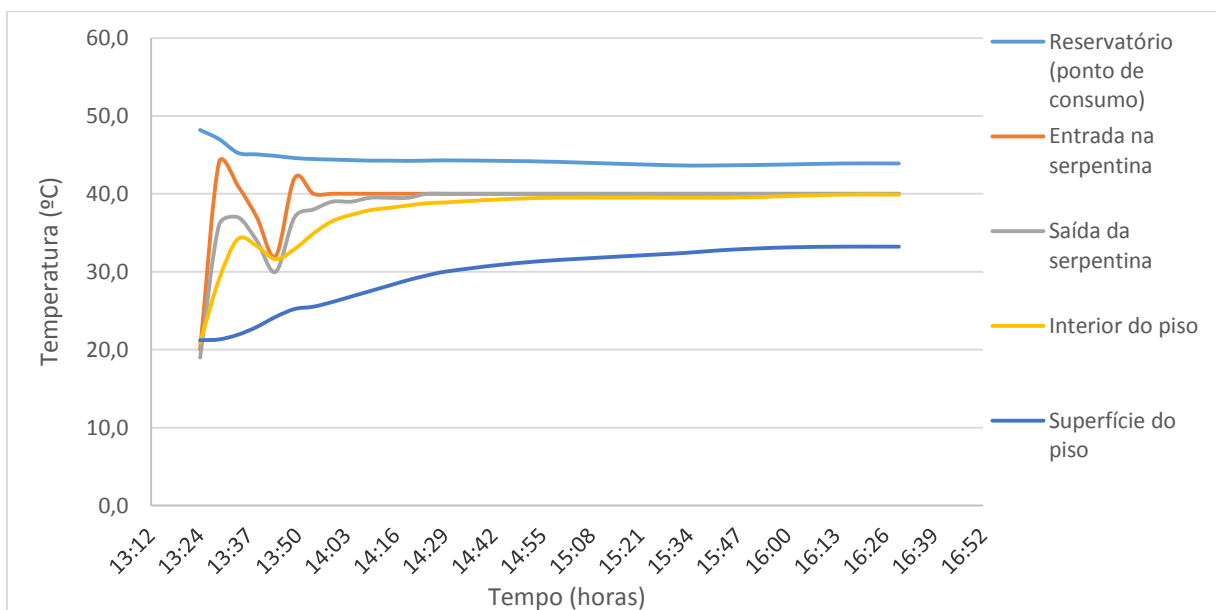


Figura 36 - Evolução da temperatura no protótipo 1 utilizando energia solar (23/03/2015 – dia nublado)

Fonte: Autoria própria.

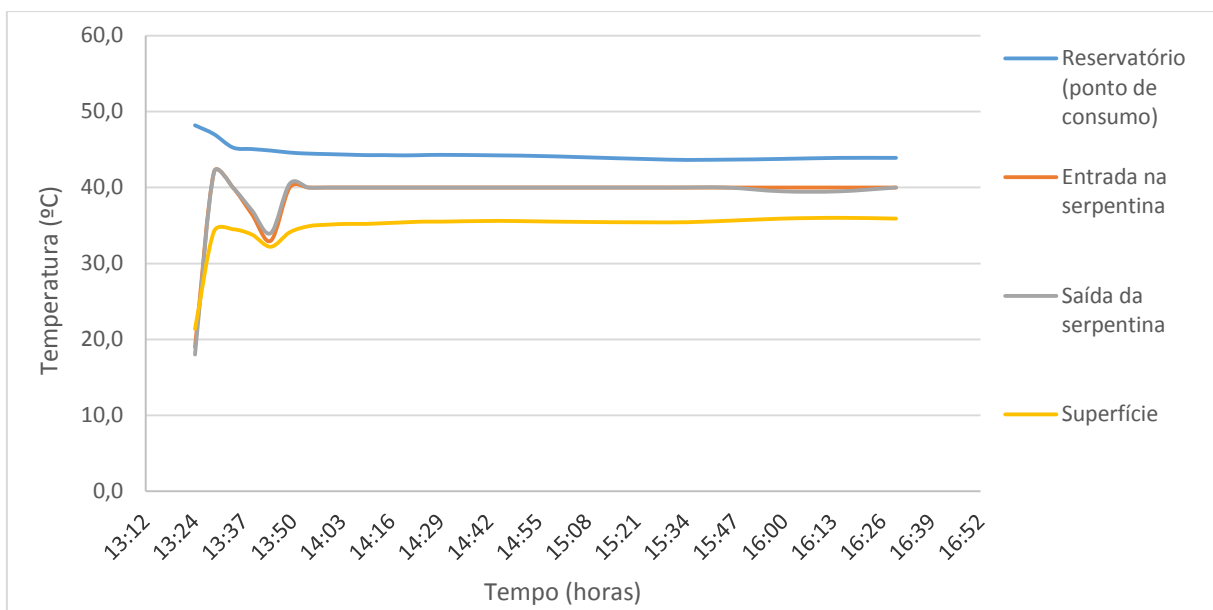


Figura 37 - Evolução da temperatura no protótipo 2 utilizando energia solar (23/03/2015 – dia nublado)

Fonte: Autoria própria.

4.2 REGISTROS DE TEMPERATURA UTILIZANDO ENERGIA COMPLEMENTAR À ENERGIA SOLAR

A energia complementar, demandada pelo biogás, foi quantificada por meio de uma resistência elétrica acoplada ao reservatório térmico. As avaliações ocorreram em dois dias diferentes e por igual período de tempo. A primeira avaliação ocorreu com o clima nublado, no dia 30/03/2015, enquanto que a segunda avaliação ocorreu no dia 13/04/2015, com dia ensolarado. O período de avaliação em ambos os dias foi de 6 horas e 20 minutos, sendo que a circulação de água entre os protótipos ocorreu simultaneamente ao acionamento da resistência elétrica. O consumo de energia no dia nublado foi de 18,52 kWh e a temperatura da água alcançada no período foi de 75,9 °C, enquanto que a energia consumida no dia ensolarado foi de 13,66 kWh e a temperatura da água chegou ao patamar de 90 °C.

Como foi estabelecida uma temperatura de 90 °C para operação do sistema pode-se verificar, por meio da equação 10, a quantidade de energia que é necessária para elevar 200 litros de água a esse patamar, dentro do reservatório

térmico. A Figura 38 demonstra a quantidade energia complementar requerida em função da temperatura inicial promovida pela energia solar.

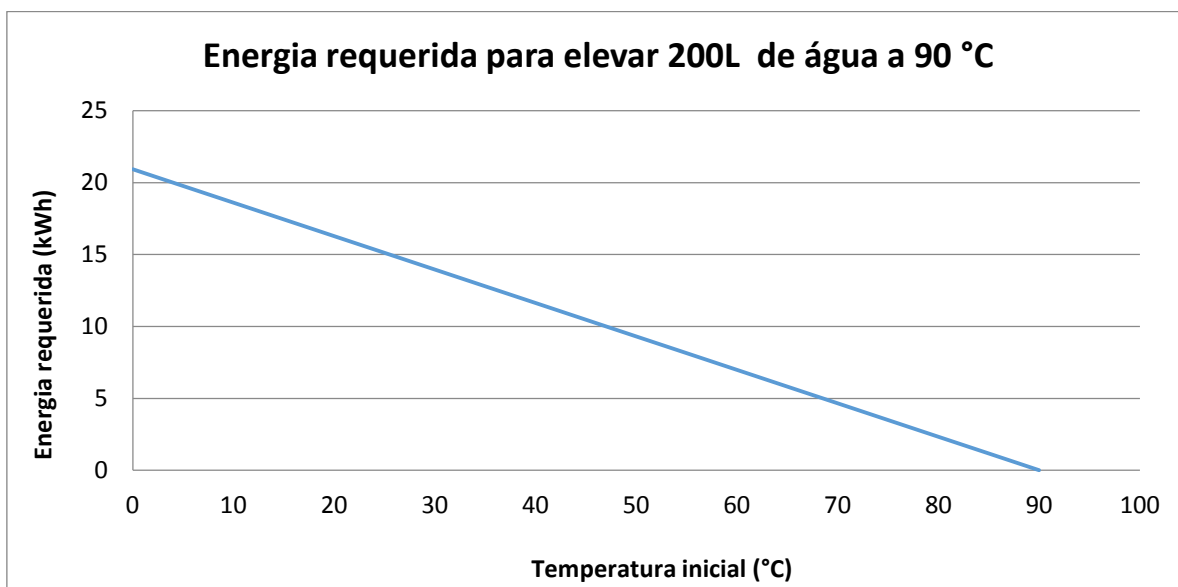


Figura 38 - Demanda teórica de energia para aquecimento de 200 L de água
Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram que a energia solar pré-aquece a água, gerando uma redução de energia complementar demandada pelo biogás para atingir os patamares térmicos necessários. No dia ensolarado, o consumo de energia complementar foi 26% menor em relação ao dia nublado e a temperatura de operação desejada de 90 °C foi atingida, fato que não ocorreu na avaliação realizada com o dia nublado. Porém comprovou-se que mesmo em dias nublados a energia solar proporciona uma redução na energia complementar, pré aquecendo a água, conforme apresentado nos gráficos das Figuras 39 e 40.

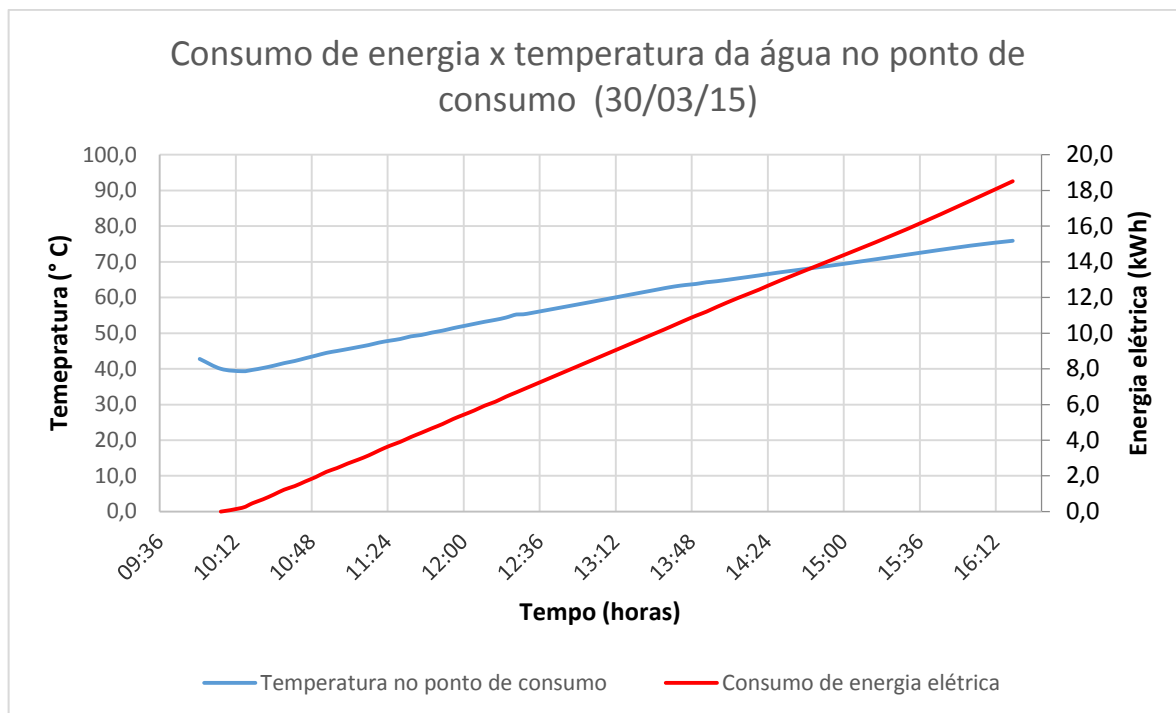


Figura 39 – Consumo de energia complementar em dia nublado
 Fonte: Autoria própria.

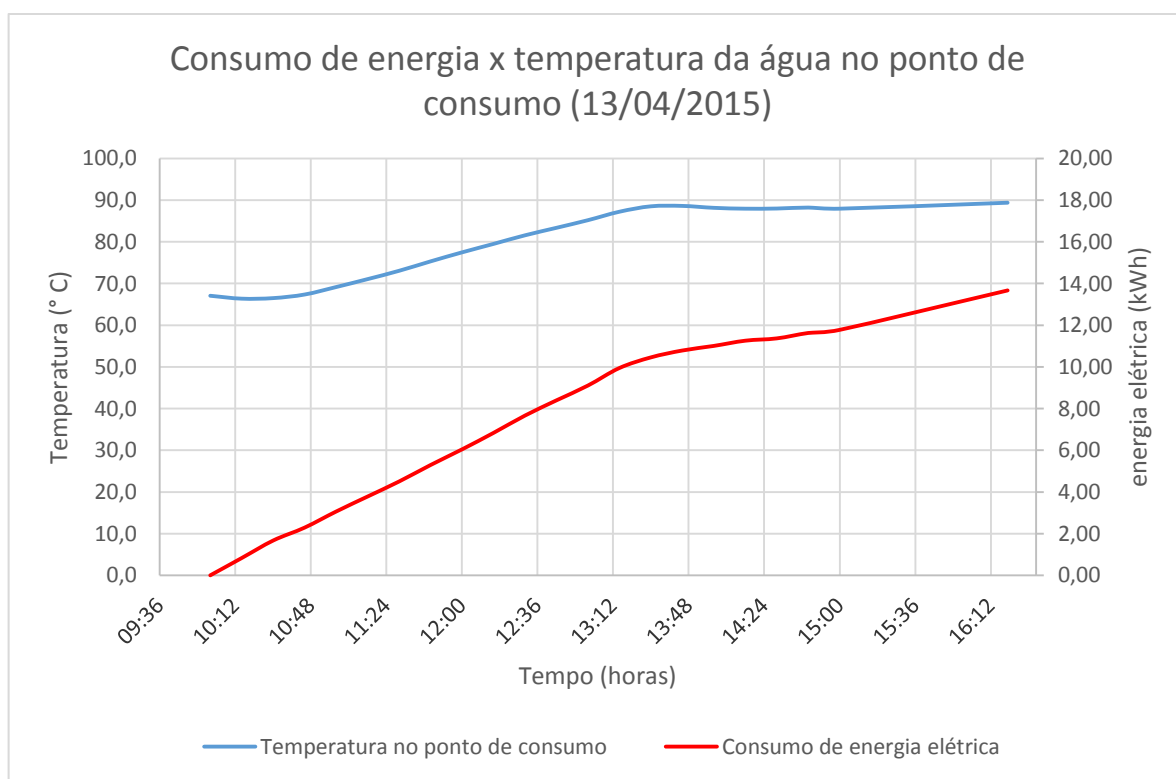


Figura 40 – Consumo de energia complementar em dia ensolarado
 Fonte: Autoria própria.

