



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

DANIEL MORAES RAMOS STUDART

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA NÃO-CONVENCIONAL DE
SECAGEM DO LODO DE REATOR BIOLÓGICO ANAERÓBIO EM ETE**

FORTALEZA
2019

DANIEL MORAES RAMOS STUDART

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA NÃO-CONVENCIONAL DE
SECAGEM DO LODO DE REATOR BIOLÓGICO ANAERÓBIO EM ETE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S922d Studart, Daniel Moraes Ramos.
Desenvolvimento de sistema não-convencional de secagem do lodo de reator biológico anaeróbio em ETE
/ Daniel Moraes Ramos Studart. – 2019.
54 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

1. Piso radiante. 2. Lodo de reator biológico. 3. Secagem térmica. 4. Revolvimento. I. Título.

CDD 621.042

DANIEL MORAES RAMOS STUDART

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA NÃO-CONVENCIONAL DE
SECAGEM DO LODO DE REATOR BIOLÓGICO ANAERÓBIO EM ETE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energias
Renováveis da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro de Energias Renováveis.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, pessoas que antes de tudo, eu admiro. Obrigada por nunca me deixarem faltar nada, por todo aprendizado, por toda a base educacional que me permitiu chegar até esse ponto e por me ensinarem que se eu fosse fazer algo, que fizesse bem feito.

Ao professor William Barcellos, pela disponibilidade em ser meu orientador, pela atenção, paciência e pela oportunidade em trabalhar em seu laboratório. E agradeço ao Banco BNDES e a Cagece pelos investimentos no projeto, sem os quais esse trabalho não poderia ser realizado.

Aos meus parceiros de laboratório agradeço por tornar o ambiente de trabalho em um ambiente também de amizade e bem-estar. E agradeço aos amigos feitos durante a graduação que tanto permitiram meu crescimento, que me apoiaram e que marcaram esses longos anos de estudo com demonstrações de companheirismo e confiança.

“Uma lição sem dor não tem sentido. Isso é porque você não pode ganhar alguma coisa sem sacrificar algo em troca. O entanto, uma vez que você suportou a dor e venceu, você ganha um coração de aço. ”

(Hiromu Arakawa)

RESUMO

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) têm, por princípio, que tratar os efluentes provenientes do esgoto doméstico urbano e lhes dar uma destinação ecologicamente sustentável. No entanto, o processo de tratamento gera resíduos nocivos às pessoas e ao meio ambiente, a exemplo do lodo produzido nos reatores biológicos anaeróbios, que degradam a carga orgânica da biomassa e produzem biogás. Além disso, um grande quantitativo de areia é removido do esgoto no processo de tratamento. A gestão e o descarte desses materiais podem resultar em elevados custos operacionais para a ETE. Por essa razão, alternativas para manejo e disposição racionais vêm sendo discutidas no setor de saneamento. Neste contexto, o processo de secagem do lodo em leito de percolação natural, concomitante com vaporização da água por incidência de raios solares, tem sido a técnica amplamente utilizada, que promove a higienização e a redução do volume desse material. O baixo consumo de energia elétrica tem sido a principal vantagem desse processo, entretanto, demanda grande áreas e o elevado tempo de secagem. Além disso, a elevada umidade do lodo ao final do tratamento e os odores exalados por vários dias são os principais inconvenientes para a utilização dos leitos de secagem. Analisando esses aspectos, decidiu-se desenvolver um sistema híbrido de secagem térmica, em que a vantagem dessa técnica é o confinamento do lodo sob condições controladas e a redução drástica do tempo de secagem pela inserção de um piso radiante, conjugado com um sistema de revolvimento mecânico do lodo. Quanto à metodologia de trabalho, foi realizado um procedimento de investigação no qual foram inseridos dispositivos para auxiliar a secagem e comparada com a secagem convencional do lodo. Uma bancada de pesquisa foi exclusivamente construída para este estudo, em que foram utilizadas em posições estratégicas lâmpadas incandescentes para simular a radiação solar. Por meio dos experimentos foi possível plotar gráficos de curvas de temperatura e umidade do ar. Além disso, foi possível realizar análise comparativa da secagem por meio de teor de sólidos e diferença de peso do lodo. Os principais benefícios auferidos estão associados à redução do prazo de secagem em um quarto do tempo normalmente praticado e à qualidade do lodo seco em termos de umidade absoluta em um quinto, visando aplicação em processo de combustão.

Palavras-chave: Piso radiante; Lodo de reator biológico; Secagem térmica; Revolvimento.

ABSTRACT

The Sewage Treatment Stations (STSs) are responsible for treating effluents from urban sewage and providing them with an ecologically sustainable destination. However, the treatment process generates waste harmful to people and the environment, for example, during the biogas production of the sludge biomass degradation is produced in biological anaerobes reactors. Beyond that, a large amount of sand is removed from the treatment process. The company and the distributors can represent the operational costs for the STS. For this reason, alternatives to management and disposal are being discussed in the sanitation sector. In this context, the drying sludge process in natural percolation bed, aggregated with water vaporization and the incidence of solar rays, has been the widely used technique that promotes hygiene and reduction of the volume of this material. Low energy consumption has been the main advantage of this process, however, it demands large areas and high drying time. Besides, the high humidity of the sludge at the end of the treatment and the exhaled odors for several days are the main drawbacks to the use of the drying beds. Analyzing these aspects, it was decided to develop a hybrid thermal drying system, in which the advantage of this technique is the confining of the sludge under controlled conditions and the drastic reduction of the drying time by the insertion of a radiant floor, conjugated with a system of stirring mechanic of the sludge. As for the work methodology, an investigation procedure was carried out in which devices were added to aid drying by comparing it with conventional sludge drying. A research workbench was exclusively built for this study, in which were used in strategic positions incandescent lamps to simulate solar radiation. Through the experiments it was possible to plot graphs of curves of temperature and humidity of the air. Furthermore, it was possible to perform a comparative analysis of the drying by means of solids content and weight difference of the sludge. The main benefits are associated with the reduction of the drying time by a quarter of the time normally practiced and the quality of the dry sludge in terms of absolute humidity by one fifth, for application in the combustion process.

Keywords: Underfloor heating; Biological reactor sludge; Thermal drying; stirring

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Lodo seco na ETE de Quixadá.....	15
Figura 2 – Fluxograma de tipos de secagem.....	19
Figura 3 – Leito de secagem na descarga de lodo.....	20
Figura 4 – Esquema de secagem direta.....	22
Figura 5 – Esquema de secagem indireta.....	22
Figura 6 – Esquema de secagem sob condições constantes do meio seca.....	24
Figura 7 – Curva de teor de umidade em função do tempo de secagem.	24
Figura 8 – Desenho conceptivo do protótipo da secagem.....	30
Figura 9 – Esquema de balanço de massa na estufa.....	31
Figura 10 – Esquema de balanço de energia na estufa.....	32
Figura 11 – Secagem do lodo com radiação simulada de Quixadá.....	33
Figura 12 – Mapeamento sobre o piso radiante.....	34
Figura 13 – Lodo após a secagem convencional.....	35
Figura 14 – Lodo após a secagem com piso radiante.....	40
Figura 15 – Lodo após a secagem com revolvimento.....	44
Figura 16 – Lodo após a secagem não convencional.....	48
Figura 17 – Protótipo de secagem do lodo.....	54
Figura 18 – Piso radiante com esferas de aluminas.....	54
Figura 19 – Analisador de umidade.....	55
Figura 20 – Desenho conceptivo do secador.....	55
Figura 21 – Desenho conceptivo do sistema revolvimento.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Decaimento de massa do lodo na secagem convencional.....	36
Gráfico 2 – Curva de secagem do lodo na secagem convencional.....	36
Gráfico 3 – Temperatura do lodo no teste convencional.....	37
Gráfico 4 – Temperatura do ar no teste convencional.....	37
Gráfico 5 – Controle de temperatura do piso radiante.....	38
Gráfico 6 – Mapeamento da transmissão de calor do piso.....	39
Gráfico 7 – Decaimento de massa do lodo com piso radiante.....	41
Gráfico 8 – Curva de secagem do lodo com o piso radiante.....	41
Gráfico 9 – Comparativo da temperatura do lodo com e sem piso radiante.....	42
Gráfico 10 – Comparativo da temperatura do ar com e sem piso radiante.....	43
Gráfico 11 – Decaimento de massa com revolvimento.....	45
Gráfico 12 – Curva de secagem do lodo com revolvimento.....	45
Gráfico 13 – Temperatura do lodo com e sem revolvimento.....	46
Gráfico 14 – Temperatura do ar com e sem revolvimento.....	46
Gráfico 15 – Decaimento de massa do lodo na secagem não convencional.....	47
Gráfico 16 – Curva de secagem com sistema não convencional.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculos de condução.....	53
Tabela 2 – Cálculos de convecção.....	53
Tabela 3 – Cálculos de radiação.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LACER	Laboratório de Combustão e Energias Renováveis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NBR	Norma Técnica Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PiD	Controlador proporcional, integral e derivativo
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FASTEF	Fundação de Apoio a Serviços Técnicos Ensino e Fomento de Pesquisas
Cagece	Companhia de Água e Esgoto do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

M_a	Massa de água
M_d	Massa seca
Q_{cd}	Calor de condução
Q_{cv}	Calor de convecção
Q_{rd}	Calor de radiação
h_{cd}	Coefficiente de condução
h_{cv}	Coefficiente de convecção
A	Área superficial
T_i	Temperatura inicial
T_m	Temperatura do material
T_g	Temperatura do gás
e	Emissividade superficial
σ	Constante de Stefan-Boltzman
M_{lodo}	Massa de lodo
M_{a_s}	Massa de agua na saída
M_{a_e}	Massa de agua na entrada
M_{e_f}	Massa de agua na estufa inicial
M_{e_i}	Massa de agua na estufa final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	Estação de tratamento de esgoto	18
3.2	Tratamento do lodo	19
3.2.1	Leito de secagem	20
3.2.2	Secagem térmica	21
3.2.3	Disposição final do lodo	22
3.3	Fundamento sobre secagem	23
3.3.1	Secagem sob condições constantes do meio de seca	23
3.3.2	Terminologia	24
3.3.3	Umidade de um solido	26
3.3.4	Transferência de calor	26
4.	METODOLOGIA	29
4.1	Aparato experimental: Bancada de secagem do lodo	29
4.2	Balanco de massa e energia	30
4.3	Testes de secagem na bancada de estudo	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Resultados da secagem convencional	35
5.2	Resultados comparativo entre convencional e piso radiante	38
5.3	Resultados comparativo entre convencional e revolvimento	43
5.4	Resultados comparativo entre convencional e não-convencional	47
6	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51
	APENDICE	53

1 INTRODUÇÃO

No cenário brasileiro, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a matriz energética brasileira apresenta duas fontes principais: hidroelétricas e termoelétricas. Juntas, elas são responsáveis por mais de 85% da produção nacional (61,08% hidroelétricas e 27,12% usinas termoelétricas). No entanto, mesmo que a maior parte da energia produzida no Brasil seja oriunda de fontes renováveis, a falta de diversidade na matriz nacional torna a produção de energia vulnerável às condições adversas, que possam prejudicar a geração de energia (BARROS, 2018).