4.3 HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DO LODO DE ESGOTO NO PROTÓTIPO 1

A Figura 41 apresenta os resultados da evolução térmica no manto de lodo depositado sobre o protótipo 1.

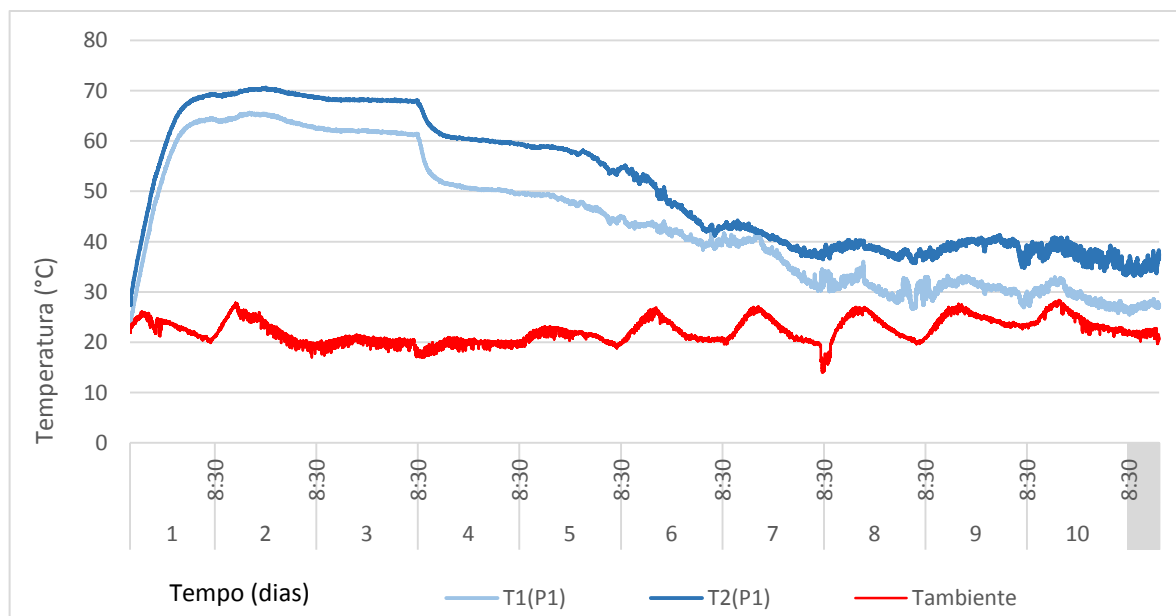


Figura 41 – Evolução da temperatura na massa de lodo (protótipo 1)
Fonte: Autoria própria.

O ensaio iniciou-se às 08 horas 30 minutos da manhã do dia 22/06/2015, quando foram ligados o aquecimento por meio da resistência elétrica e a bomba de circulação de água entre os protótipos. A temperatura ambiente no início do ensaio era de 12 °C, enquanto que a temperatura inicial da água no ponto de consumo, assegurada pelo coletor solar, era de 38,5 °C. Durante os três primeiros dias de operação do sistema, o protótipo permaneceu coberto com plásticos com o intuito de se manter o teor de umidade na massa de lodo, ou seja, não gerar incremento no teor de sólidos totais, e, por consequência, manter sua difusividade térmica, acelerando o aumento de temperatura (estágio de higienização). O teor de sólidos totais no lodo de esgoto antes do início do ensaio era de 21,75%.

Com essa configuração a massa de lodo atingiu sua temperatura de saturação em aproximadamente um dia de operação do sistema.

Durante o segundo dia de ensaio, as temperaturas médias registradas na massa de lodo na região onde estavam localizados os termopares T1 e T2, foram de 64,33 °C e 69,60 °C, respectivamente. Nesse estágio a massa de lodo apresentou sua temperatura máxima, sendo 65,6 °C na região do termopar T1 e 70,6 °C na região do termopar T2.

Já no terceiro dia de operação, com o protótipo ainda com a cobertura plástica, as temperaturas médias registradas foram um pouco inferiores em relação ao 2º dia, sendo 61,87 °C na região de T1 e 68,13 °C, na região de T2, ou 3,8% e 2,1% inferiores, respectivamente. Durante a operação do sistema no estágio de higienização, o teor de sólidos totais se manteve praticamente inalterado, conforme Figura 40.

Exatamente três dias após o início de operação do sistema, as coberturas plásticas foram retiradas dos protótipos. Neste momento, as temperaturas apresentadas na massa de lodo eram de 61,4 °C e 68 °C, respectivamente nos termopares T1 e T2. A partir desse momento a temperatura começou a cair gradativamente. Ao final do 4º dia de operação (1º dia de operação sem cobertura plástica), a temperatura já era em média 16 % menor.

Esse fato se deu por conta do aumento gradativo no teor de sólidos na massa de lodo e por consequência a diminuição de sua difusividade térmica. De acordo com Kriguel *et al.* (2015), o aumento do teor de sólidos totais dificulta o fluxo de calor pelo lodo de esgoto.

O sistema permaneceu em operação no estágio de secagem de lodo por 7 dias, 7 horas e 15 minutos. Ao final desse período, as temperaturas registradas foram respectivamente de 27,0 °C (T1) e 36,0 °C (T2), enquanto que a temperatura ambiente era de aproximadamente 20 °C. Essas temperaturas são respectivamente 57% e 49% inferiores às temperaturas registradas no início do estágio de secagem do lodo (momento da retirada da cobertura plástica).

A operação do sistema nesse período de tempo resultou em um lodo com teor de sólidos totais de 86,69%, um incremento de 64,94% em relação ao teor apresentado antes do início do ensaio (Figura 42). A Figura 43 mostra a evolução no aspecto do lodo de esgoto durante os estágios de higienização e secagem.

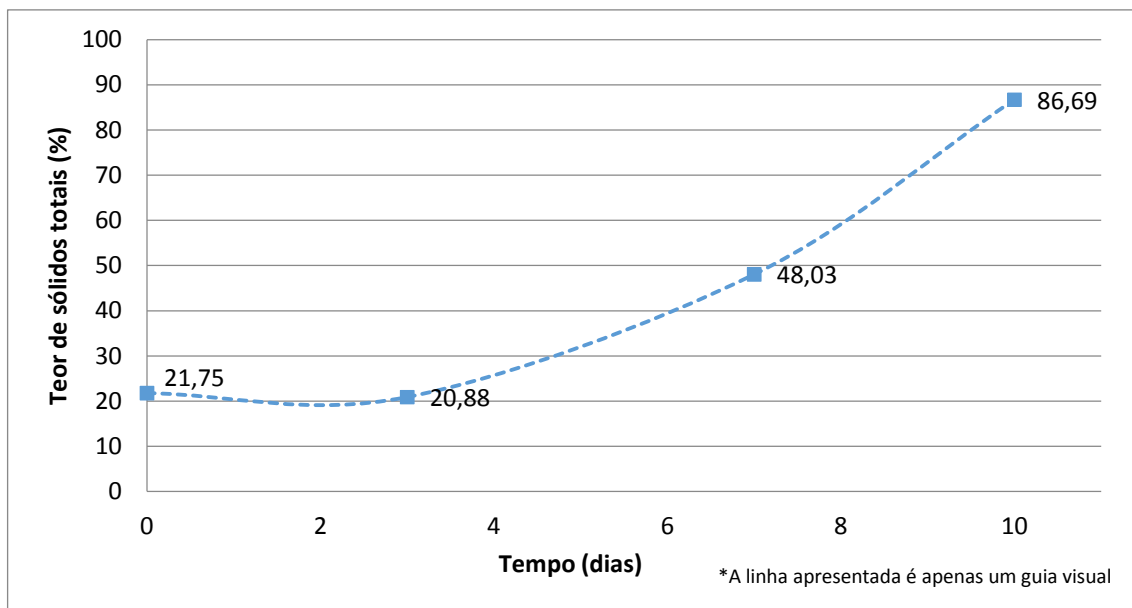


Figura 42 - Evolução do teor de sólidos no lodo de esgoto (protótipo 1)

Fonte: Autoria própria.

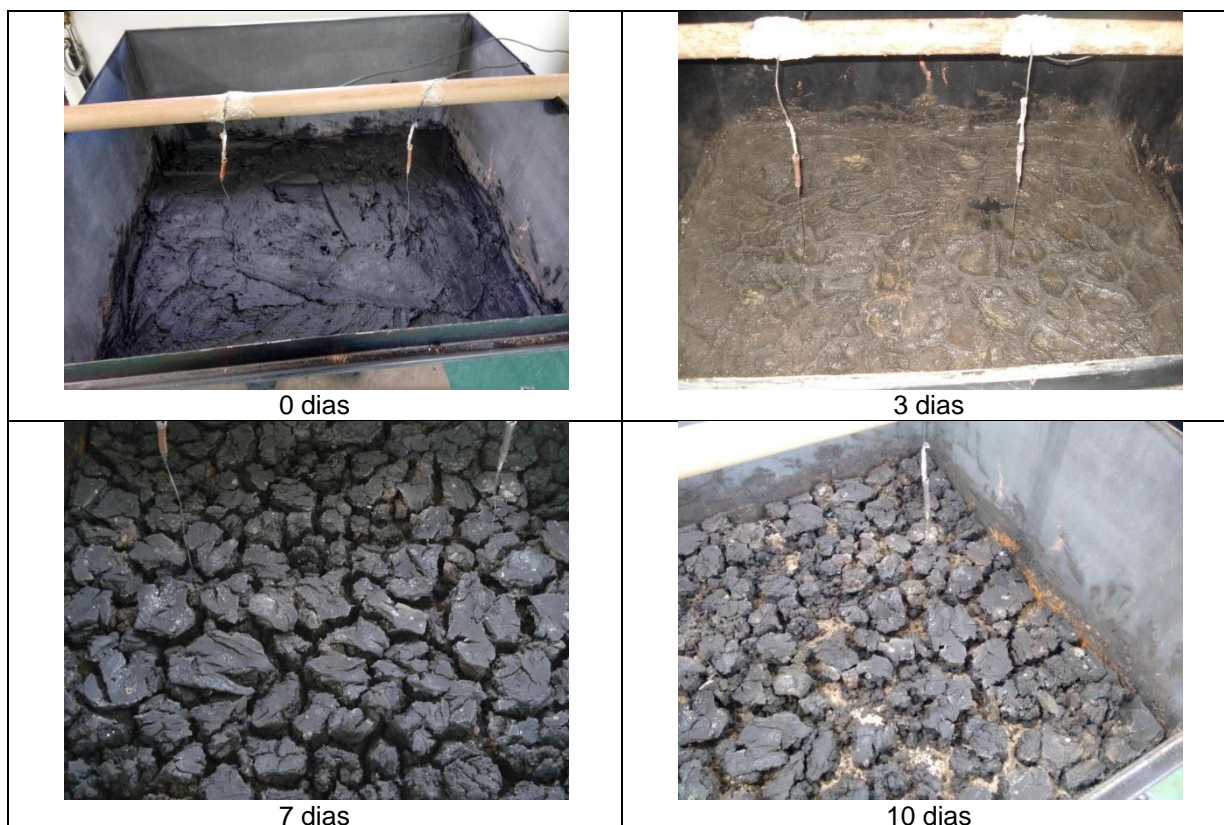


Figura 43 – Evolução do aspecto do lodo de esgoto ao longo do ensaio (protótipo 1)

Fonte: Autoria própria.

4.4 HIGIENIZAÇÃO E SECAGEM DO LODO DE ESGOTO NO PROTÓTIPO 2

O ensaio iniciou-se às 8 horas 30 minutos da manhã do dia 22/06/2015, quando foram ligados o aquecimento por meio da resistência elétrica e a bomba de circulação de água entre os protótipos. A temperatura ambiente no início do ensaio era de 12 °C, enquanto que a temperatura inicial da água no ponto de consumo, assegurada pelo coletor solar, era de 38,5 °C. Durante os três primeiros dias de operação do sistema, os protótipos permaneceram cobertos com plásticos com o intuito de se manter o teor de umidade na massa de lodo e por consequência sua difusividade térmica, acelerando o aumento de temperatura (estágio de higienização). O teor de sólidos totais na massa de lodo antes do início do ensaio era de 19,21 %. Com essa configuração a massa de lodo atingiu sua temperatura de saturação em pouco mais de 0,5 dia de operação do sistema (aproximadamente 14 horas) (Figura 44).

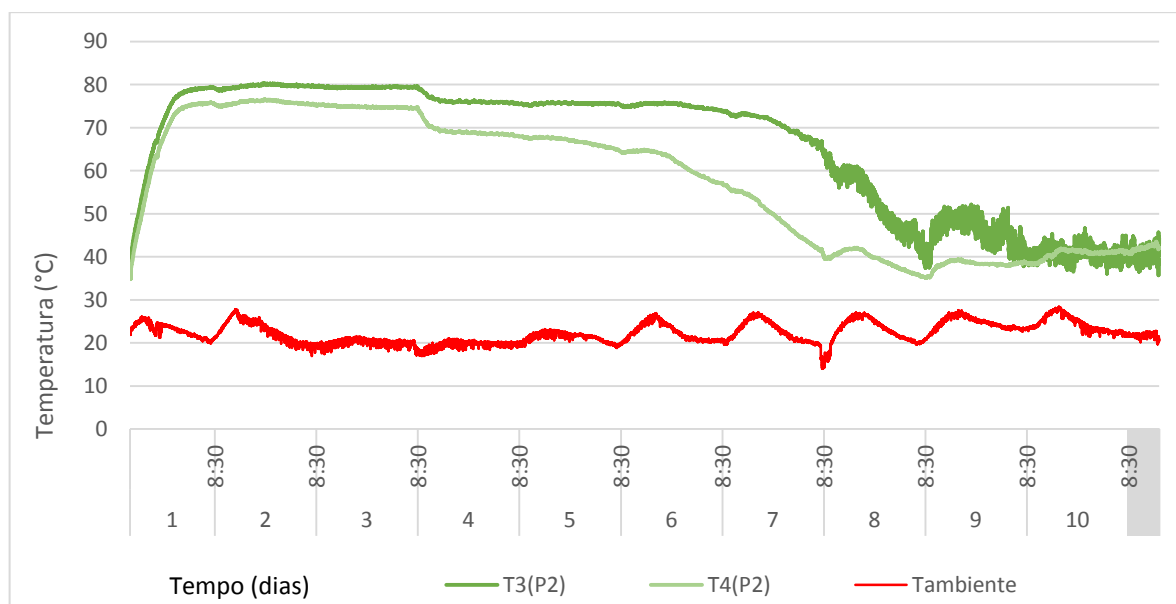


Figura 44 - Evolução da temperatura na massa de lodo (protótipo 2)
Fonte: Autoria própria.

Após atingir a temperatura de saturação, o patamar térmico pouco oscilou durante o período de higienização, sendo que as temperaturas médias registradas nesse período foram de 79,4 °C na região do termopar T3 e 75,3 °C na região do

termopar T4. Nesse estágio foram registradas as temperaturas máximas atingidas na massa de lodo depositada sobre o protótipo 2, que foram de 80,2 °C e 76,2 °C, respectivamente nos termopares T3 e T4.

Após três dias de operação, as coberturas foram retiradas, dando-se início ao estágio de secagem do lodo. Logo após a retirada da cobertura plástica a temperatura na massa de lodo foi reduzida em cerca de 5 %, na região do termopar T3 e 10 % na região do termopar T4, atingindo uma nova temperatura de saturação. Nesse período as temperaturas médias correspondentes aos termopares T3 e T4 foram de 75,9 °C e 68 °C, respectivamente.

Com 6,5 dias (2,5 dias no estágio de secagem) de operação do sistema a temperatura no termopar T4 começou a baixar gradativamente. Esse fato também ocorreu na região do termopar T3, porém depois de decorridos 7,5 dias (3,5 dias no estágio de secagem).

O sistema permaneceu em operação no estágio de secagem de lodo 7 dias, 7 horas e 15 minutos. Ao final desse período, as temperaturas registradas foram respectivamente de 43,0° C (T1) e 42,1 °C (T2), enquanto que a temperatura ambiente era de aproximadamente 20 °C. Essas temperaturas são respectivamente 46 e 44% inferiores àquelas registradas no início do estágio de secagem do lodo (momento da retirada da cobertura plástica).

A operação do sistema durante esse período de tempo resultou em um lodo de esgoto com teor de sólidos totais de 88,07 %, um incremento de 68,86 % em relação ao teor apresentado antes do início do ensaio (Figura 45).

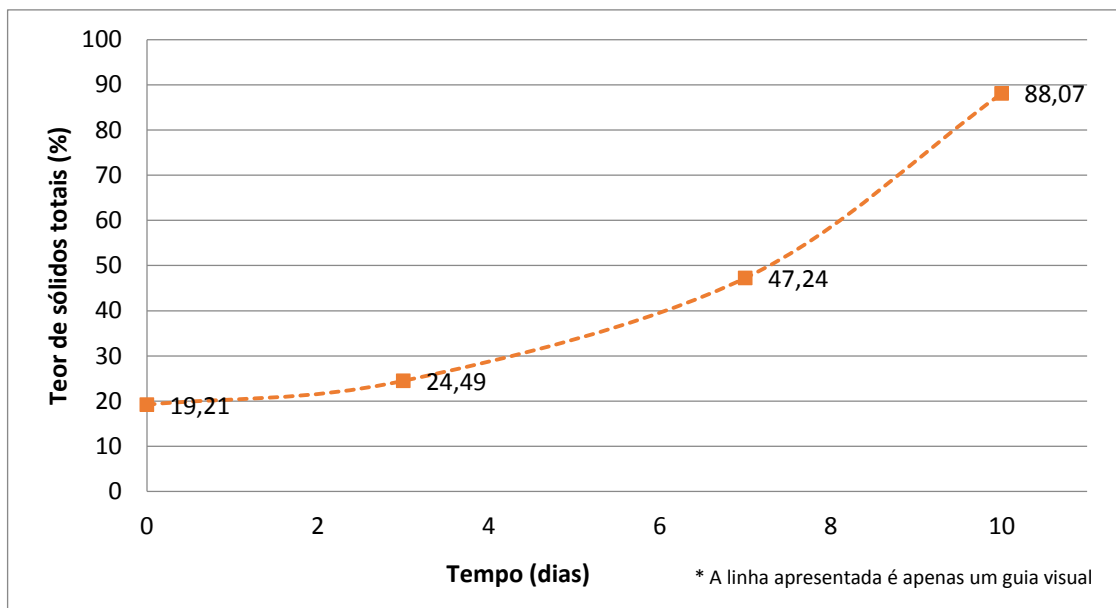


Figura 45 - Evolução do teor de sólidos do lodo de esgoto (protótipo 2)
Fonte: Autoria própria.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA TÉRMICO

O funcionamento ininterrupto do sistema ao longo de 10 dias, 7 horas e 15 minutos, resultou em um consumo total de energia equivalente a 677,93 kWh, ou 65,81 kWh/dia. Essa foi a energia consumida pela resistência elétrica, que simula a energia demandada pelo biogás. O poder calorífico do biogás varia de acordo com o percentual de metano que o constitui. Por isso, para realizar as estimativas de volume de biogás necessário para gerar a energia equivalente adotou-se o valor do poder calorífico do metano. Sabendo-se a quantidade de metano necessária para gerar uma determinada quantidade de energia, é possível saber a quantidade de biogás dividindo-se pelo teor de metano. Por exemplo, se a quantidade requerida de metano é 1 m³ e o biogás apresentar teor de 75% de metano, o volume requerido desse biogás é igual 1 m³/0,75, o que equivale a 1,33 m³.

Segundo Lobato (2011), o poder calorífico do metano é da ordem de 35,9 MJ/Nm³, o que equivale a 9,9 kWh/Nm³. Portanto, a quantidade de metano para gerar energia equivalente para se repetir todo o ensaio seria de aproximadamente 68,5 m³ ou 6,6 m³/dia.

Também é necessário considerar a eficiência do equipamento que realiza a queima do metano. Uma caldeira converte cerca de 80% da energia química do

metano em energia térmica. Portanto, aplicando esse fator nos valores citados anteriormente, tem-se o volume real de metano requerido para se repetir todo o ensaio igual a 85,62 m³ ou 8,25 m³/dia.

No entanto, o sistema operou por um tempo superior ao necessário e a energia demandada em uma situação operacional seria menor, podendo ser estimada a partir do tempo em o que o sistema elevou a temperatura na massa de lodo até atingir a sua temperatura de saturação e somando-se ao tempo necessário de permanência para sua higienização. Para essa estimativa, considerou-se as temperaturas médias registradas entre os dois termopares de cada um dos protótipos, estimando-se o tempo de permanência em 30 minutos quando a temperatura média for superior a 70 °C e tempo de permanência de 2 horas, quando a temperatura média for inferior a 70 °C e superior a 54 °C (Tabela 7).

Tabela 7 - Energia requerida para o estágio de higienização

Protótipo	Tempo para atingir a temperatura de saturação (Dias)	Energia utilizada por dia de operação (kWh/dia)	Energia necessária para atingir temperatura de saturação (kWh)	Temperatura média durante o estágio de saturação (° C)	Tempo de permanência para higienização (horas)	Energia necessária durante o tempo de permanência no estágio de higienização (kWh)	Energia total necessária para o estágio de higienização (kWh)
1	1	65,81	65,81	66,97	2	5,48	71,29
2	0,58	65,81	38,17	77,35	0,5	1,37	39,54

Fonte: Autoria própria.

Cada um dos protótipos foi responsável pelo tratamento de 0,10 m³ de lodo de esgoto, alocados em uma área de 1,0 m² de leito de secagem, sendo a camada de lodo depositada igual a 0,10 m. Portanto, respeitando essas condições e considerando uma eficiência de 80% do equipamento que realiza a queima do biogás, pode-se atribuir valores unitários de energia requerida durante o tempo necessário para higienização do lodo, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Energia unitária requerida para higienização do lodo de esgoto

Protótipo	Energia requerida por m ² de leito de secagem (kWh/m ²)	Energia requerida (kWh/m ³ de lodo)	Volume de metano requerido por m ² de leito de secagem (m ³ /m ²)	Volume de metano requerido (m ³ /m ³ de lodo higienizado)
1	71,29	712,94	9,00	90,02
2	39,54	395,41	4,99	49,93

Fonte: Aatoria própria.

Considerando os valores da Tabela 8, pode-se estimar a demanda diária de metano, de acordo com as estimativas de produção teórica de lodo e de metano relacionadas ao porte das ETEs.

Segundo Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), a produção de lodo em reatores anaeróbios pode variar entre de 0,2 a 0,6 L/hab.dia, enquanto que a fração inicial de sólidos totais na fase líquida varia entre 3 e 6%. Para efeito de cálculo utilizou-se valores medidos médios do ano de 2014, em ETEs cujo porte está compreendido entre 10.000 e 100.000 habitantes, que corresponderam a uma taxa de descarte de lodo de 0,22 L/hab.dia e o teor de sólidos totais médio de 4,2%.

O teor de sólidos totais do lodo de esgoto utilizado nos ensaios foi de aproximadamente 20%. Portanto, um adensamento e o desaguamento inicial que eleve o teor de sólidos a essa faixa é importante, para se manter as propriedades térmicas do lodo nas mesmas condições ensaiadas e também para diminuir a área requerida pelo leito de secagem. Como por exemplo, se houver um teor de sólidos inicial de 4,5%, a taxa de redução de volume quando o teor de sólidos totais for de 20% pode ser calculado da seguinte forma: $1 \times (4,5/20) = 0,225$. Ou seja, o lodo de esgoto passa a ter 22,5% de seu volume inicial. Para exemplificar, uma ETE que atende 100.000 habitantes com uma produção de lodo equivalente a 0,004 m³/hab.dia, totalizando 40 m³/dia de lodo de esgoto com 4,5% de teor de sólidos. Esse volume é reduzido a 9 m³/dia quando o lodo de esgoto passa a ter um teor de sólidos totais equivalente a 20%.

A produção de metano foi estimada em função da população atendida. Segundo Lobato (2011), na pior situação, a produção de metano em reatores anaeróbios é em média de 6,8 NL/hab.dia. Esse valor foi utilizado para estimar a produção diária de metano.

Outra questão importante que se deve levar em consideração para dimensionar um sistema de higienização e secagem de lodos de esgoto é o regime de descarte do lodo. Os dados de produção diária de lodo não significam que na prática o lodo seja descartado diariamente. Portanto, propõe-se que o sistema opere em regime de bateladas, que estará relacionada à periodicidade em que se descarta lodo na ETE. Quanto maior é esse período maior será a quantidade de lodo e, por consequência, maior será a área requerida pelo leito de secagem e energia para sua higienização.

Assim, o dimensionamento foi realizado para ETEs que atendem entre 10.000 e 100.000 habitantes, para sistemas baseados nos protótipo 1 e 2, considerando regimes de batelada de 1 a 5 dias (Tabelas 9 a 18 e Figuras 46 a 60).

Os resultados mostram que a produção de metano nas condições avaliadas é superior ao volume de metano demandado para ambos os protótipos, sendo que no protótipo 1 a autonomia é de 164% e de 295% no protótipo 2.