Assim, o presente trabalho apresenta uma proposta em termos de diversificação da matriz energética através de inovação tecnológica em termos de diversificação do lodo proveniente de reatores biológicos anaeróbios operantes em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). O processo contínuo de digestão anaeróbia nesses reatores requer, por consequência, a ação regular de descarga desse lodo para manutenção da atividade bacteriológica no reator. Entretanto, o descarte e destinação final desse lodo representa um problema real para gestão operacional e financeira da ETE, pelos custos envolvidos e pelas condições insalubres que estão associadas a esses resíduos líquidos.

Desta forma, o emprego de técnicas de desidratação possui grande relevância e está cada vez mais presente na operação de estações de tratamento, além de visar o aumento da vida útil do aterro sanitário em que sua disposição final é realizada (RICHTER, 2013). Neste contexto, verifica-se que as tecnologias disponíveis no mercado para descarte e destinação final desse lodo não apresentam viabilidade técnico-econômica para serem empregadas em pequenas ETES.

Por essa razão, a utilização do lodo seco em sistemas térmicos de combustão é a considerada a aplicação mais onerosa para a instalação industrial de uma ETE, por requerer processos sofisticados de processamento por subsistemas de secagem acoplados em série, como um processo continuado de remoção de umidade. O lodo gerado em estações de tratamento de água ou esgoto, independentemente do tipo de processo e de efluente, tanto doméstico como industrial, pode ser constituído de 95% de água. O lodo de esgoto apresenta alto teor de umidade com materiais orgânicos voláteis e não-voláteis, como também presença de metais o que torna o descarte uma operação complexa. O lodo inicialmente contém 8,5 kg de água por quilograma de lodo seco, conforme Danish et al.. Sendo que os requisitos de utilização do lodo seco para aplicação em caldeiras de vapor, visando a queima direta na

câmara de combustão, indicam valores baixos de umidade, segundo Prabir Basu (2015), a umidade ideal da biomassa é então em torno de 6%.

Em contrapartida, conforme a umidade é removida do lodo, mais difícil se torna o próprio processo de remoção, exigindo equipamentos de altíssimo custo, muitas vezes inviabilizando a instalação como um todo, principalmente quando o volume de lodo a ser tratado é relativamente pequeno, ou melhor, quando não atinge uma escala economicamente viável.

Este trabalho surgiu da parceria entre o Laboratório de Combustão e Energia Renováveis (LACER) e a Cagece no qual é necessário solucionar a problemática do lodo. No caso específico da ETE de Quixadá, há quinze leitos de secagem para cada módulo de quatro reatores biológicos anaeróbios. O processo, pode-se dizer que lodo ao sair do reator, através de um sistema de dreno, é conduzido a um tanque onde tem um sistema de secagem com especificações estabelecidas de acordo com padrões de projeto de instalação de reatores biológicos anaeróbios, mantendo uma vazão e eficiência de secagem ajustada à demanda de descarte do substrato. O lodo, após reduzir sua umidade no tanque de secagem para valores próximos de 30%, como mostrado na figura 1, é destinado a aterros sanitários da região em condições normais de secagem após um período que varia entre 12 a 20 dias.

Figura 1 – Lodo seco na ETE de Quixadá



Fonte: Obtida pelo autor.

Como o destino final do lodo pelo projeto da operação da caldeira de leito fluidizado que comporá o projeto em execução, utilizará o lodo descarregado dos reatores biológicos anaeróbios como combustível, após passar por um sistema de secagem. Portanto é necessário retirar mais umidade dessa biomassa.

Durante as visitas técnicas, foi visto que o principal empecilho durante a secagem do lodo é a camada rígida que se forma na superfície que dificulta a perda de água nas camadas inferiores. Com o aumento do tempo, as fissuras se conectaram entre si e formaram cavidades ocas de diferentes tamanhos (Zhang et al., 2016). Somente após a junção das fissuras, as camadas inferiores perdem umidade. Assim, o lodo possui um gradiente de umidade durante a secagem. Além disso, foram realizadas medições temperatura ar e do lodo, umidade do ar da região e, principalmente, radiação solar para realizar testes em laboratório.

A partir disso, o protótipo foi desenvolvido, no LACER, para realização de testes de secagem e estudos de aprimorar o processo de secagem do lodo proveniente de ETE. Como preparação do lodo como biomassa em caldeiras.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um processo inovador de secagem de lodo, em que são empregadas técnicas não-convencionais de transferência de calor e controle de processo, em termos de utilização de piso-radiante por regeneração de energia, integrado com sistema de revolvimento, visando a mitigação dos custos e tempo de secagem em relação ao sistema convencional.

Quanto aos objetivos específicos, destacam-se:

- Projeto construtivo de um sistema de secagem em escala de laboratório, para operar sob condições adequadas de funcionamento;
- Análise teórica do sistema de secagem não-convencional;
- Avaliação de desempenho de cada componente do sistema não-convencional

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Estação de tratamento de Esgoto

O tratamento de efluentes consiste na remoção e depuração dos poluentes e contaminantes presentes no mesmo, tanto com características físicas, como químicas e biológicas. Tal processo visa o descarte do líquido tratado em corpos receptores com parâmetros aceitáveis pelos órgãos ambientais competentes (ANDREOLI; FERNANDES; SPERLING, 2001).

O processo de tratamento é constituído por diferentes etapas. A remoção dos sólidos grosseiros é feita com o emprego de grades, peneiras, sedimentadores e flotores. Os sólidos coloidais dissolvidos são removidos utilizando-se os tratamentos físico-químicos. Os processos biológicos são utilizados para a remoção da matéria orgânica dissolvida ou coloidal (SPERLING, 2011).

Segundo Nunes (2008), a eficiência da remoção dos poluentes pode ser alcançada com diferentes níveis ou fases de tratamento, que são divididas em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário

As ETEs podem possuir três tipos de lodos: lodo primário, lodo biológico e lodo químico. O lodo primário é gerado em decantadores primários, são compostos por sólidos sedimentáveis do esgoto bruto e podem exalar forte odor em condições de elevada temperatura. O lodo biológico é a própria biomassa que cresceu com o alimento fornecido pelo esgoto afluente, sendo uma mistura complexa de sólidos de origem mineral e orgânico, onde parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana. Poluentes, nutrientes e contaminantes também ficam concentrados no lodo. Em sistemas de tratamento que utilizam uma etapa físico-química, como a flotação, o lodo é denominado lodo químico (ANDREOLI *et al.*, 2006).

Segundo Possetti (2013), o lodo proveniente de tratamento anaeróbico apresenta composições diferentes de lodo oriundo de tratamento aeróbico. O lodo anaeróbico apresenta, em média, 44,94% de cinzas, 48,79% de material volátil e 6,27% de carbono fixo e sua composição elementar é formada por 30,76% de carbono, 4,32% de hidrogênio, 3,29% de nitrogênio, 5,21% de enxofre e 11,46% de oxigênio. Já o lodo aeróbico possui 33,63% de cinzas, 55,58% de material volátil e 7,86% de carbono fixo e sua composição elementar é formada por 38,39% de carbono, 4,99% de hidrogênio, 5,08% de nitrogênio, 0,57% de enxofre e 17,33% de oxigênio.

3.2 Tratamento de lodo

Os principais motivos para realização da desidratação ou desaguamento são (VON SPERLING, 2005):

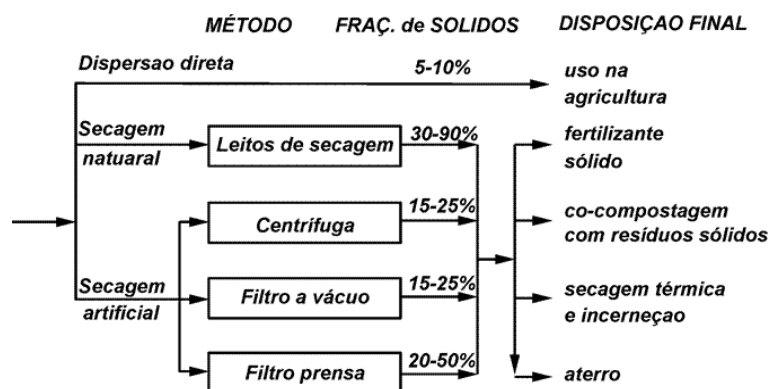
- i. Redução do volume de lodo para os tratamentos posteriores;
- ii. Redução do custo de transporte do lodo até a destinação final;
- iii. Facilidade no manejo do lodo;
- iv. Redução do volume de lodo para a disposição em aterro sanitário ou utilização na agricultura;
- v. Diminuição da umidade para a etapa de secagem e incineração.

O desaguamento ou desidratação do lodo é o processo de aumento do teor de sólidos, visando reduzir o volume do lodo. Esse processo pode ser efetuado por meio natural ou mecanizado (SOUZA et al., 1999).

Segundo Van Haandel (2009), existe aborda três tipos de processos que podem ser aplicados para aumentar o teor de sólidos no lodo: processos que usam a gravidade por leito de secagem; processos que usam força mecânica para separar os sólidos do líquido; processos térmicos para evaporação da água. Os processos mecânicos têm umidade residual alta (70 a 80 %) e processos gravitacionais maiores ainda (até 90%), e que a energia necessária para aplicar os processos varia muito de acordo com a natureza destes, porém só é possível obter remoção essencialmente completa da umidade através de processos térmicos.

A Figura 2 mostra um fluxograma sobre os vários processos usados para efetuar a separação das fases sólida e líquida, com as respectivas frações de sólidos obtidas, bem como, opções de disposição final.

Figura 2 – Fluxograma de tipos de secagem



Fonte: Van Haandel e Lettinga (1994), modificada pelo autor.

3.2.1 Leito de secagem

Segundo Nunes (2008) e Richter (2001), os leitos de secagem consistem em um ciclo de duas fases. A primeira corresponde à decantação e drenagem, as quais ocorrem nas primeiras 72 horas após a disposição do lodo. A drenagem da água é responsável pela maior eliminação da água livre contida no sólido. Já na segunda fase, a evaporação superficial confere ao lodo uma consistência pastosa. Esse processo pode levar de 12 a 15 dias, mas, a partir da interferência dos fatores regionais e climáticos, esse período pode variar entre 20 e 40 dias. A cobertura dos leitos de secagem pode influenciar positivamente no tempo de secagem, diminuindo a água percolada pelo lodo.

Figura 3 – Leito de secagem na descarga de lodo.



Fonte: Obtido pelo autor.

Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) ressaltam que os leitos de secagem podem atingir um teor de sólidos em torno de 30%. Quando o lodo atingir esse nível de desidratação, o mesmo deve ser removido do leito de secagem, procedimento este que evita o crescimento de vegetação, que viria a dificultar a posterior remoção do lodo seco.

O leito de secagem natural, envolvendo percolação e evaporação por incidência solar, é a técnica comumente usada para secagem do lodo digerido descarregado do reator, sendo seu custo de instalação muito inferior ao das opções mecanizadas. Consiste, basicamente, de uma parte superior, denominada camada suporte, constituída de tijolos, seguida de camadas de areia apoiada em brita, construída em fundo de terreno natural (ou concreto), ao qual se coloca uma ligeira declividade para drenagem. A distinção e a disposição

dos materiais utilizadas na construção de leitos de secagem de lodo podem ser vistas na Figura (MELO, 2006).

3.2.2 Secagem térmica

O processo de secagem térmica pode atender diversos tipos de lodo, sendo uma das técnicas mais eficientes e flexíveis de remoção de umidade da torta.. A principal desvantagem do processo de secagem térmica é o uso de energia para realizar esse processo agregando custos operacionais. Com a utilização de fontes alternativas é possível a redução do consumo de energia, e com isto a diminuição do custo operacional (ANDREOLI; FERNANDES; SPERLING, 2001).

De acordo com Aksoy; Kurt; Sanin (2015), a secagem térmica permite a redução de custos com transporte e destinação do resíduo, viabilizado a disposição de resíduos com alta carga orgânica na agricultura, pois o processo elimina organismos patogênicos, e produz matéria seca em menor volume agregando valor ao produto.

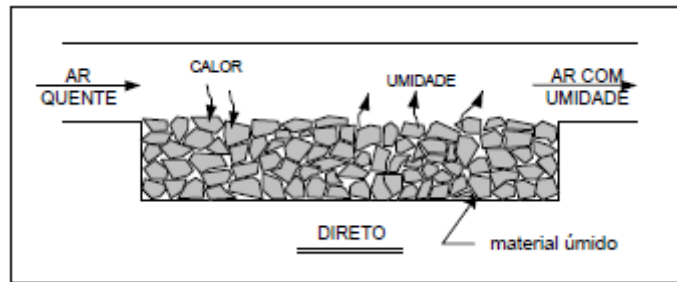
O processo de secagem térmica segue dois caminhos distintos. O mais comum, que utiliza energia não renovável, que agrega maior custo a esse sistema, e que tem uma alta capacidade e velocidade de produzir resíduos com teores de sólidos acima de 90%. O outro sistema utiliza energia do sol, próximo aos leitos de secagem, apresentando baixo custo operacional e não necessitando de mão de obra especializada. Entretanto esse sistema é mais lento e de difícil obtenção de teores acima de 90%, embora ocorram citações que atingiram percentuais mais elevados em climas quentes (AKSOY; KURT; SANIN, 2015).

Existem vários tipos de equipamentos para secagem térmica de lodos e a forma de classificação do equipamento mais adequado depende do modo de transferência de calor para os sólidos úmidos e as características de manipulação e propriedades físicas do material úmido (DAVID, 2002).

Segundo Chen *et al.* (2006), em relação ao processo de transferência de calor, os secadores térmicos podem ser classificados em secadores diretos, secadores indiretos e sistemas mistos.

Nos secadores diretos, a transferência de calor é realizada por convecção, por meio de contato direto do lodo com o meio de secagem. Este pode ser ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido que é utilizado como fonte de calor para o processo de secagem, conforme mostra a figura 4 (DAVID, 2002).

Figura 4 – Esquema de secagem direta.

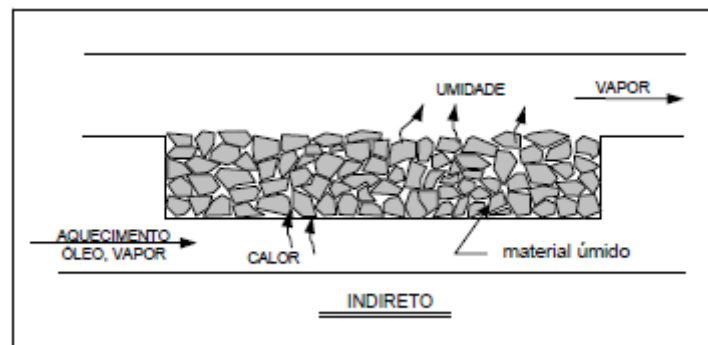


Fonte: David (2002)

A vantagem do secador direto é que a taxa de troca de calor é mais alta e o lodo é seco rapidamente, chegando a teores de umidade inferiores a 20%, entretanto, a principal desvantagem é a geração de grande quantidade de gases com odores e o risco de potencial de incêndio, que pode ser provocado pela autoignição do lodo seco e escumas em contato com os gases quentes (CHEN *et al.*, 2006).

Nos secadores indiretos, a transferência de calor ocorre por condução, por meio de uma parede normalmente metálica que separa o material a ser processado do meio de secagem que pode ser vapor saturado ou óleo térmico. Para que o calor seja transferido, a temperatura da parede metálica deve ser bem superior que aquela do material que se pretende processar (DAVID, 2002), conforme ilustra a figura 5.

Figura 5 – Esquema de secagem indireta.



Fonte: David (2002)

3.2.3 Disposição final do lodo

A Política Nacional de Resíduos Sólido (PNRS), instituído pela Lei 12.305/2010, contempla o fim de lixões, e destinação ambientalmente adequada dos rejeitos até 2014. De acordo com a NBR 10.004/2004, da ABNT, os resíduos sólidos nos estados sólidos e semissólidos são aqueles resultantes das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Os lodos provenientes de tratamento

de águas, gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cuja sua particularidade torne inviável o seu lançamento no corpo receptor, são classificados como resíduos sólidos. Desta forma, devem ser tratados e dispostos conforme legislação ambiental específica.

O lodo de ETEs, tipicamente, são dispostos em aterros sanitários, lançados em oceanos, incinerados, aplicados em solos com fins agrícolas e em áreas de reflorestamento (FERNANDES *et al.*, 2001; JORDÃO; PESSÔA, 2011). Segundo Kelessidis e Stasinakis (2012), nos 27 países membros da União Europeia, a utilização de lodo de ETE na agricultura é o principal destino para o resíduo, seguida pela incineração e disposição em aterro sanitário. A previsão de destinação final de lodos até o ano de 2020 indica que a utilização de lodo na agricultura e a incineração devem ser as principais práticas adotadas para as destinações finais (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012).

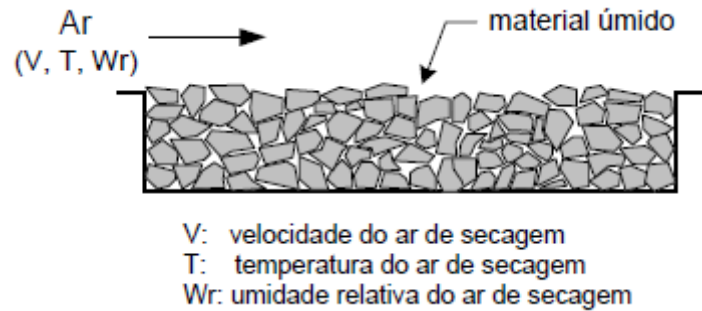
3.3 Fundamentos de secagem

Dois processos fundamentais precisam acontecer simultaneamente para que a secagem térmica ocorra: transferência de calor para evaporação do líquido e transferência de massa como líquido ou vapor dentro dos sólidos e como vapor pela superfície (MUJUMDAR, 2006).

3.3.1 Secagem sob condições constantes do meio de seca

Para se estudar o fenômeno de secagem, torna-se muito esclarecedor analisar o processo sob condições em que o sólido úmido fica em contato com um meio de secagem com temperatura e umidade invariáveis ao longo do tempo. Segundo PERRY (1973), FOUST (1980) e MCCABE (1985), essa situação é denominada de secagem sob condições constantes do meio de seca. Seu estudo pode ser realizado em pequena escala, com o auxílio de equipamentos e instrumentos que permitam secar o material, medir sua variação de massa ao longo do tempo e as características do meio de seca a montante e a jusante da região de secagem. Com isso, pode-se obter os conhecimentos fundamentais para a compreensão do fenômeno de secagem. A Figura 6 mostra um esquema representativo das condições desse estudo.

Figura 6 – Esquema de secagem sob condições constantes do meio de seca

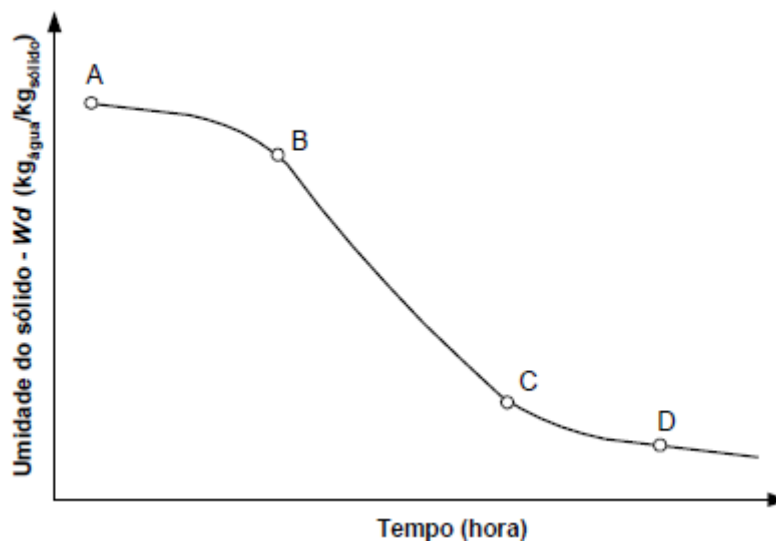


Fonte: David (2002), modificado pelo autor

O início do processo em estudo se dá com o sólido na temperatura ambiente e com umidade livre inicial conhecida. A partir do instante de início e em instantes subsequentes, mede-se a massa do sólido em processo de secagem e determina-se a sua umidade livre, de maneira a obter-se uma tabela com os valores de massa e tempo para cada valor de velocidade, temperatura e umidade do meio de secagem.

Com esses dados, constrói-se uma curva da variação da umidade em função do tempo. A Figura 7 apresenta uma curva típica de secagem em condições constantes do meio de seca.

Figura 7 – Curva do teor de umidade em função do tempo de secagem



Fonte: Foust (1980)

3.3.2 Umidade de sólido

As propriedades mecânicas do lodo estão diretamente relacionadas com o teor de umidade e este tem relação direta com o teor de sólidos. Segundo Von Sperling e Gonçalves

(2001) as quantidades de água nos sólidos influenciam as propriedades mecânicas, o manuseio, o volume e a disposição final do lodo.

As denominações do lodo são descritas conforme a umidade existente no material (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001):

- i. Umidade de 75 a 100%: lodo fluido;
- ii. Umidade de 65 a 75%: torta semi-sólida;
- iii. Umidade de 40 a 65%: sólido duro;
- iv. Umidade de 15 a 40%: lodo em grânulos;
- v. Umidade de 0 a 15%: lodo desintegrado em pó fino.