Tabela 9 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 1 dia

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	2,2	0,462	4,62	329,38	411,72	41,59	68,00	59,41
20.000	4,4	4,4	0,924	9,24	658,76	823,45	83,18	136,00	118,82
30.000	6,6	6,6	1,386	13,86	988,13	1235,17	124,76	204,00	178,24
40.000	8,8	8,8	1,848	18,48	1317,51	1646,89	166,35	272,00	237,65
50.000	11	11	2,31	23,1	1646,89	2058,61	207,94	340,00	297,06
60.000	13,2	13,2	2,772	27,72	1976,27	2470,34	249,53	408,00	356,47
70.000	15,4	15,4	3,234	32,34	2305,65	2882,06	291,12	476,00	415,88
80.000	17,6	17,6	3,696	36,96	2635,03	3293,78	332,71	544,00	475,29
90.000	19,8	19,8	4,158	41,58	2964,40	3705,51	374,29	612,00	534,71
100.000	22	22	4,62	46,2	3293,78	4117,23	415,88	680,00	594,12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 1 dia

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	2,2	0,462	4,62	182,68	228,35	23,07	68,00	32,95
20.000	4,4	4,4	0,924	9,24	365,36	456,70	46,13	136,00	65,90
30.000	6,6	6,6	1,386	13,86	548,04	685,05	69,20	204,00	98,85
40.000	8,8	8,8	1,848	18,48	730,72	913,40	92,26	272,00	131,80
50.000	11	11	2,31	23,1	913,40	1141,75	115,33	340,00	164,75
60.000	13,2	13,2	2,772	27,72	1096,08	1370,10	138,39	408,00	197,71
70.000	15,4	15,4	3,234	32,34	1278,76	1598,44	161,46	476,00	230,66
80.000	17,6	17,6	3,696	36,96	1461,44	1826,79	184,52	544,00	263,61
90.000	19,8	19,8	4,158	41,58	1644,11	2055,14	207,59	612,00	296,56
100.000	22	22	4,62	46,2	1826,79	2283,49	230,66	680,00	329,51

Fonte: Autoria própria.

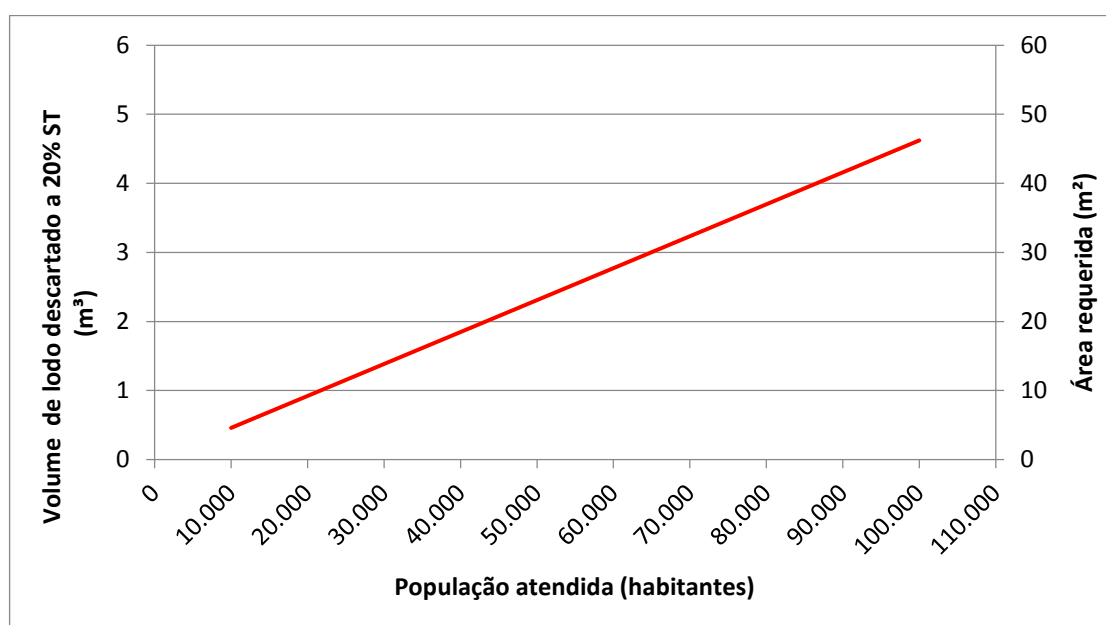


Figura 46 – Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 1 dia)

Fonte: Autoria própria.

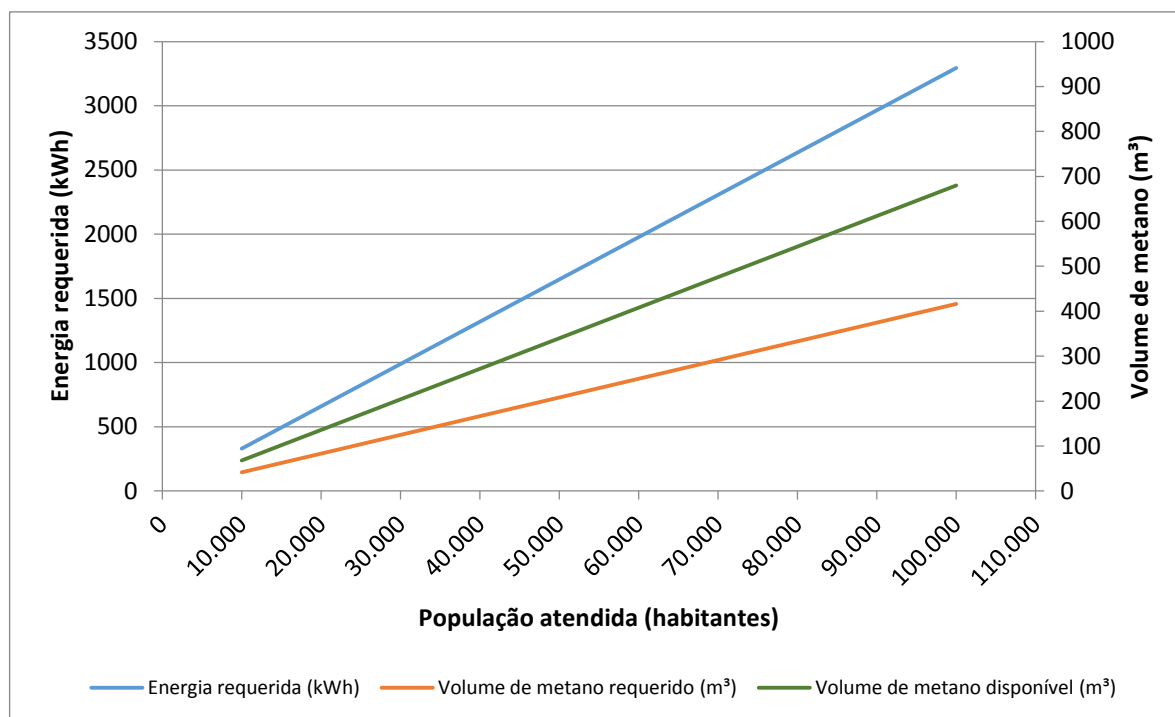


Figura 47 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 1 dia)
 Fonte: A autoria própria.

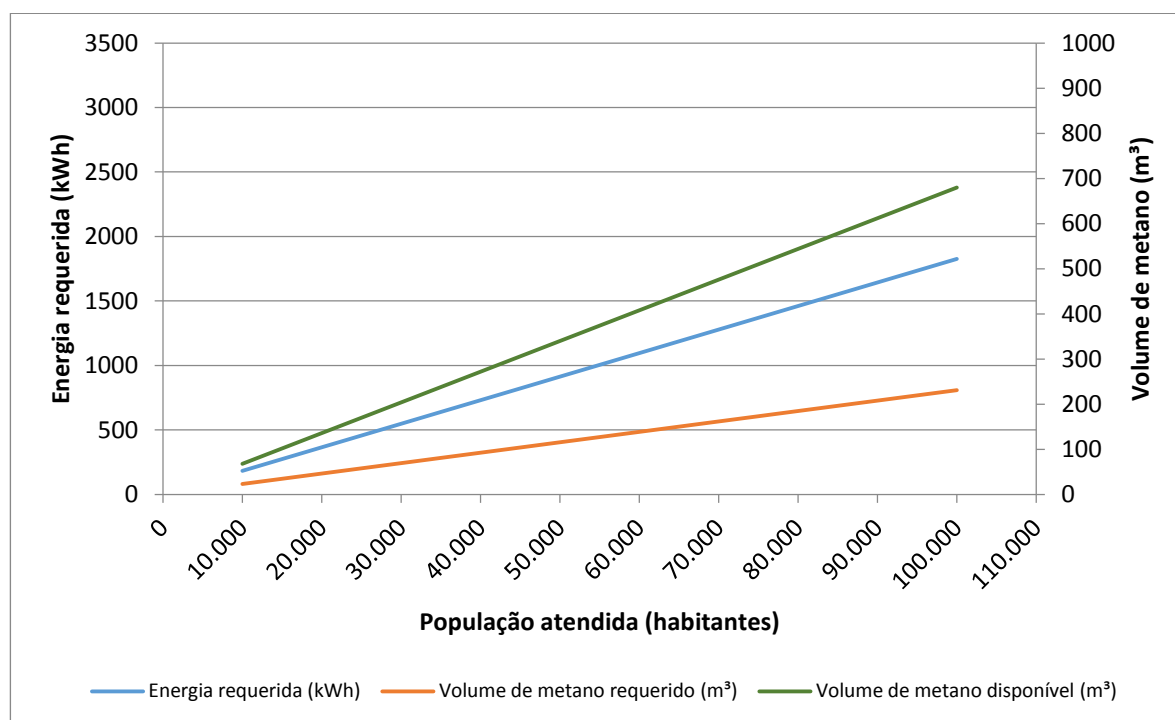


Figura 48 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 1 dia)
 Fonte: A autoria própria.

Tabela 11 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 2 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	4,4	0,924	9,24	658,76	823,45	83,18	136,00	118,82
20.000	4,4	8,8	1,848	18,48	1317,51	1646,89	166,35	272,00	237,65
30.000	6,6	13,2	2,772	27,72	1976,27	2470,34	249,53	408,00	356,47
40.000	8,8	17,6	3,696	36,96	2635,03	3293,78	332,71	544,00	475,29
50.000	11	22	4,62	46,2	3293,78	4117,23	415,88	680,00	594,12
60.000	13,2	26,4	5,544	55,44	3952,54	4940,67	499,06	816,00	712,94
70.000	15,4	30,8	6,468	64,68	4611,30	5764,12	582,23	952,00	831,76
80.000	17,6	35,2	7,392	73,92	5270,05	6587,57	665,41	1088,00	950,59
90.000	19,8	39,6	8,316	83,16	5928,81	7411,01	748,59	1224,00	1069,41
100.000	22	44	9,24	92,4	6587,57	8234,46	831,76	1360,00	1188,23

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 2 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	4,4	0,924	9,24	365,36	456,70	46,13	136,00	65,90
20.000	4,4	8,8	1,848	18,48	730,72	913,40	92,26	272,00	131,80
30.000	6,6	13,2	2,772	27,72	1096,08	1370,10	138,39	408,00	197,71
40.000	8,8	17,6	3,696	36,96	1461,44	1826,79	184,52	544,00	263,61
50.000	11	22	4,62	46,2	1826,79	2283,49	230,66	680,00	329,51
60.000	13,2	26,4	5,544	55,44	2192,15	2740,19	276,79	816,00	395,41
70.000	15,4	30,8	6,468	64,68	2557,51	3196,89	322,92	952,00	461,31
80.000	17,6	35,2	7,392	73,92	2922,87	3653,59	369,05	1088,00	527,21
90.000	19,8	39,6	8,316	83,16	3288,23	4110,29	415,18	1224,00	593,12
100.000	22	44	9,24	92,4	3653,59	4566,99	461,31	1360,00	659,02

Fonte: do autor

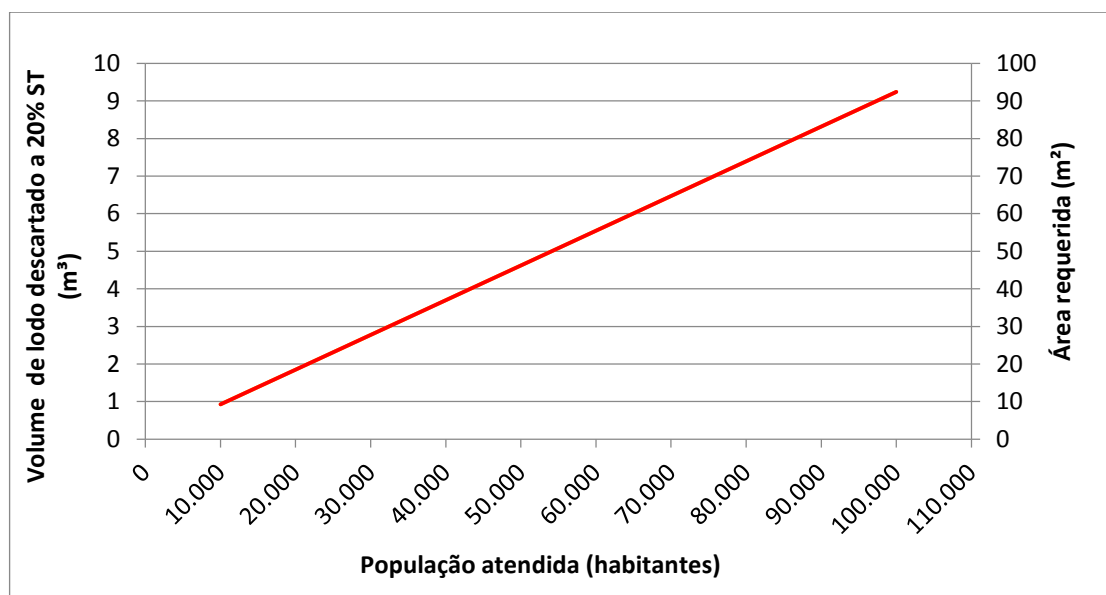


Figura 49 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 2 dias)

Fonte: Autoria própria.