A água livre não está associada aos flocos de lodo e pode ser facilmente removida por gravidade (adensamento, flotação). A quantidade de água removida depende da fragilidade estrutural dos flocos e das características de sedimentação. A água intersticial é a parcela de água que fica presa dentro de fendas e espaços intersticiais dos flocos, sendo caracterizada pela baixa energia de ligação entre as partículas sólidas e líquidas. Pode se tornar água livre se o floco for destruído por força mecânica forte, pois as partículas estão unidas fisicamente por forças capilares.

A água superficial ou vicinal refere-se a água presa à superfície das partículas por adsorção e adesão, e que devido à tensão superficial e rigidez estrutural dos flocos pode ser removida quando aplicada pressão e vácuo. Pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de floculante sem que ocorra a ruptura do floco. A água de hidratação ou intracelular é a água ligada quimicamente às partículas do lodo. Como essa água faz parte da fase sólida só pode ser removida por forças térmicas que promovam uma mudança no estado de agregação da água, ou seja, por meio de processos específicos de secagem.

Segundo Standard Methods (2012), o sólido total é o resíduo do material após o processo de evaporação de uma amostra a temperatura de 103 a 105 °C e corresponde aos sólidos totais suspensos e aos sólidos totais dissolvidos presentes na composição da amostra. O cálculo para os sólidos totais é definido conforme a equação 1:

$$ST = \frac{Md}{Ma + Md} \quad (1)$$

Em que:

ST é o teor de sólidos totais (expresso em kg de sólidos secos por kg de base úmida);

Ma é a massa de água (kg); e,

Md é a massa de sólido seco (kg).

3.3.3 Terminologia:

Os termos e definições mais comuns, normalmente empregados em secagem, conforme PERRY (1973), FOUST (1980) e MCCABE (1985) são os seguintes:

Umidade absoluta: é a massa de vapor de água contida no ar associada à massa de ar seco. Em outras palavras, pode-se dizer que é a massa de água contida em uma quantidade de ar, medido em base seca. Usualmente, a umidade absoluta é dada em gramas de água por quilograma de ar seco.

Umidade relativa: é a razão entre a pressão parcial de vapor de água contida no ar e a pressão de vapor da água à temperatura do ar.

Ponto de orvalho: também chamado de temperatura de saturação, é a temperatura na qual uma dada mistura de vapor de água e ar se torna saturada. Em outras palavras, é a temperatura na qual a água exerce uma pressão de vapor igual à pressão parcial do vapor de água na mistura.

Temperatura de bulbo úmido: é a temperatura de equilíbrio dinâmico que uma superfície de água atinge, quando a taxa de transferência de calor para a superfície, por convecção, iguala-se ao consumo de calor, por transferência de massa, da superfície para o ambiente.

Temperatura de bulbo seco: é a temperatura da mistura de ar e vapor.

Água ligada: é a água associada ao sólido, cuja pressão de vapor é menor que a da água pura na mesma temperatura.

Água não ligada: é a água associada ao sólido, cuja pressão de vapor é maior que a da água pura na mesma temperatura.

Umidade livre: é a umidade que pode ser retirada do sólido na condição de umidade relativa do ambiente onde se encontra o sólido.

3.3.4 Transferência de calor

A transferência de calor é definida como a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperaturas entre os meios (INCROPERA *et al.*, 2008). Na secagem térmica o calor transferido para o lodo aumenta a sua temperatura e, conseqüentemente, a água contida na superfície evapora, formando gradiente de temperatura da superfície para o interior do lodo. A migração da umidade do interior para a superfície ocorre por escoamento capilar, difusão e diferenças de pressão internas. As condições externas como temperatura, umidade,

velocidade e direção do gás de secagem, área da superfície de exposição e tempo de detenção afetam a transferência de calor para o lodo. Logo essas características são importantes, assim como a determinação da difusividade térmica, para secagem do lodo, escolha do secador apropriado e operação adequada (DAVID, 2002; WEF,1992).

Os mecanismos da transferência de calor podem ocorrer por meio de condução, convecção e radiação térmica e esses mecanismos caracterizam o tipo de equipamento de secagem a ser utilizado (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A condução está associada à transferência de calor que ocorre ao nível molecular onde as partículas mais energéticas transferem energia para as menos energéticas. Na presença de um gradiente de temperatura a transferência de energia por condução ocorre na direção da diminuição da temperatura (INCROPERA *et al.*, 2008) em que:

$$Q_{cd} = \frac{k (T_m - T_i) A}{L} \quad (2)$$

Onde:

Q_{cd} é a taxa de transferência por condução (W);

k é a condutividade térmica (W.m-1.K-1);

A é a área da superfície de transferência de calor (m²);

T_m é a temperatura do meio de transferência de calor (K);

T_i é a temperatura do lodo (K); e,

L é a espessura da parede (m).

A convecção refere-se à transferência de calor entre uma superfície e um líquido ou gás em movimento quando ambos estiverem em temperaturas diferentes. A energia térmica se propaga por meio do movimento molecular aleatório (difusão) e do movimento global ou macroscópico do fluido devido à diferença de temperatura e ação da gravidade (INCROPERA *et al.*, 2008). Em que:

$$Q_{cv} = h_{cv} A (T_g - T_m) \quad (3)$$

Onde:

Q_{cv} é a taxa de transferência por convecção (W);

h_{cv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W.m-2.K-1);

A é a área exposta ao meio de secagem (m²);

T_g é a temperatura do gás (K); e,

T_m é a temperatura do material a ser processado (K).

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria em temperatura não nula. A emissão é devido a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas da matéria sendo a energia transportada por ondas eletromagnéticas (INCROPERA *et al.*, 2008).

Em que:

$$Q_{rd} = e \sigma A (Tr^4 - Tm^4) \quad (4)$$

Onde:

Q_{rd} é a taxa de transferência por radiação (W);

e é a emissividade da superfície aquecida;

σ é a constante de Stefan-Boltzman ($W.m^{-2}.K^{-4}$);

A é a área exposta à fonte radiante (m^2);

Tr é a temperatura absoluta da superfície radiante (K); e,

Tm é a temperatura absoluta do material a ser processado (K).

A energia solar, ou energia radiante, não é homogênea em todo o território global. O planeta recebe diferentes níveis de radiação em cada latitude, os quais também variam de acordo com as diferentes estações do ano. O Brasil é um país privilegiado. Está localizado, em sua maior parte, em uma região tropical do planeta, com grande incidência de radiação solar durante todo o ano (MOURÃO, 2002).

Segundo Labeee (2010), a radiação solar, ao entrar na atmosfera terrestre, divide-se em direta e difusa. A radiação direta é a parcela de radiação emitida pelo sol que atinge a terra, apenas sofrendo alteração pela atmosfera. Já a difusa sofre algum tipo de dispersão e radiação ocasionada pelas nuvens, e por partículas suspensas na atmosfera.

O sol emite energia com intensidades diferentes de comprimento de onda, sendo esta denominada espectral. A energia irradiada pelo sol encontra-se, em sua maior parte, na faixa do espectro que vai de 0,3 a $3\mu m$, que poderá ser transformada em calor pelos coletores solares (LABEEE, 2010).

4 METODOLOGIA

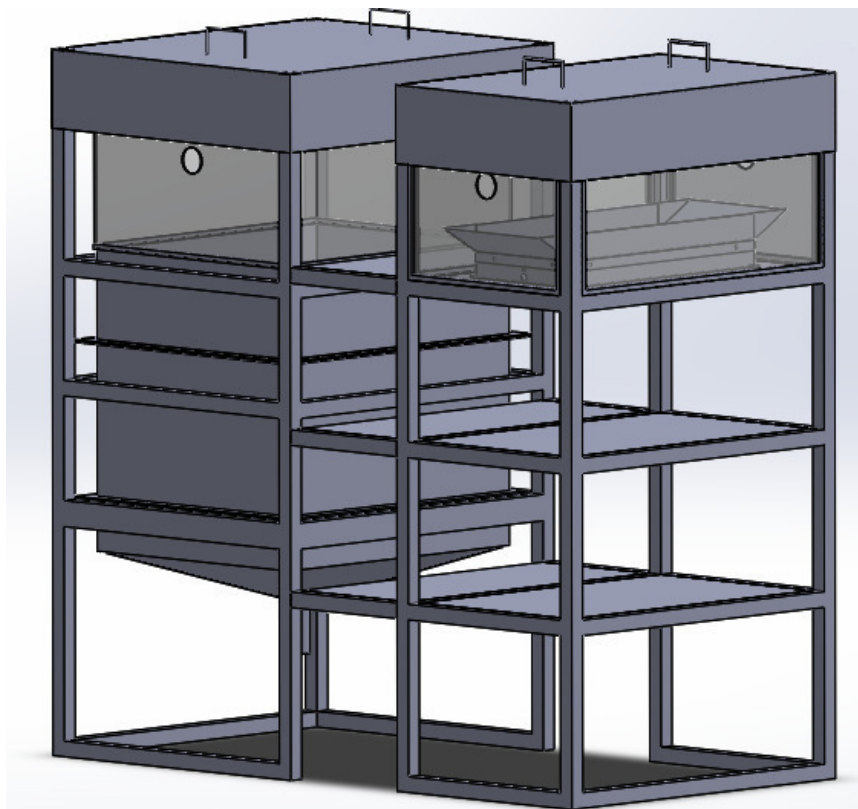
4.1 Aparato Experimental: secador e bancada de estudos

O secador presente no LACER foi projetado para o projeto, em parceria com a Cagece, que tem como objetivo secar e preparar o lodo proveniente de reator como combustível para a caldeira de leito fluidizado.

O projeto surgiu a partir da necessidade de minimizar o tempo de secagem do lodo em ETEs. Para isso foi inserido uma nova fonte térmica para auxiliar a fonte primária que a solar. Assim, foi idealizado um piso radiante para realizar a secagem indireta para melhorar a transferência de calor na biomassa. Além disso, um sistema foi pensado para realizar rachaduras porque durante a secagem do lodo é formada uma camada rígida que impede a perda de água, com isso um foi projetado um mecanismo para revolver o lodo durante a secagem. Aliado a isso, o protótipo possui um leito de secagem para estudos de percolação do lodo. Por fim, como os testes foram realizados dentro do LACER foi necessário um sistema radiação artificial.

A partir disso, a construção do protótipo foi iniciada com os fundamentos citados anteriormente. Para a radiação artificial foram adquiridas cinco lâmpadas incandescentes controladas por um dimmer. O piso radiante é meio poroso de aluminas com dimensões de 0,5 por 0,25 metros e seu aquecimento é por meio de fio resistivo de três metros, controlando a temperatura por um controlador denominado PiD e a voltagem com um varivolts. O funcionamento desse controlador é do tipo ON/OFF, mas controlando as variáveis que estabilizam o aquecimento das aluminas. Assim, isso garante que as temperaturas do piso, durante o teste, serão constantes. Por fim, O sistema de revolvimento é composto duas pás semicilíndricas alimentados por dois motores ligados por uma fonte de 12 volts, para realizar os movimentos de translação e rotação. A figura 8 mostra o desenho geral do protótipo de secagem do lodo. Via apêndice possui mais fotos e desenhos relacionado ao protótipo da secagem.

Figura 8 – Desenho conceutivo do protótipo da secagem



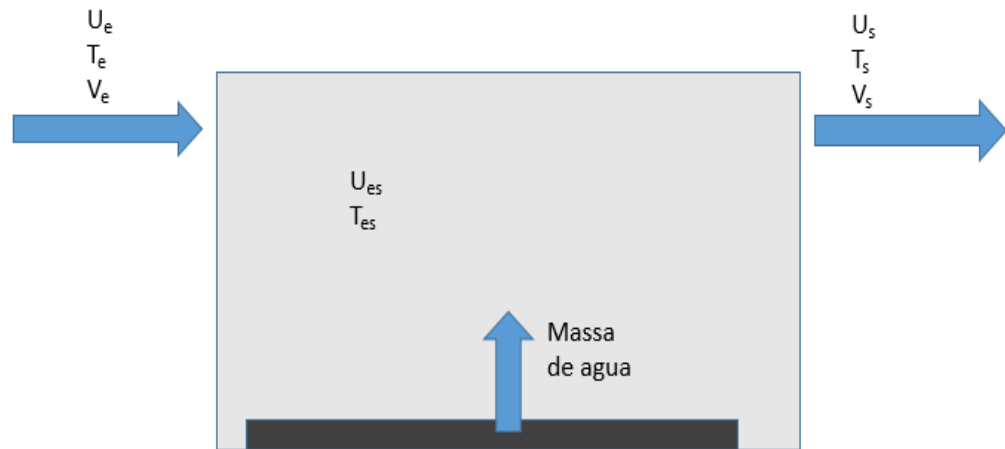
Fonte: Elaborado pelo autor

O sensoriamento do protótipo é realizado por termopares tipo J e sensores de umidade relativa e temperatura. Todos os dados serão armazenados num sistema de aquisição de dados a cada segundo. Além disso, a obtenção de dados de determinação de sólidos totais (ST) antes e após a realização dos experimentos foi essencial para a avaliação do estudo proposto. Para a medição do ST foi utilizada a analisador de umidade MOC63u, no qual realiza a medição massa ao mesmo tempo que seca a biomassa. Assim, ela possui um programa para realizar esse procedimento até que a massa de lodo não altere em torno de 0,01%, realizando medições de alto nível de precisão. A partir disso, é realizado o cálculo de teor de sólidos do lodo durante a secagem.

4. 2 Balanço de massa e energia

O cálculo da massa do lodo durante o tempo é essencial para o entendimento da secagem dele. Porém devido ao grande volume de biomassa e retirar da estufa vai ocasionar perda de calor, foi necessário analisar a perda de água por meio de um balanço de massa com umidades relativas da entrada, da saída e da estufa como demonstrado na figura 9 a seguir.

Figura 9 – Esquema de balanço de massa na estufa



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da umidade relativa, temperatura e velocidade de entrada foi possível calcular a umidade absoluta e conseqüentemente a massa de água. A análise foi realizada a cada segundo e para encontrar a massa de água que saía do lodo foi feita a conta de subtração entre a massa de água entre a saída e entrada da estufa e adicionada pela subtração entre a massa de água na estufa entre cada segundo, mostrado na equação a seguir:

$$Ma_{lodo} = (Ma_s - Ma_e) + (Ma_{ef} - Ma_{ei}) \quad (5)$$

Onde:

Ma_{lodo} é a massa de água que saí do lodo (g);

Ma_s é a massa de água que saí da estufa (g);

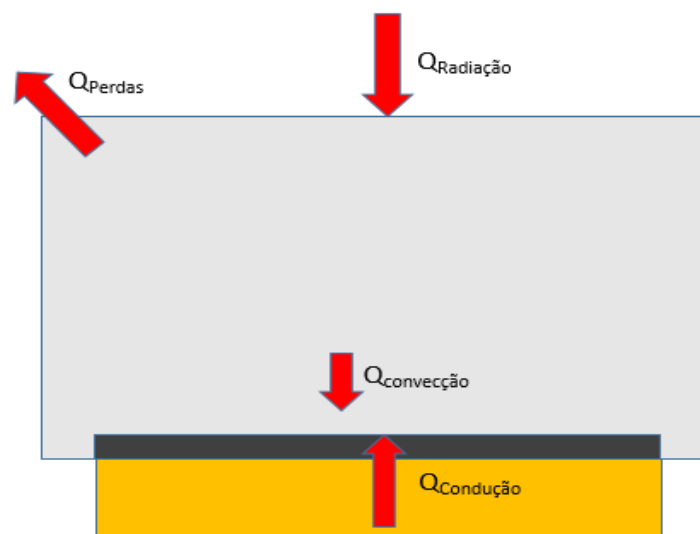
Ma_e é a massa de água que entra na estufa (g);

Ma_{ef} é a massa de água na estufa fina (g);

Ma_{ei} é massa de água na estufa inicial (g);

O balanço de energia relacionado ao processo de secagem envolve as transferências de calor adicionadas ao protótipo, envolvendo as três principais condução, convecção e radiação. Como mostra na figura 10.

Figura 10 – Esquema de balanço de energia na estufa



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir disso foram analisados cada parte do sistema com objetivo de averiguar o calor fornecido ao lodo. A perdas térmicas não foram contabilizadas para que após o teste fosse feita uma análise entre teórico e experimental. Via anexo estão as tabelas de cálculos sobre a transferência de calor.

Em relação à condução, foi considerado que o piso radiante seria um bloco térmico com temperatura fixa e ela já foi considerando as perdas de calor do piso. A temperatura que foi utilizado nos cálculos foi obtida a partir dos testes com o termopar na medindo a temperatura nas bordas do piso.

Em relação à convecção, foi considerado que a convecção natural já que a estufa não possui ventilação interna. Com isso, foram analisadas as condições de entrada do ar para cálculo da constante de convecção.

Em relação à radiação, foi considerado cinco lâmpadas incandescentes de 75W, simulando a radiação global. Para a o cálculo de radiação foi realizado pelo efeito joule, considerando, em média, que setenta por cento da potência é convertida em calor.

4.3 Testes de secagem na bancada de estudos

Os quatros procedimentos de secagem realizados foram: Secagem em condições convencionais, secagem com piso radiante, secagem com sistema de revolvimento e secagem com sistema não convencional.

As condições de testes para a secagem convencional de lodo são com parâmetros de Quixadá, assim as lâmpadas foram ajustadas com a radiação solar desse local, partindo de medições locais e cálculos teóricos, como na figura 11. Foram colocados dois quilogramas de lodo no protótipo para secar em vinte horas de teste. As medições que foram realizadas nos testes foram: temperatura do lodo, temperatura da estufa, umidade relativa e temperatura do ar de entrada e saída. Além disso, foram medidos massa e teor de sólidos do início e final de cada teste.

Figura 11 – Secagem do lodo com radiação simulada de Quixadá



Fonte: Obtido pelo autor

Para a avaliação do piso radiante foram realizados dois testes. O primeiro teste foi uma avaliação da transferência de calor na base do secador. Esse experimento auxiliou nos mapeamento e avaliação do piso, figura 12. Para isso, foram colocados cinco termopares no secador distribuído uniformemente para avaliação das temperaturas nele, com a temperatura de operação do piso radiante controlada pelo PiD, citado anteriormente, foi 100°C.

Figura 12 – Mapeamento sobre o piso radiante



Fonte: Obtido pelo autor

Após isso, foram realizados os testes com lodo para a avaliação do piso radiante. O teste segue o padrão citado no tópico anterior com a inserção do piso radiante. Para isso, foi realizado o procedimento com o piso radiante a temperatura de 100°C, juntamente com as lâmpadas. Foram realizadas as mesmas medidas citadas anteriormente.

Para a avaliação do sistema de revolvimento, foi realizado as condições do teste convencional com a adição do mecanismo de revolver o lodo. Para isso, o sistema de revolvimento foi acionado após 15 horas de experimento. Nesse momento, os termopares foram retirados para o sistema passar sem dificuldades.

Por fim, os dois sistemas funcionaram ao mesmo tempo para análise final da secagem do lodo e desenvolvimento de um sistema não convencional. Assim, foram realizados os procedimentos citados anteriormente, ou seja, as lâmpadas funcionando de acordo com Quixadá, o piso radiante funcionando a 100°C e o sistema de revolvimento funcionando após as 15 horas de testes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos testes foram gerados gráficos e tabelas em relação a teor de sólidos, temperatura do lodo e temperatura do ar. Assim, foram avaliados a cada mudança de secagem o comportamento desses parâmetros. Com isso, foi possível desenvolver e estudar a inserção do piso radiante e o sistema de revolvimento na secagem do lodo.

5.1. Resultados da secagem convencional

Após a secagem padrão do lodo, como demonstrado na figura 13, restava 512 gramas da amostra. Com a realização do teste no analisador de umidade foi visto que a umidade estava com 49,3%.

Figura 13 – Lodo após a secagem convencional

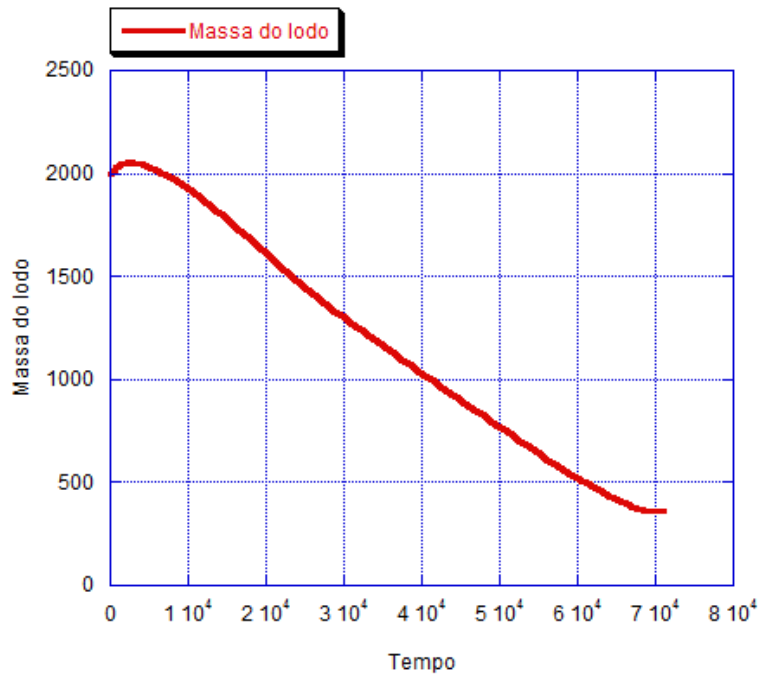


Fonte: Obtido pelo autor

O aspecto visual do lodo visto na figura 13 mostra que as vinte horas não foi suficiente para secar a biomassa. Porque o aspecto pastoso dele não adequada para a combustão já que a elevada quantidade de umidade faz com que a energia de combustão seja primeiro para evaporar a água existente no lodo.