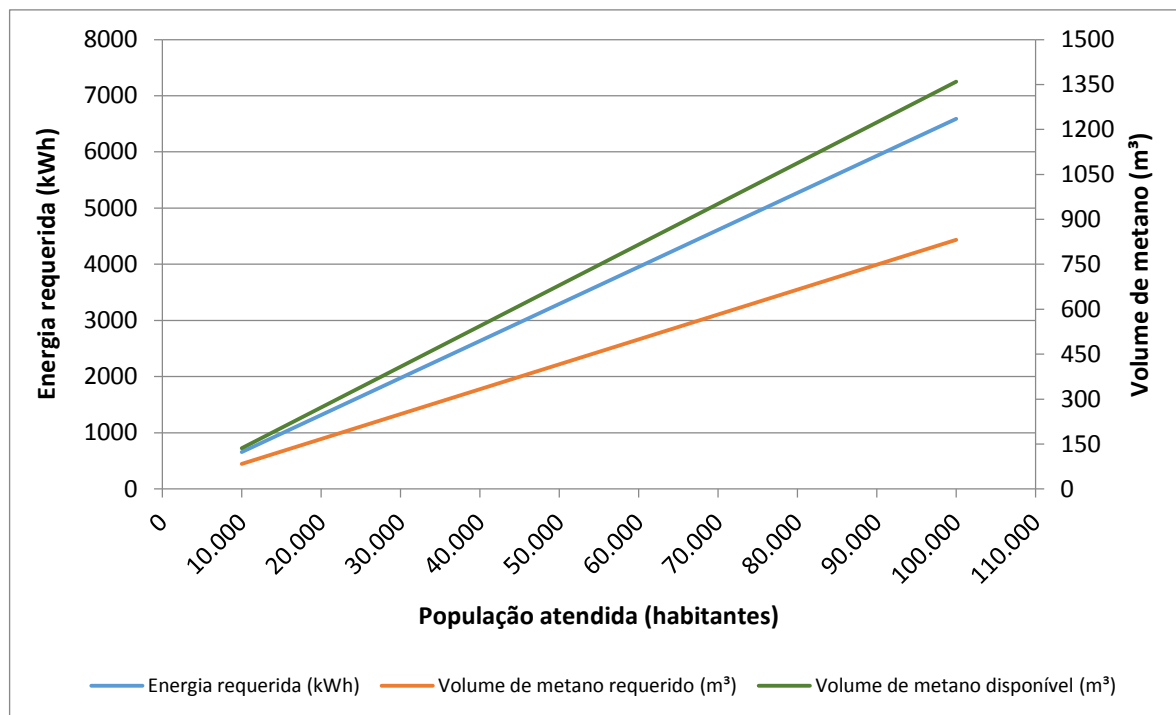


Figura 50 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 2 dias)

Fonte: Autoria do própria.

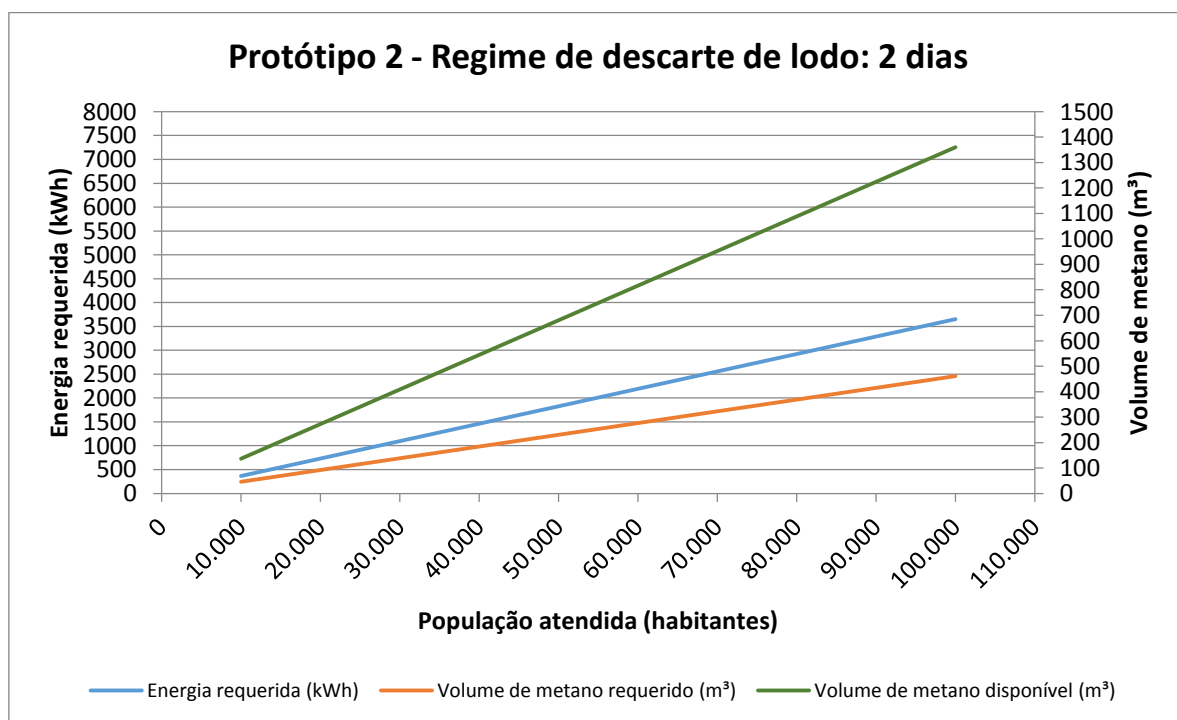


Figura 51 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 2 dias)

Fonte: Autoria do própria.

Tabela 13 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 3 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	6,6	1,386	13,86	988,13	1235,17	124,76	204,00	178,24
20.000	4,4	13,2	2,772	27,72	1976,27	2470,34	249,53	408,00	356,47
30.000	6,6	19,8	4,158	41,58	2964,40	3705,51	374,29	612,00	534,71
40.000	8,8	26,4	5,544	55,44	3952,54	4940,67	499,06	816,00	712,94
50.000	11	33	6,93	69,3	4940,67	6175,84	623,82	1020,00	891,18
60.000	13,2	39,6	8,316	83,16	5928,81	7411,01	748,59	1224,00	1069,41
70.000	15,4	46,2	9,702	97,02	6916,94	8646,18	873,35	1428,00	1247,65
80.000	17,6	52,8	11,088	110,88	7905,08	9881,35	998,12	1632,00	1425,88
90.000	19,8	59,4	12,474	124,74	8893,21	11116,52	1122,88	1836,00	1604,12
100.000	22	66	13,86	138,6	9881,35	12351,69	1247,65	2040,00	1782,35

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 3 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	6,6	1,386	13,86	548,04	685,05	69,20	204,00	98,85
20.000	4,4	13,2	2,772	27,72	1096,08	1370,10	138,39	408,00	197,71
30.000	6,6	19,8	4,158	41,58	1644,11	2055,14	207,59	612,00	296,56
40.000	8,8	26,4	5,544	55,44	2192,15	2740,19	276,79	816,00	395,41
50.000	11	33	6,93	69,3	2740,19	3425,24	345,98	1020,00	494,26
60.000	13,2	39,6	8,316	83,16	3288,23	4110,29	415,18	1224,00	593,12
70.000	15,4	46,2	9,702	97,02	3836,27	4795,33	484,38	1428,00	691,97
80.000	17,6	52,8	11,088	110,88	4384,31	5480,38	553,57	1632,00	790,82
90.000	19,8	59,4	12,474	124,74	4932,34	6165,43	622,77	1836,00	889,67
100.000	22	66	13,86	138,6	5480,38	6850,48	691,97	2040,00	988,53

Fonte: Autoria própria.

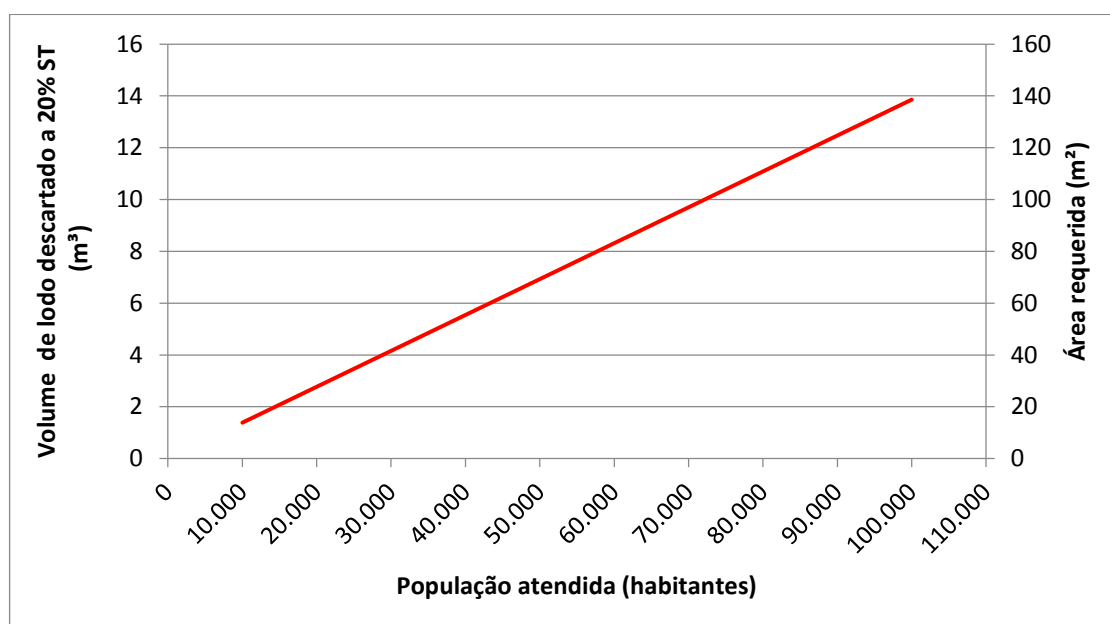


Figura 52 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 3 dias)

Fonte: Autoria própria.

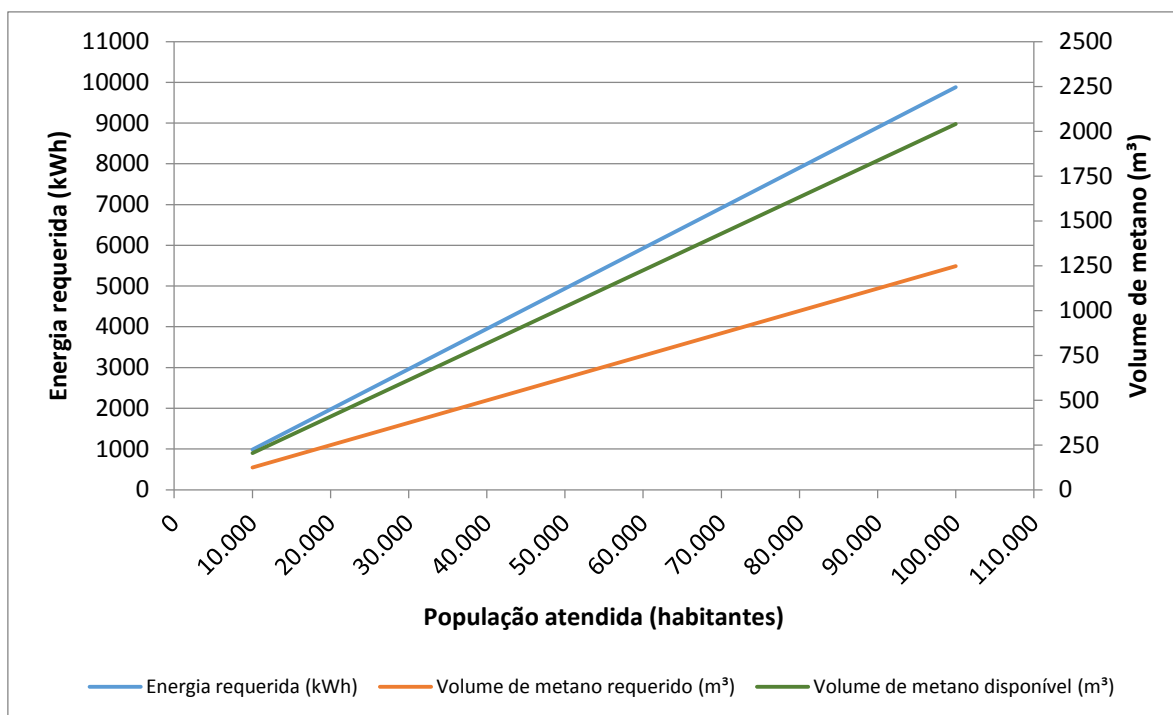


Figura 53 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 3 dias)
 Fonte: Autoria do própria.