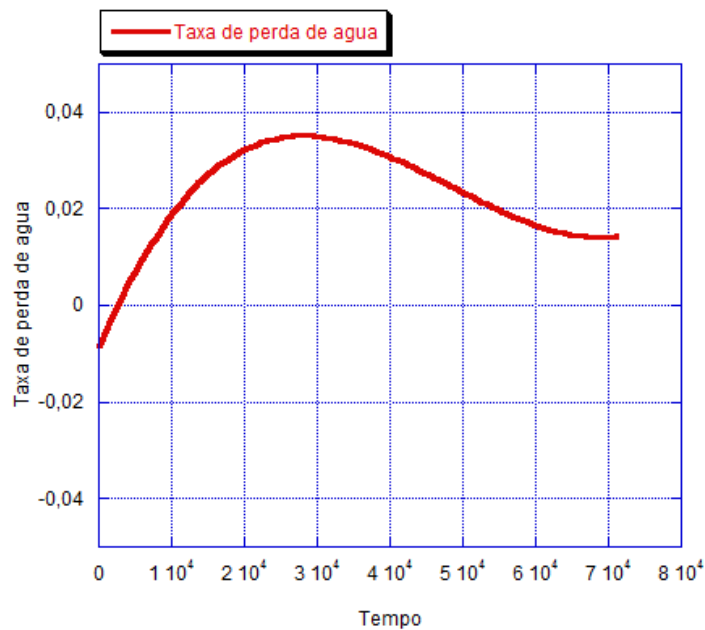
A seguir, nos gráficos 1 e 2 mostram a perda de massa e a taxa de perda de água durante a secagem do lodo.

Gráfico 1 – Decaimento de massa do lodo na secagem convencional



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2 – Curva de secagem do lodo na secagem convencional

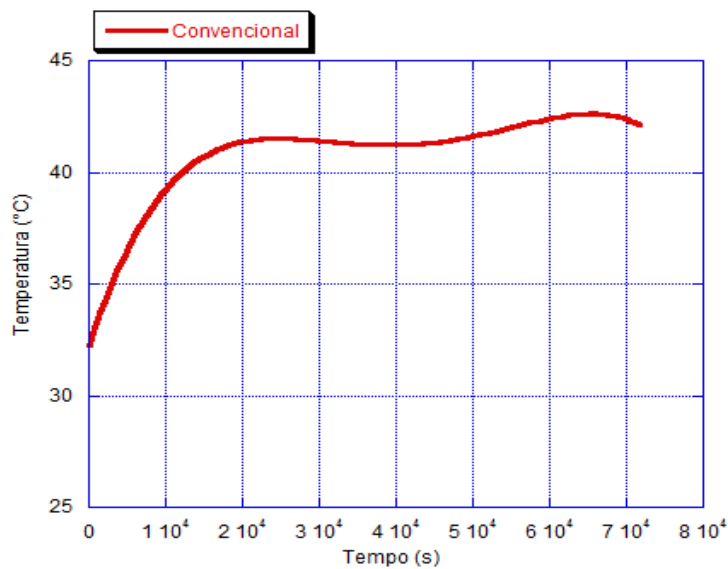


Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, após as vinte horas de secagem nas condições de secagem de Quixadá não são o suficiente para preparar a biomassa para a combustão devido à grande quantidade de água presente nela. Isso se nota pelos dois gráficos, sendo que a curva de secagem do lodo é a linha de tendência criada a partir dos dados de secagem, mostrados pois o lodo está na sua fase de secagem constante e possui elevada massa com o teor de sólidos alto.

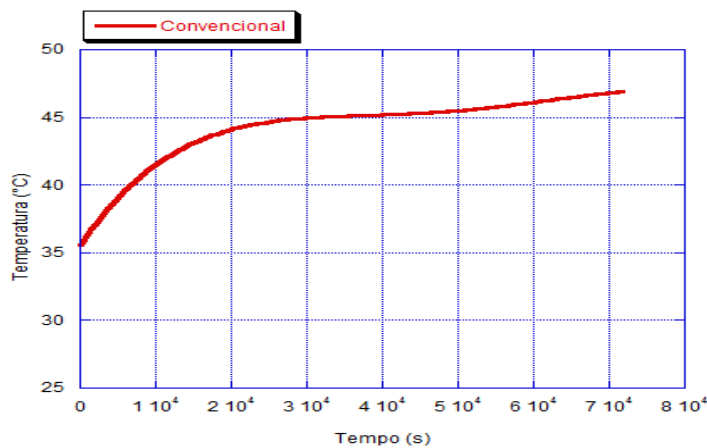
O gráfico 3 e 4 apresenta a evolução da temperatura, em graus célsius, do lodo e do ar com tempo.

Gráfico 3 – Temperatura do lodo no teste convencional



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 – Temperatura do ar no teste convencional



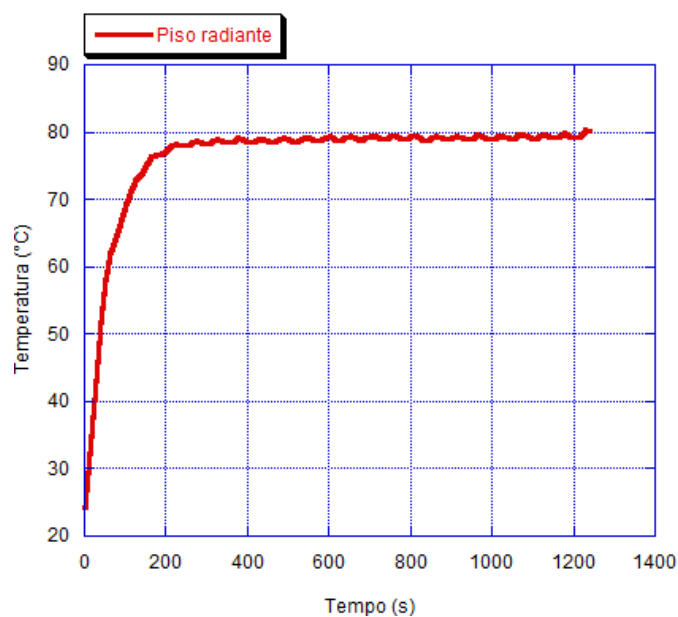
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a temperatura do lodo aumenta gradativamente de maneira lenta após ao pico inicial com o início da secagem. A temperatura dele se estabilizou em torno de 40°C durante todo o teste. Já a temperatura do ar se estabilizou em torno de 45° graus. Isso mostra que essas condições de testes não são ideais para a secagem da biomassa pois a temperatura de operação são baixas e não chegam num nível de teor de sólidos aceitável para a combustão da biomassa em questão pois a energia de queima seria para, primeiramente, retirar o excesso de água no lodo.

5.2 Resultados comparativo entre convencional e piso radiante

O piso radiante foi controlado para o fio resistivo ficar a cem graus celsius. No gráfico 5, mostra-se a temperatura das aluminas numa região mais distante do fio.

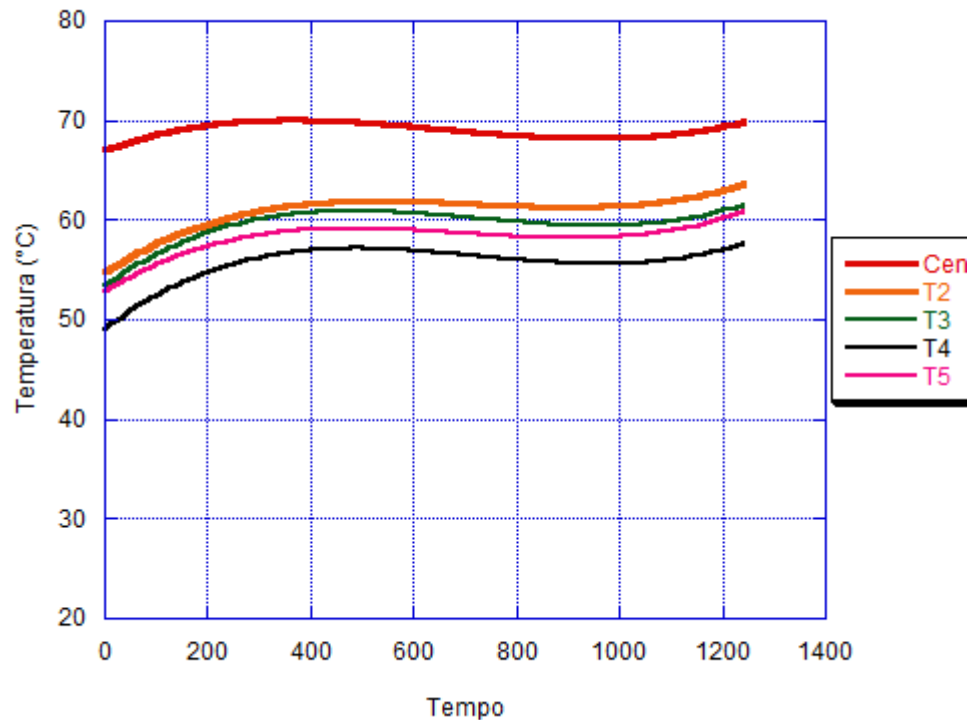
Gráfico 5 – Controle de temperatura do piso radiante



Fonte: Elaborado pelo autor

A temperatura do piso durante o teste estabilizou na faixa de noventa graus celsius mostrando a eficiência do meio poroso na transmissão de calor. As oscilações no gráfico demonstram o funcionamento do controlador ajustando o funcionamento do fio resistivo. O gráfico 6 é o mapeamento de calor com o piso sendo a fonte térmica.

Gráfico 6 – Mapeamento da transmissão de calor do piso



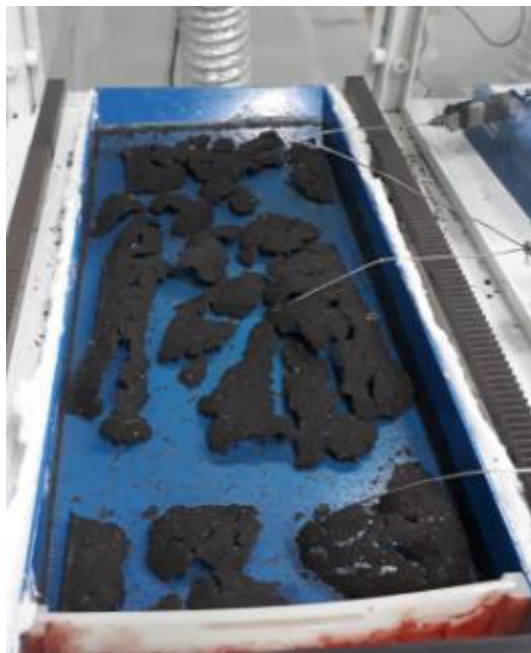
Fonte: Elaborado pelo autor

A temperatura do piso durante o teste estabilizou na faixa de noventa graus célsius mostrando a eficiência do meio poroso na transmissão de calor. As oscilações no gráfico demonstram o funcionamento do controlador ajustando o funcionamento do fio resistivo. O gráfico 6 é o mapeamento de calor com o piso sendo a fonte térmica.

A temperatura nos cinco pontos mostra a uniformidade durante o tempo e entre ele. Os pontos 2 a 5, que estão localizados mais perto da borda, possuem a temperatura mais baixa devido à perda térmica, porem a diferença é mínima e não influenciou na secagem do lodo. Além disso, o mapeamento foi realizado durante a parametrização do controlador, com isso a temperatura variou com frequência elevada durante esse teste.

Após a secagem do lodo, mostrado na figura 14, com o piso radiante, restava 150 gramas da amostra. Com a realização do teste no analisador de umidade foi visto que a umidade estava com 7,81%.

Figura 14 – Lodo após a secagem com piso radiante

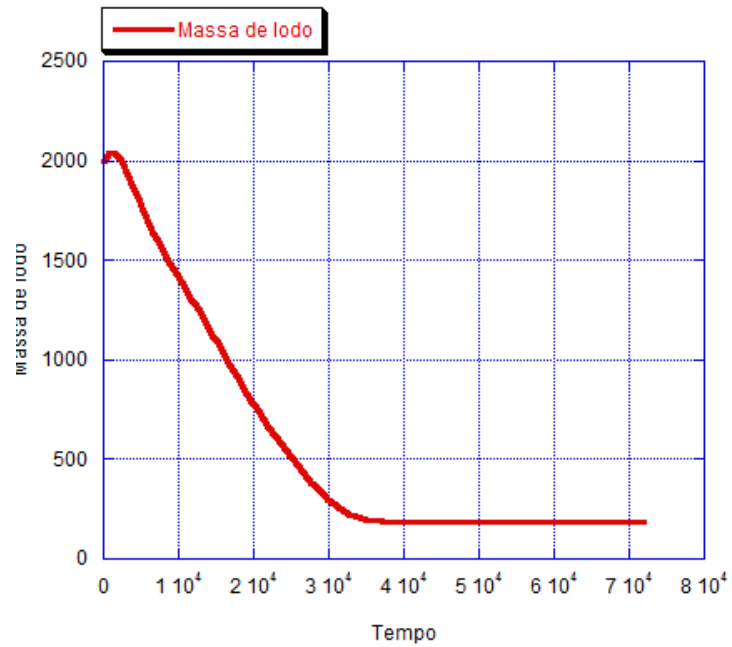


Fonte: Obtido pelo autor

Em comparação ao teste convencional, relacionado ao aspecto visual, é perceptivo a diferença de umidade e massa de lodo. Isso mostrar que uma nova fonte de calor acelera a secagem da biomassa e deixa ele em ótimas condições. Entretanto, o aspecto de placas não é interessante para a combustão em caldeira em leito fluidizado pois para o funcionamento desse dispositivo é preciso de biomassa com granulometria pequena para fluidizar com a areia.

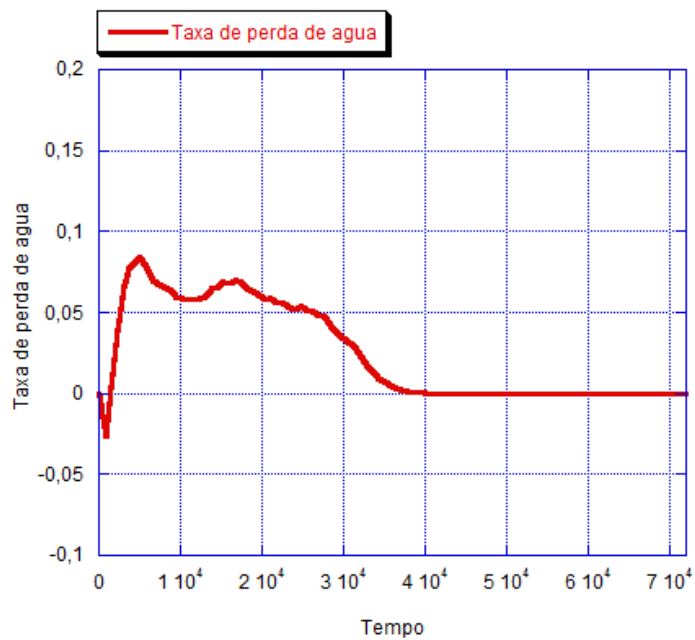
Em comparação ao teste padrão, nota-se uma melhora significante pois nas mesmas vinte horas a segunda amostra secou mais e chegou nas condições ideais para a combustão, como se pode notar com os gráficos 7 e 8.

Gráfico 7 – Decaimento de massa do lodo



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Curva de secagem do lodo com o piso radiante

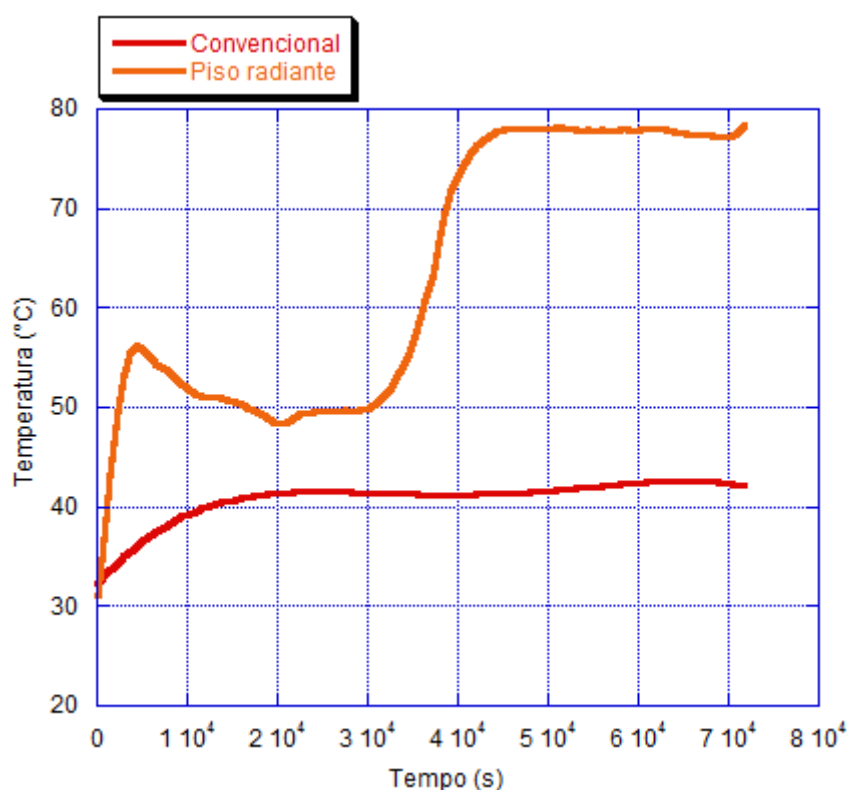


Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do gráfico de perda de massa percebe-se que a secagem do lodo finaliza por volta das 10 horas de teste. A curva de secagem foi plotada a partir até o fim de fato da secagem da biomassa. Isso mostra a importância da inserção do piso radiante para agilizar a secagem.

O gráfico 9 demonstra a comparação da temperatura do lodo nas condições padrão e com inserção do piso radiante.

Gráfico 9 – Comparativo da temperatura do lodo com e sem piso radiante



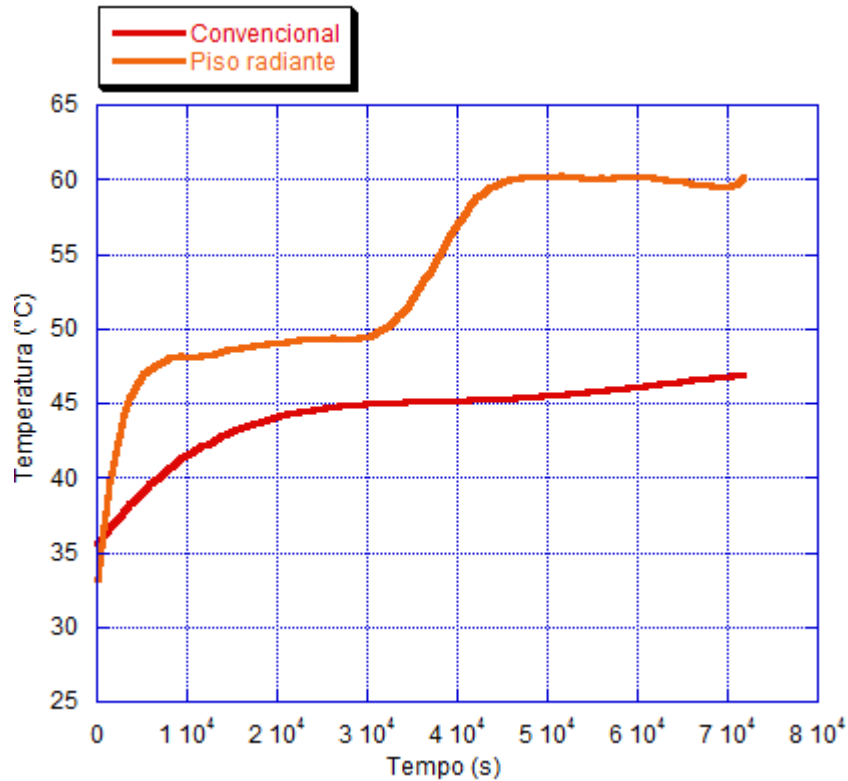
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir disso percebe-se que a temperatura durante a fase de secagem constante do lodo é maior para o teste com o piso radiante. Isso acontece devido a acréscimo de uma nova fonte de calor na secagem. Aliado a isso, após as nove horas de secagem a temperatura do lodo aumenta, mostrando o momento do fim da secagem constante e começo da rachadura do lodo. Essa diferença de comportamento mostra a evolução na secagem com o incremento do piso pois a fonte de calor inserida no sistema fez com que a secagem fosse agilizada e realiza em menos tempo.

Sobre a temperatura do ar, o gráfico 10 mostra a comparação entre o teste padrão e com piso radiante. Assim como a temperatura do lodo, a temperatura do ar aumentou no segundo experimento com a fonte de calor do piso. É possível analisar pela a temperatura ar a

transição da fase de secagem do lodo porque as nove horas existe um leve aumento na temperatura, indicando no aumento na temperatura do lodo.

Gráfico 10 – Comparativo da temperatura do ar com e sem piso radiante

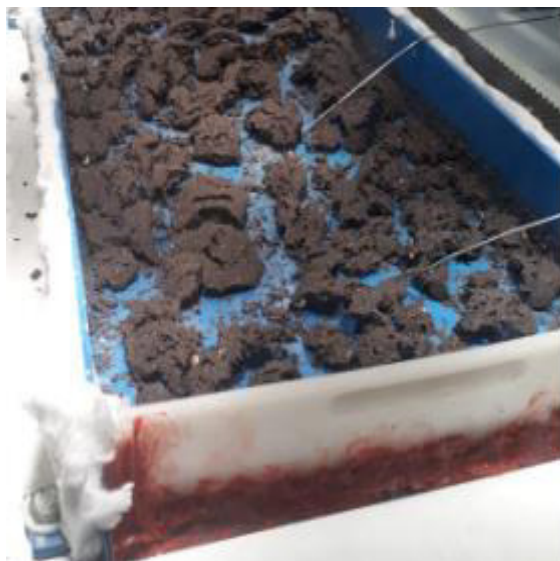


Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Resultados comparativo entre convencional e revolvimento

Após a secagem do lodo com o sistema de revolvimento, restava 381 gramas da amostra. Com a realização do teste no analisador de umidade foi visto que o teor de sólidos, em média, estava com 44,4%. Em comparação ao teste padrão, nota-se uma pequena melhora na biomassa final pois tanto a massa quanto o teor de sólidos finais foram menores em relação ao teste padrão como pode ser visto na figura 15.