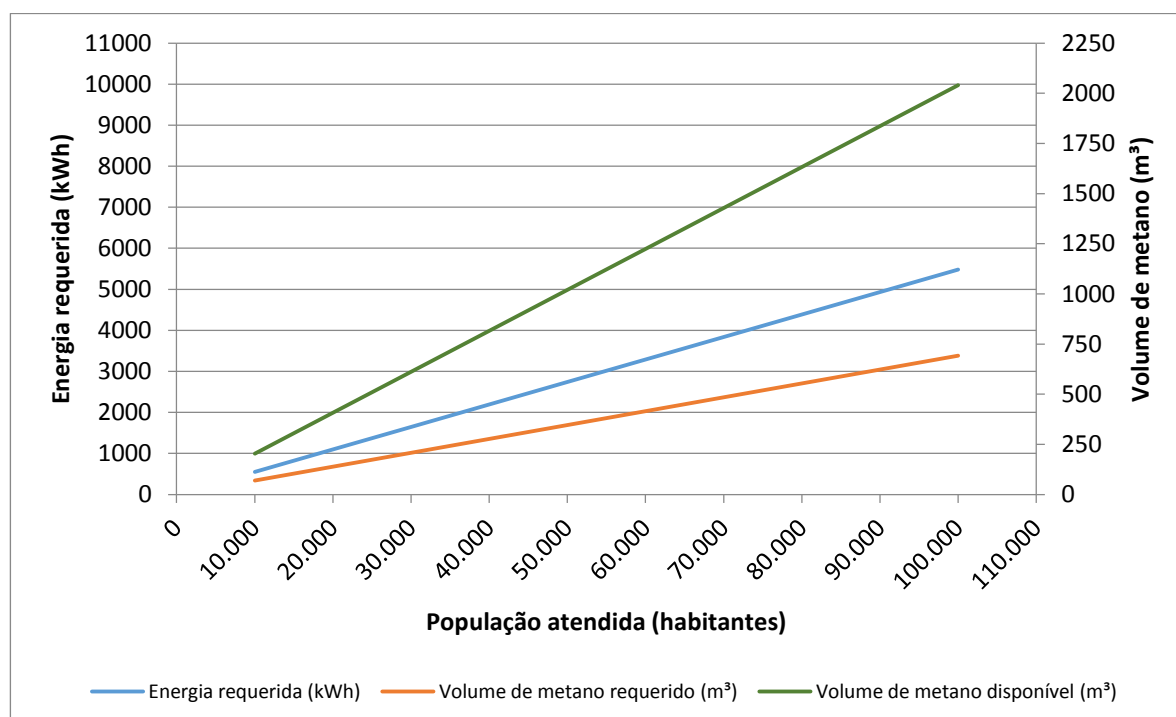


Figura 54 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 3 dias)
 Fonte: Autoria do própria.

Tabela 15 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 4 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	8,8	1,848	18,48	1317,51	1646,89	166,35	272,00	237,65
20.000	4,4	17,6	3,696	36,96	2635,03	3293,78	332,71	544,00	475,29
30.000	6,6	26,4	5,544	55,44	3952,54	4940,67	499,06	816,00	712,94
40.000	8,8	35,2	7,392	73,92	5270,05	6587,57	665,41	1088,00	950,59
50.000	11	44	9,24	92,4	6587,57	8234,46	831,76	1360,00	1188,23
60.000	13,2	52,8	11,088	110,88	7905,08	9881,35	998,12	1632,00	1425,88
70.000	15,4	61,6	12,936	129,36	9222,59	11528,24	1164,47	1904,00	1663,53
80.000	17,6	70,4	14,784	147,84	10540,10	13175,13	1330,82	2176,00	1901,17
90.000	19,8	79,2	16,632	166,32	11857,62	14822,02	1497,17	2448,00	2138,82
100.000	22	88	18,48	184,8	13175,13	16468,91	1663,53	2720,00	2376,47

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 4 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	8,8	1,848	18,48	730,72	913,40	92,26	272,00	131,80
20.000	4,4	17,6	3,696	36,96	1461,44	1826,79	184,52	544,00	263,61
30.000	6,6	26,4	5,544	55,44	2192,15	2740,19	276,79	816,00	395,41
40.000	8,8	35,2	7,392	73,92	2922,87	3653,59	369,05	1088,00	527,21
50.000	11	44	9,24	92,4	3653,59	4566,99	461,31	1360,00	659,02
60.000	13,2	52,8	11,088	110,88	4384,31	5480,38	553,57	1632,00	790,82
70.000	15,4	61,6	12,936	129,36	5115,02	6393,78	645,84	1904,00	922,62
80.000	17,6	70,4	14,784	147,84	5845,74	7307,18	738,10	2176,00	1054,43
90.000	19,8	79,2	16,632	166,32	6576,46	8220,57	830,36	2448,00	1186,23
100.000	22	88	18,48	184,8	7307,18	9133,97	922,62	2720,00	1318,03

Fonte: Autoria própria.

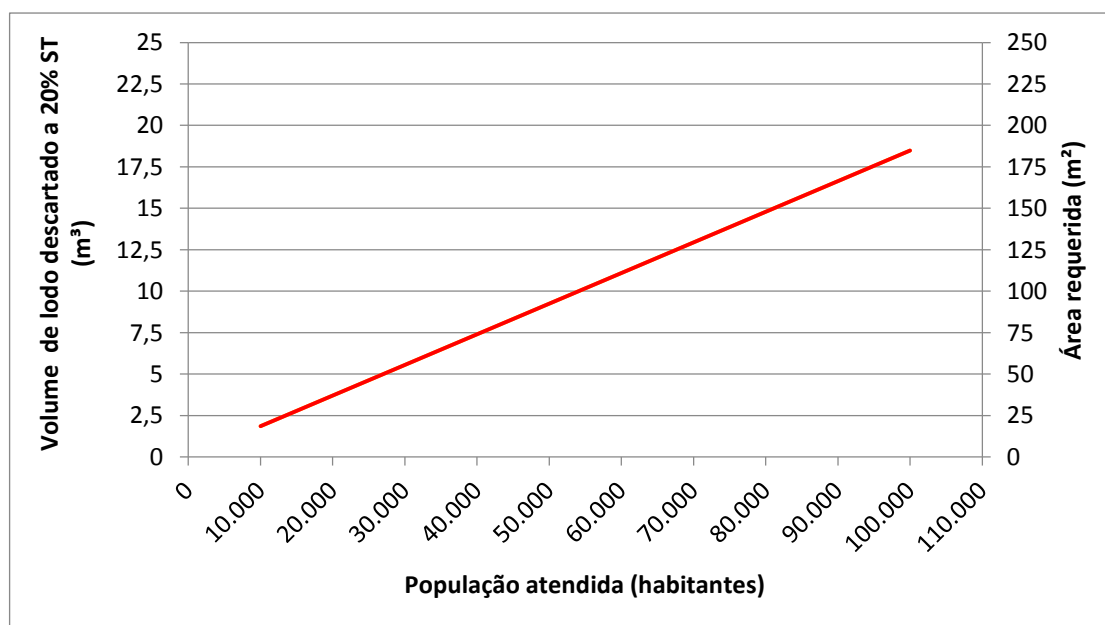


Figura 55 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 4 dias)

Fonte: Autoria própria.

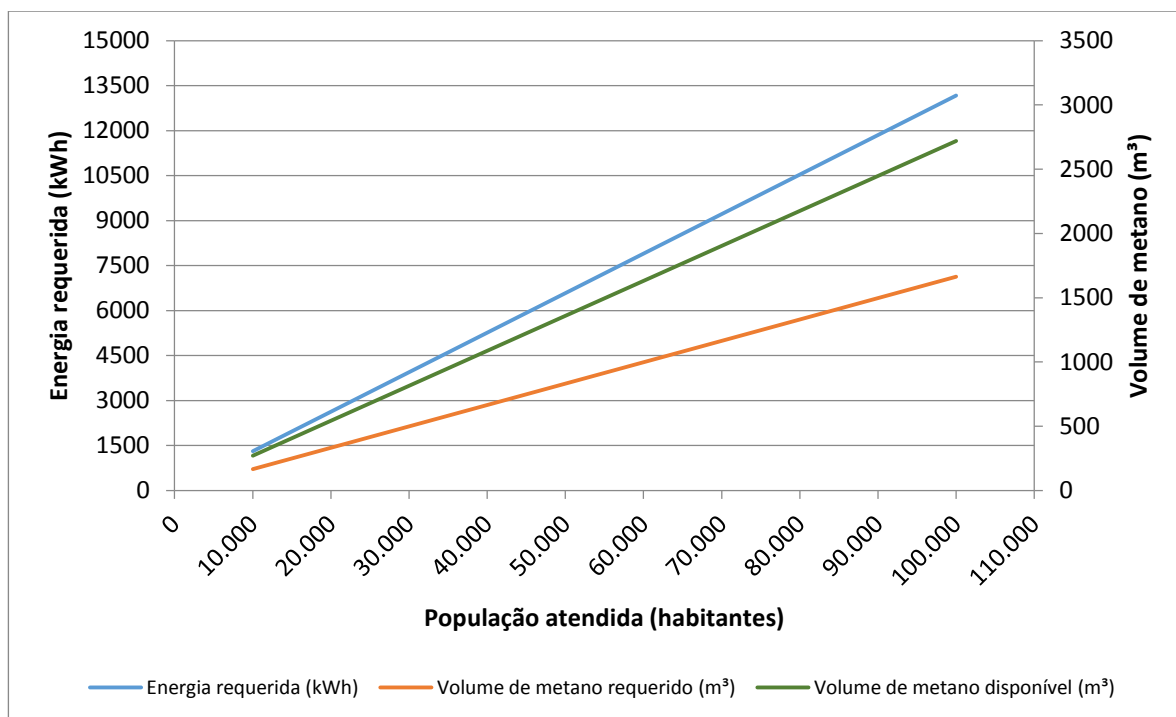


Figura 56 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 4 dias)
 Fonte: Autoria do própria.

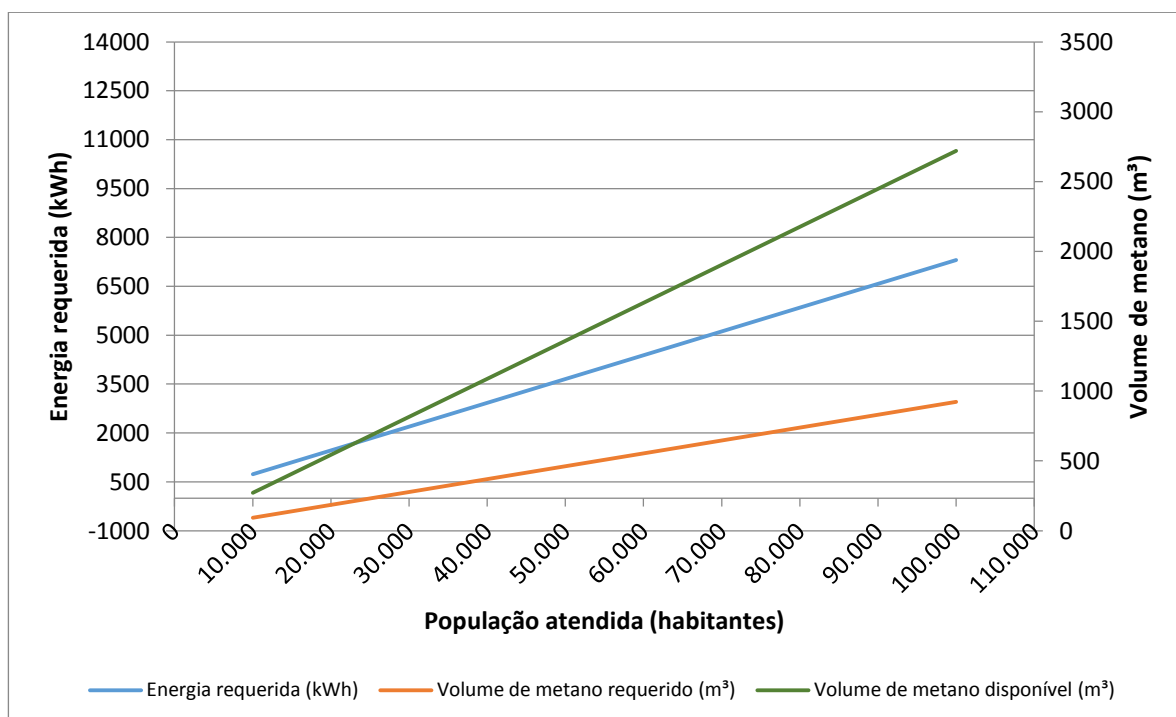


Figura 57 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível - Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 4 dias)
 Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 - Dimensionamento do sistema protótipo 1 – regime de descarte de lodo: 5 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	11	2,31	23,1	1646,89	2058,61	207,94	340,00	297,06
20.000	4,4	22	4,62	46,2	3293,78	4117,23	415,88	680,00	594,12
30.000	6,6	33	6,93	69,3	4940,67	6175,84	623,82	1020,00	891,18
40.000	8,8	44	9,24	92,4	6587,57	8234,46	831,76	1360,00	1188,23
50.000	11	55	11,55	115,5	8234,46	10293,07	1039,70	1700,00	1485,29
60.000	13,2	66	13,86	138,6	9881,35	12351,69	1247,65	2040,00	1782,35
70.000	15,4	77	16,17	161,7	11528,24	14410,30	1455,59	2380,00	2079,41
80.000	17,6	88	18,48	184,8	13175,13	16468,91	1663,53	2720,00	2376,47
90.000	19,8	99	20,79	207,9	14822,02	18527,53	1871,47	3060,00	2673,53
100.000	22	110	23,1	231	16468,91	20586,14	2079,41	3400,00	2970,58

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 - Dimensionamento do sistema protótipo 2 – regime de descarte de lodo: 5 dias

Habitantes	Lodo (m ³ /dia)	Volume de lodo a 4,2% ST (m ³)	Volume de lodo a 20% ST (m ³)	Área do leito de secagem (m ²)	Energia requerida (kWh)	Energia requerida metano (80 % rendimento) (kWh)	Volume de metano requerido (m ³)	Volume de metano disponível (m ³)	Biogás requerido 70% CH ₄ (m ³)
10.000	2,2	11	2,31	23,1	913,40	1141,75	115,33	340,00	164,75
20.000	4,4	22	4,62	46,2	1826,79	2283,49	230,66	680,00	329,51
30.000	6,6	33	6,93	69,3	2740,19	3425,24	345,98	1020,00	494,26
40.000	8,8	44	9,24	92,4	3653,59	4566,99	461,31	1360,00	659,02
50.000	11	55	11,55	115,5	4566,99	5708,73	576,64	1700,00	823,77
60.000	13,2	66	13,86	138,6	5480,38	6850,48	691,97	2040,00	988,53
70.000	15,4	77	16,17	161,7	6393,78	7992,22	807,30	2380,00	1153,28
80.000	17,6	88	18,48	184,8	7307,18	9133,97	922,62	2720,00	1318,03
90.000	19,8	99	20,79	207,9	8220,57	10275,72	1037,95	3060,00	1482,79
100.000	22	110	23,1	231	9133,97	11417,46	1153,28	3400,00	1647,54

Fonte: Autoria própria.

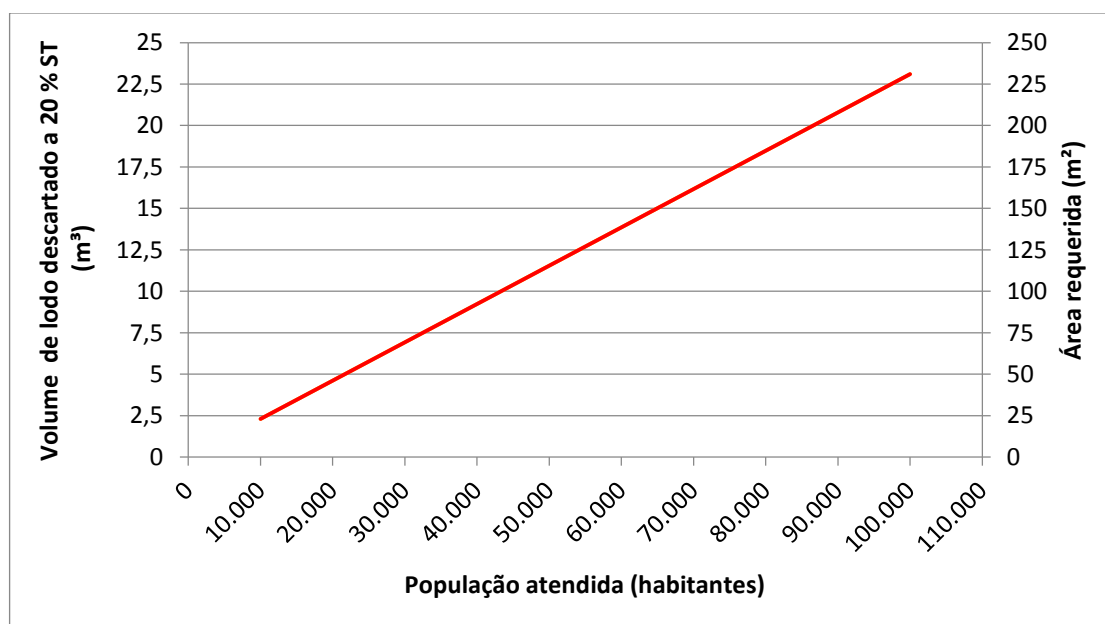


Figura 58 - Área do leito de secagem (regime de descarte de lodo: 5 dias)

Fonte: Autoria própria.

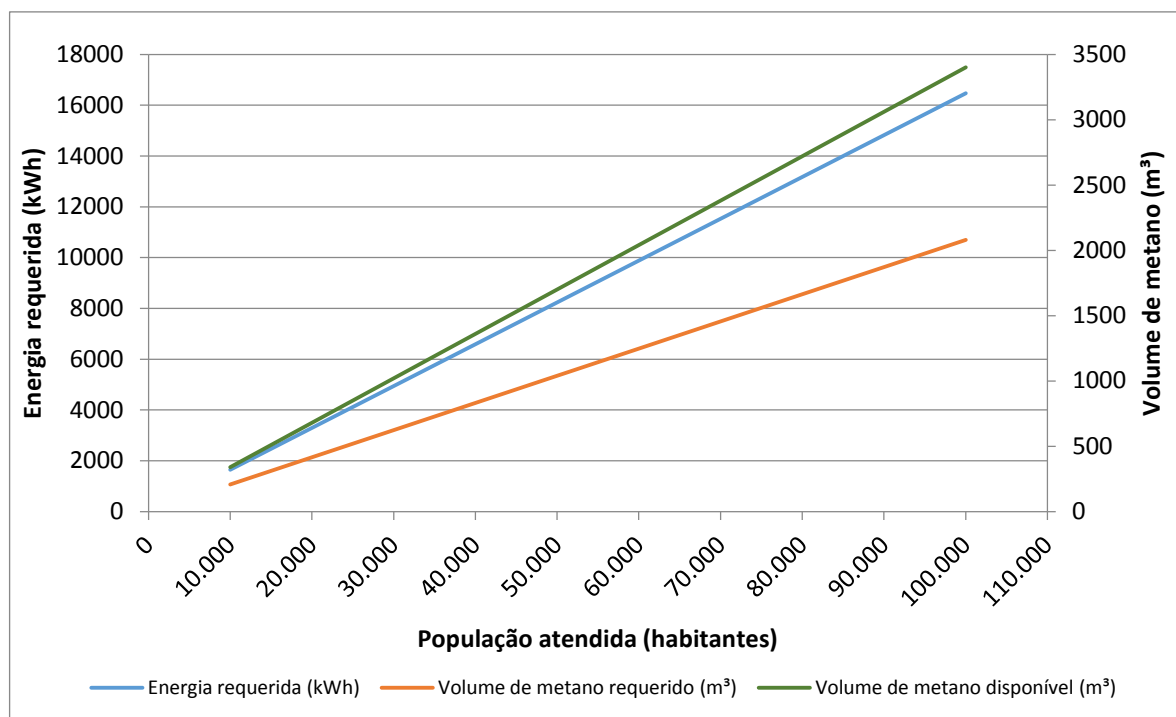


Figura 59 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível – Protótipo 1 (regime de descarte de lodo: 5 dias)
 Fonte: A autoria própria.

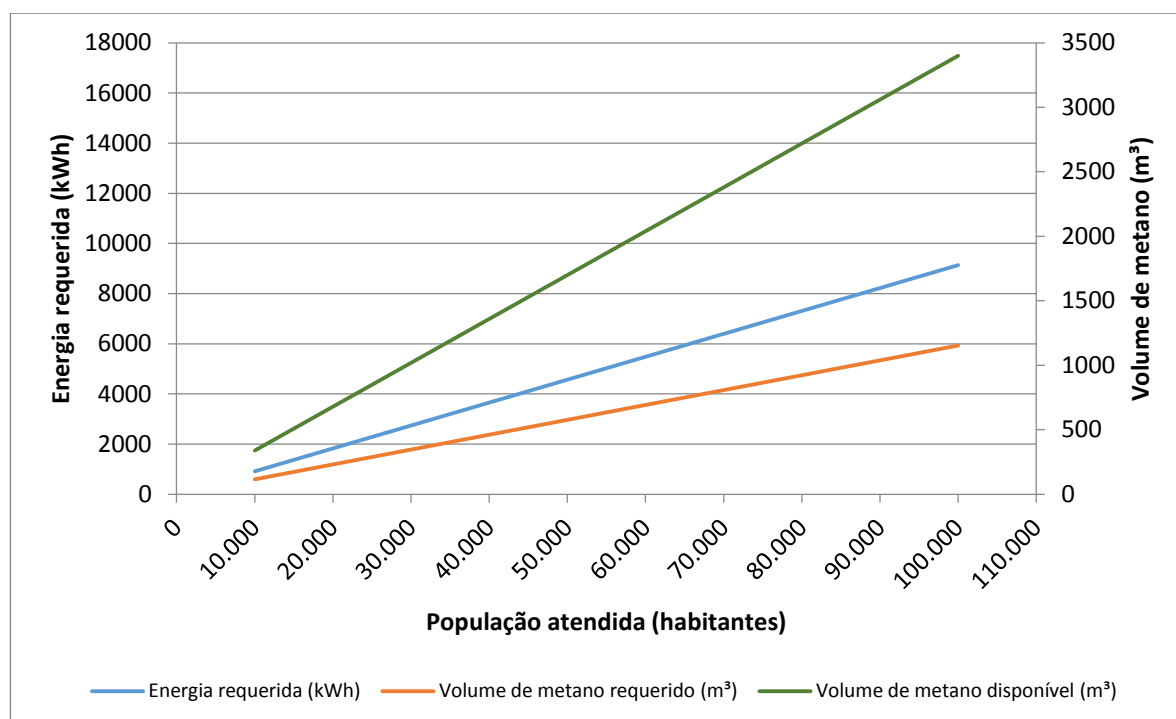


Figura 60 - Volume de metano requerido x volume de metano disponível – Protótipo 2 (regime de descarte de lodo: 5 dias)
 Fonte: A autoria própria.

4.6 CONDIÇÕES OPERACIONAIS NOS PROTÓTIPOS DE LEITOS DE SECAGEM

Um aspecto importante que deve ser avaliado quando se pretende implantar uma estrutura para higienizar e secar o lodo em uma estação de tratamento é sua condição operacional, isto é, quais as atividades que serão necessárias realizar para que o sistema funcione de acordo com o esperado.

Uma atividade que pode ser avaliada a partir dos experimentos desta monografia é a retirada do lodo de esgoto dos protótipos para sua destinação, após o processo de higienização e secagem. Para a retirada foram utilizadas enxadas, pás e um carrinho de mão. Notou-se facilidade para execução desta atividade no protótipo 1, onde o lodo foi rapidamente retirado. Porém, em relação ao protótipo 2 a retirada do lodo foi muito demorada devido a incrustação do lodo na serpentina, que necessitou de cuidado especial para não danificá-la. Ainda assim o lodo não foi totalmente retirado e ao longo do tempo esse lodo incrustado pode acabar atuando como isolante térmico junto à serpentina. A Figura 59 apresenta o aspecto dos protótipos após a retirada do lodo de esgoto.



Figura 61 – Fotografia dos protótipos após a retirada do lodo de esgoto: (a) Protótipo 1; (b) Protótipo 2

Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A construção do sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto, em escala piloto, permitiu verificar que sua concepção de pisos que irradiam calor por meio de serpentinas, por onde circula água aquecida, é eficaz na tarefa de higienização, em ambos os protótipos de leito de secagem, pois elevou a temperatura na massa de lodo a patamares compatíveis aos indicados na literatura para tal fim.

Os testes realizados com o sistema vazio, mostraram que o coletor solar proporciona um pré-aquecimento da água utilizada para circulação e pré-aquecimento dos protótipos de leito de secagem. Em um dia ensolarado, o coletor solar gerou 9,18 kWh de energia térmica, o que equivaleu a 60% da energia requerida para elevar a temperatura da água ao patamar de operação do sistema, estipulada em 90 °C, nas condições climáticas do ensaio. Já no dia nublado, a energia térmica gerada foi de 6,25kWh, o que equivale a 39 % da energia requerida para aquecer a água a 90 °C, nas condições do clima no dia do ensaio. Portanto, a energia solar térmica pode ser utilizada como fonte complementar de energia e gera economia na fonte primária, seja biogás ou qualquer outra fonte de energia.

Essa economia também ficou comprovada quando foram comparados os consumos de energia oriunda do biogás, em dias com condições climáticas diferentes, sendo um dia ensolarado e um dia nublado, onde o gasto energético foi menor nos dias ensolarados em comparação com os dias nublados. O consumo de energia no dia nublado foi de 18,52 kWh e a temperatura da água de 75,9 °C, enquanto que a energia consumida no dia ensolarado foi de 13,66 kWh e a temperatura da água de 90,0 °C. Portanto, os incrementos de energia dependem da condição térmica inicial e, por consequência, da condição da radiação solar.

Com relação ao estágio de higienização do lodo esgoto, o protótipo 2 teve um desempenho superior, pois elevou a temperatura a 77,35 °C, em média, e demandou menor quantidade de energia oriunda do biogás, sendo equivalente a 395,41 kWh/m³ de lodo de esgoto higienizado. Já a operação no protótipo 1, resultou

em uma temperatura na massa de lodo de 66,97 °C, em média, e gasto energético de biogás equivalente a 712,94 kWh/m³ de lodo de esgoto higienizado.

Embora os resultados apontem um desempenho superior do protótipo 2, na tarefa de higienizar o lodo, um fator de grande importância são as condições de operação dos leitos de secagem, pois, na prática, há a necessidade de se constantemente colocar e retirar o lodo, de forma manual. Nesse sentido, o protótipo 1 possui melhores condições de retirada do lodo, sendo essa tarefa de fácil execução. Já o protótipo 2, o lodo de esgoto foi retirado com dificuldades, sendo que não foi possível a completa remoção. Ao longo do tempo, o lodo remanescente pode atuar como isolante térmico, prejudicando o desempenho do sistema. Além disso, a retirada do lodo com ferramentas manuais, pás, enxadas, colheres de pedreiro, por exemplo, demandariam cuidados especiais para evitar avarias, pois estariam em contato direto com a serpentina de cobre. No protótipo 1, cujo piso é de concreto, as chances de ocorrer avarias durante a retirada de lodo são minimizadas.

Em relação a secagem do lodo, o desempenho dos protótipos 1 e 2 foi parecido, pois o teor de sólidos totais, verificado ao final do período, foi de 86,69 e 88,07%, respectivamente. Esse resultado aponta um incremento de 64,94 e 68,86% em relação ao teor de sólido totais inicial, respectivamente nos protótipos 1 e 2.

O dimensionamento do sistema apontou que a produção teórica de metano, nas piores condições apontadas pela literatura, é suficiente para suprir energeticamente esse sistema, sendo uma autonomia de 164 % para o protótipo 1 e de 295% para o protótipo 2. Ou seja, o volume de metano disponível é superior ao volume demandado em ambos os casos.

A área requerida para executar a higienização variou entre 4,62 e 231,00 m², considerando os regimes de descarte de lodo avaliados, entre 1 e 5 dias, e a capacidade de atendimento de ETEs, entre 10.000 e 100.000 habitantes.

O volume de biogás, com teor de 70% de metano, necessário para se higienizar o lodo de esgoto, considerando os regimes de descarte de lodo avaliados, entre 1 e 5 dias, e a capacidade de atendimento de ETEs, entre 10.000 e 100.000 habitantes, variou de 59,41 a 2.970,58 m³. Na prática, esse seria o volume que teoricamente precisaria ser armazenado. Porém, boa parte do biogás gerado pode ser armazenado no próprio reator anaeróbio. Portanto, para se dimensionar um gasômetro, externo ao reator, deve-se estudar caso a caso para saber-se qual parcela de volume de biogás pode ficar armazenada no próprio reator.

Conclui-se, portanto, que um sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás é uma alternativa para executar essa tarefa em ETEs de pequeno e médio porte, pois cumpre a função requerida, é de fácil implantação, pois utiliza materiais e mão de obra facilmente encontrados no mercado. Além disso, um sistema que se utilize da queima de biogás para geração de energia, é uma solução que vai ao encontro da legislação ambiental pertinente, contribuindo também para redução da emissão de gases indutores do efeito estufa.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi estimada a energia demandada pelo biogás, atuando em conjunto com a energia proporcionada por um coletor solar e um reservatório térmico de 200 litros. Essa quantidade de água é muito superior ao volume necessário para circulação de água entre todo o sistema piloto. A quantidade de energia para aquecer a água está relacionada ao volume, portanto quanto maior o volume maior será a quantidade de energia utilizada. Portanto, uma investigação utilizando um volume menor de água no reservatório é necessária para aperfeiçoar o rendimento desse sistema. Por outro lado, o armazenamento de água quente em forma de energia térmica também pode ser favorável e reduzir a energia consumida. No entanto, o excesso de água armazenado pode levar ao desperdício de energia. Portanto, deve-se buscar o equilíbrio entre volume de água necessário para circulação e volume armazenado em forma de energia térmica, ficando essa investigação como sugestão para trabalhos futuros.

Todos os cálculos para dimensionamento apresentados neste trabalho foram baseados em um teor de sólidos totais fixo do lodo de esgoto (20% ST), além de considerar que a camada de lodo depositada nos protótipos sempre é igual a 10 cm, pois a eficiência do sistema foi comprovada nessas condições. Portanto, convém investigar a eficiência do sistema variando o teor de sólidos totais e espessura da camada de lodo de esgoto depositado nos protótipos. Variar o teor de sólidos totais do lodo de esgoto a ser higienizado.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria a utilização de outros materiais para compor o piso dos protótipos para transferência de calor, como o aço inox, por exemplo.

Uma questão importante a ser estudada é o armazenamento do biogás. Portanto, sugere-se uma investigação que contemple o levantamento de estruturas existentes para armazenamento de biogás e o dimensionamento baseado nos ciclos de produção de biogás de ETEs.

Por fim, sugere-se um estudo da viabilidade econômica financeira do sistema para sua implementação em escala real.

REFERÊNCIAS

AITA, Fernando. **Estudo do desempenho de um sistema de aquecimento de água por energia solar e gás.** 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006

ABRAVA. **Manual de capacitação em projetos de sistemas de aquecimento de água.** São Paulo, 2008. 138p. Disponível em: <
http://www.forumclima.pr.gov.br/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=Bz2XALLMNZh_fmzQrSG40BWPz0GQbTFn-p9QAXvl6H0, >. Acesso em 11 Jan. 2015.

ANDREOLI, Cleverson V.; SPERLING, Marcos V.; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569:** Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto. Rio de Janeiro, 2008. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220:** Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2003. 21p.

BENNAMOUN, Lyes. Solar drying of wastewater sludge: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 16, p. 1061 – 1073. Elsevier. 2012.

BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C.V.; MOCHIDA, G.A; SOUZA, L.M.K.M.; SERRAT, B.M. Aspectos agrônômicos do uso agrícola de lodo de esgoto – região metropolitana de Curitiba. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales.** v. 2, n. 1, p. 1-11. 2009

BORGES, Eduardo S. M.; GODINHO, Valéria M.; BEJAR, Deneb O.; CHERNICHARO, Carlos A. de L. Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. **Eng. Sanit. Ambient.** Rio de Janeiro v.14, n.3, p. 337-346. Jul/Set. 2009.

BRASIL - Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº274, de 29 de novembro de 2000. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 25 jan. 2001.

BRASIL - Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL - Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 30 out. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 03 out. 2010. Centro de Produções Técnicas – CPT, Viçosa, 2008. 238p.

CAVALCANTI, Evandro Sérgio Camêlo; LOPES, José Dermeval Saraiva; LIMA, Francisca Zenaide. **Energia solar para aquecimento de água**. 1. Ed. Viçosa. 2008

CHAGAS, Welington Ferreira. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado) Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública; 2000. 89 p.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 5 – Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Segrac, 1997. 246 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). **RALF: Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente reduzindo custos e economizando energia em tratamento de esgotos**. 2006. Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/filesmng.nsf/1B9DF09C9EAE4D2B832573760042EB40/\\$File/APRESENTA%C3%87%C3%83O_RALF_SANEPAR%20-.pdf?OpenElement](http://www.sanepar.com.br/sanepar/calandrakbx/filesmng.nsf/1B9DF09C9EAE4D2B832573760042EB40/$File/APRESENTA%C3%87%C3%83O_RALF_SANEPAR%20-.pdf?OpenElement)>. Acesso em: 22 abr. 2015

COMGÁS. **Manual Técnico para Projeto e Construção de Sistemas de Aquecimento Solar e Gás Natural**. São Paulo, 2011. 61p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Biogás: pesquisas e projetos no Brasil**. Ed. Esp. São Paulo. 2006. CETESB, Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 2006. 184p.

COSTA, David Freire da. **Geração de Energia Elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. 2006. Disponível em: <
http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissertacoes/costa.pdf > Acesso em 04 mai. 2015.

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

ELETROBRAS PROCEL. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil: Contribuições da Eletrobras Procel e Parceiros**. Luiz Eduardo Menandro de Vasconcellos; Marcos Alexandre Couto Limberger (Organizadores) – Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012. 240 p.

FERASSO, Clauber Andre. **Análise do impacto causado por sistemas de aquecimento solar na demanda e no consumo de energia em residências populares**. 2013. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2013. Disponível em: <
<http://biblioteca.asav.org.br/vinculos/000009/00000916.pdf> > Acesso em 06 mai. 2015.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. FRANÇA, M.; CHERUBINI, C. Desinfecção e Secagem Térmica do lodo de esgoto anaeróbico em leito de secagem pelo uso de biogás. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 22, 2003. Joinville, SC. **Anais...** Joinville, set, 2003.

HINDIYEH, M. Y. **Enumeration and survival studies on helminth eggs in relation to treatment of anaerobic and aerobic sludges in Jordan**. PhD Thesis, Newcastle Upon Tyne, England-UK, 1995.

JUNIOR, Antônio Tavares de França. **Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto**. 2008. 148f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Programa de Pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2008.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6. Ed. Rio de Janeiro. 2011. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Rio de Janeiro, 2011. 1050p.

KRIGUEL, Karina; POSSETTI, Gustavo R. C.; MACHADO, Jasmine M.; CARNEIRO, Charles; AMARAL, Karen J. do. Determinação da difusividade térmica do lodo proveniente do tratamento anaeróbico de esgoto doméstico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28, 2015, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2015.

LIMA, Felipe Palma. **Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás.** 2005. 139f.; Dissertação (Mestrado em energia) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2005/Teses/Tese_FelipeLima.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2015

LIMA, Márcia Regina Pereira. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** 2010. 284f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010.

LOBATO, Livia C. da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. 184f. Dissertação (Doutorado em saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ENGD-8KYNF3> >. Acesso em: 11 jan. 2015.

MACHADO, Luiz Leal Netto. **Aspectos Técnicos Relacionados à Geração de Energia Elétrica a Partir do Lodo de Esgoto.** 2011. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: < <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli512.pdf> >.

MANEA, Tiago Francisco. **Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo.** 2012. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: < <ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/manea.pdf> >.

MATHIOUDAKIS, V.L; KAPAGIANNIDIS, A.G; ATHANASOULIA, E; DIAMANTIS, V.I; MELIDIS, P; AIVASIDIS, A. Extended Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plants. **Desalination**, v. 248, p. 733 – 739. Elsevier. 2009.

MELLO, João Carlos de Oliveira; *et al.* **Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás. Minuta do Termo de Referência TR8.** ANDRADE CANELLAS CONSULTORIA E ENGENHARIA LTDA. São Paulo: Comissão Especial de Bioenergia de Estado de São Paulo - CEBE, 2007. 75 p.

MERCADO, Álvaro Guzmán. **Remoção de sulfeto de hidrogênio de biogás em instalação piloto com óxido de ferro.** 2010. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/94108/286857.pdf?sequence=1> > Acesso em: 11 jan. 2015

MESQUITA, Lúcio César de Souza. **Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos.** Relatório Técnico nº 1. Universidade do Sol. São Manuel, SP. 2013. 28p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ONU DI). **Programa de Capacitação em Energias Renováveis: Energia Solar Térmica.** 2013a. Disponível em: < <http://www.renenergyobservatory.org/br/aplicativos/capacitacao.html> > Acesso em: 11 jan. 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ONU DI). **Programa de Capacitação em Energias Renováveis: O Biogás.** 2013b. Disponível em: <<http://www.renenergyobservatory.org/br/aplicativos/capacitacao.html>> Acesso em: 11 jan. 2015.

PARANÁ - Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA. Resolução nº 21, de 22 de abril de 2009. **Diário Oficial do Estado do Paraná.** Poder executivo, Curitiba, 04 mai. 2009.

PARANÁ - Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA. Resolução nº 16, de 26 de março de 2014. **Diário Oficial do Estado do Paraná.** Poder executivo, Curitiba, 15 abr. 2014.

POSSETTI, Gustavo R. C.; JASINSKI, Vanessa P.; ANDREOLI, Cleverson V.; BITTENCOURT, Simone; CARNEIRO, Charles. 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, 15, 2012, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo horizonte, 2012. 1 CD-ROM.

POSSETTI, Gustavo R. C.; JASINSKI, Vanessa P.; MESQUITA, Nilton C.; KRIGUEL, Karina; CARNEIRO, Charles. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 2013, Goiânia, GO. **Anais...** Goiânia, 2013. 1 CD-ROM

PROBIO. **Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB. Fundamentação teórica.** Curitiba, 2015. Disponível em: < <http://site.sanepar.com.br/probio/probio.zip> > Acesso em: 23 nov. 2015.

PROBIOGÁS. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgotos;** organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 183p.

ROSA, Patrícia de Barros; SCHROEDER, Patrícia. **Avaliação do impacto de implantação da secagem térmica nos custos com disposição em aterros sanitários do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto de uma metrópole.** 2009. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

SALIHOGU, Nezh Kamil; PINARLI, Vedat; SALIHOGU, Guray. Solar drying in sludge management in Turkey. **Renewable Energy.** v. 32, p. 1661 – 1675. Elsevier. 2007.

SILVA, Edna L. da; MENEZES, Estera M. **Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação.** 4. Ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p. Disponível em: < http://www.convibra.com.br/upload/paper/adm/adm_3439.pdf >. Acesso em: 20 Fev. 2015.

URBANETZ, Jair. **Energia solar fotovoltaica.** Apostila de aula. 2014. 41f. Curso de especialização em energias renováveis. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. CD-ROM.

VETORAZZI, Egon. **Desenvolvimento de um anteprojeto de sistema de calefação por piso radiante com aproveitamento da energia solar.** 2011. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade e das águas e ao tratamento de esgotos**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.

APÊNDICE A – Publicações

Neste apêndice se listam as publicações veiculadas ao longo do curso de especialização.

A.1 Artigos publicados em anais de eventos

WAGNER, Luiz G.; POSSETTI, Gustavo R. C.; CARNEIRO, Charles; URBANETZ, Jair. Sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás. In: Congresso sobre geração distribuída e energia no meio rural – X AGRENER GD, 10, 2015, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, 2015.