Figura 15 – Lodo após a secagem com revolvimento

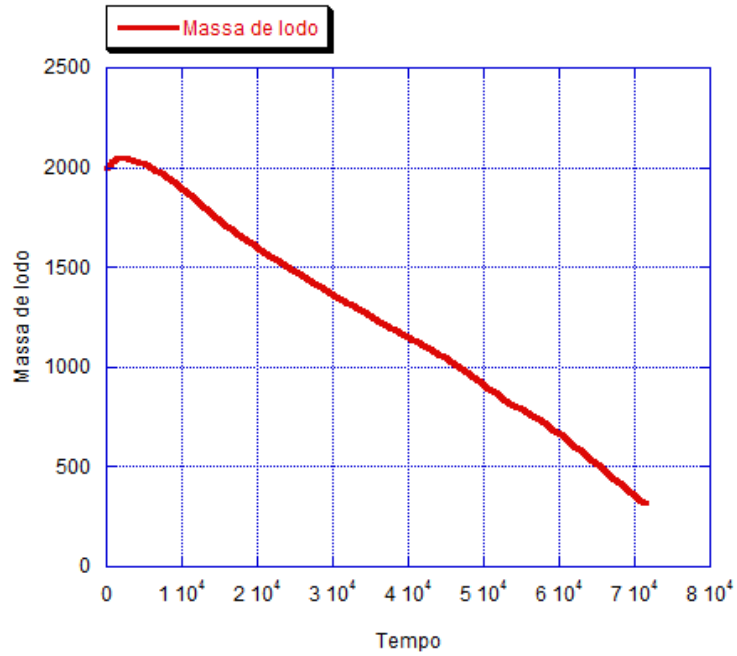


Fonte: Obtido pelo autor

Em comparação ao teste convencional, relacionado ao aspecto visual, existe uma ligeira diferença de umidade e massa de lodo. Isso mostra que o sistema de revolvimento ajuda na secagem da biomassa, mas não atinge o ponto ideal. A vantagem principal de revolver o lodo é diminuir a granulometria dele, ajudando a combustão em caldeira em leito fluidizado. Aliado a isso, a textura do lodo mostrava que a secagem com revolvimento auxiliava na homogeneização, mesmo quando o revolvimento não foi utilizado quando o lodo ainda estava na sua forma pastosa. Isso porque, ao revolver a biomassa, regiões abaixo da superfície foram realocadas e ganharam mais energia para perder umidade, fato que não ocorreu no teste convencional.

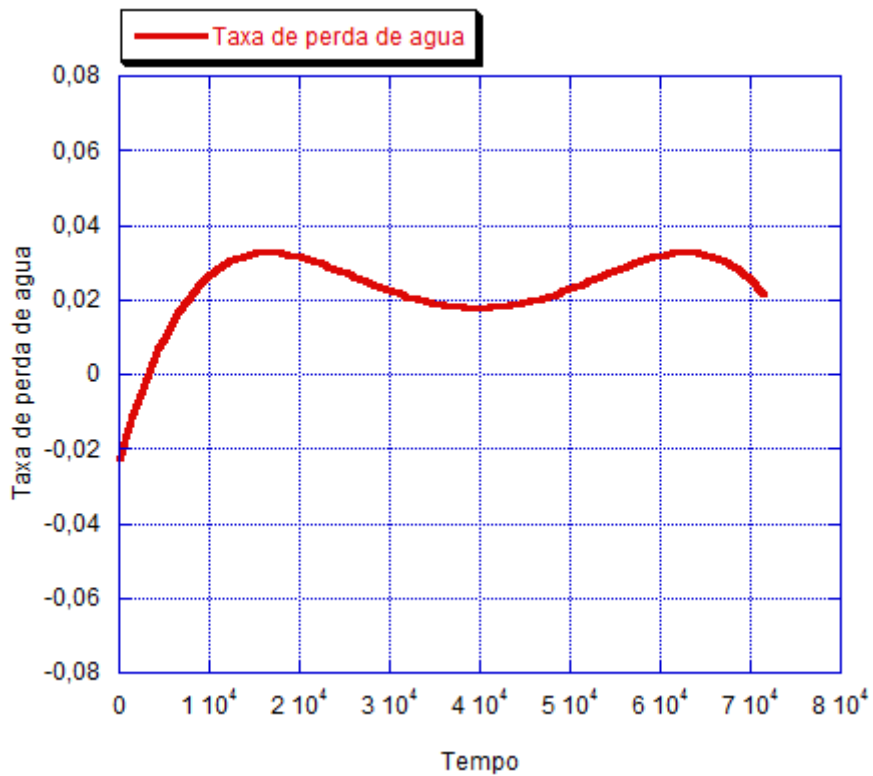
Os gráficos 11 e 12 mostram que a perda de massa e a curva de secagem não se alterou significativamente, demonstrando pelos resultados citados anteriormente.

Gráfico 11 – Decaimento de massa com revolvimento



Fonte: Elaborado pelo autor

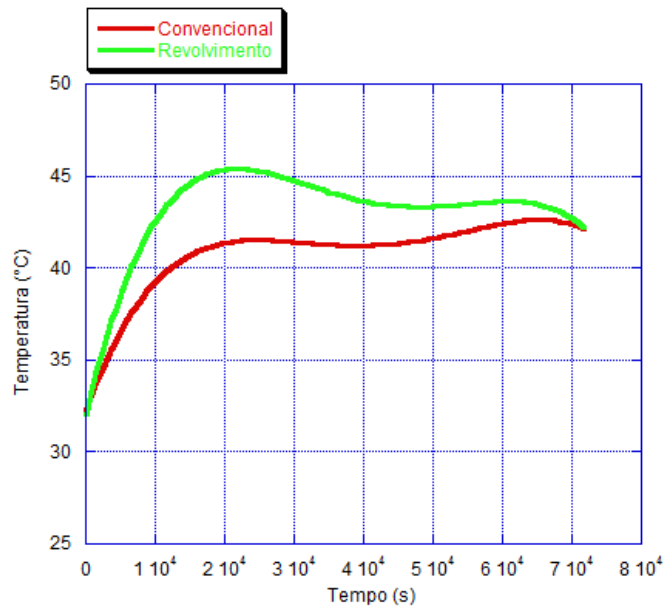
Gráfico 12 – Curva de secagem com revolvimento



Fonte: Elaborado pelo autor

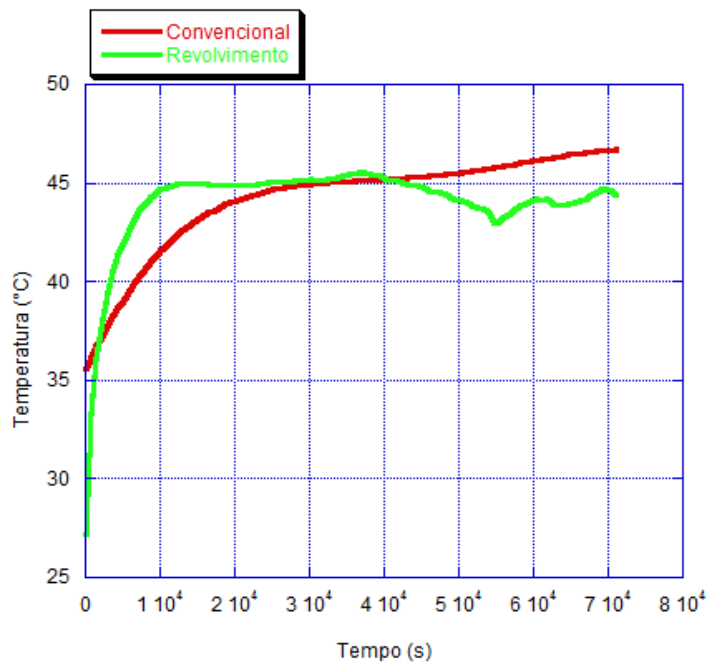
Os gráficos 13 e 14 demonstram a comparação da temperatura do lodo e do ar nas condições padrão e com inserção do sistema de revolvimento.

Gráfico 13 – Temperatura do lodo com e sem revolvimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Temperatura do ar com e sem revolvimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos gráficos anteriores percebe-se que a temperatura do ar e do lodo é praticamente a mesma para o teste com o revolvimento em comparação as condições

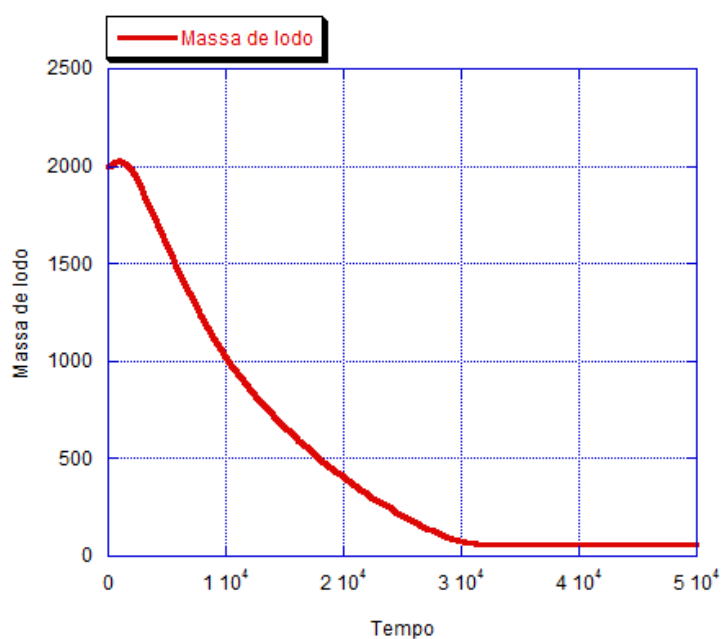
convencionais. Isso acontece devido ao fato de que revolver o lodo não melhorar significativamente a secagem, impactando pouco na temperatura do lodo e do ar. Com auxílio da curva de secagem, é perceptível que os dois testes ainda estavam na fase de secagem constante ao final das vinte horas de experimento no qual a temperatura da amostra não se eleva. Importante ressaltar que a queda de temperatura no teste de revolvimento foi ocasionada pelo momento de acionamento do sistema revolvimento pois ao passar o mecanismo foi necessário retirar os termopares em contato com o lodo e ar.

Portanto, o maior benefício na secagem com revolvimento foi em relação a perda de água, consequentemente no teor de sólidos finais, e na uniformidade no lodo após o experimento.

5.4 Resultados comparativo entre convencional e não convencional

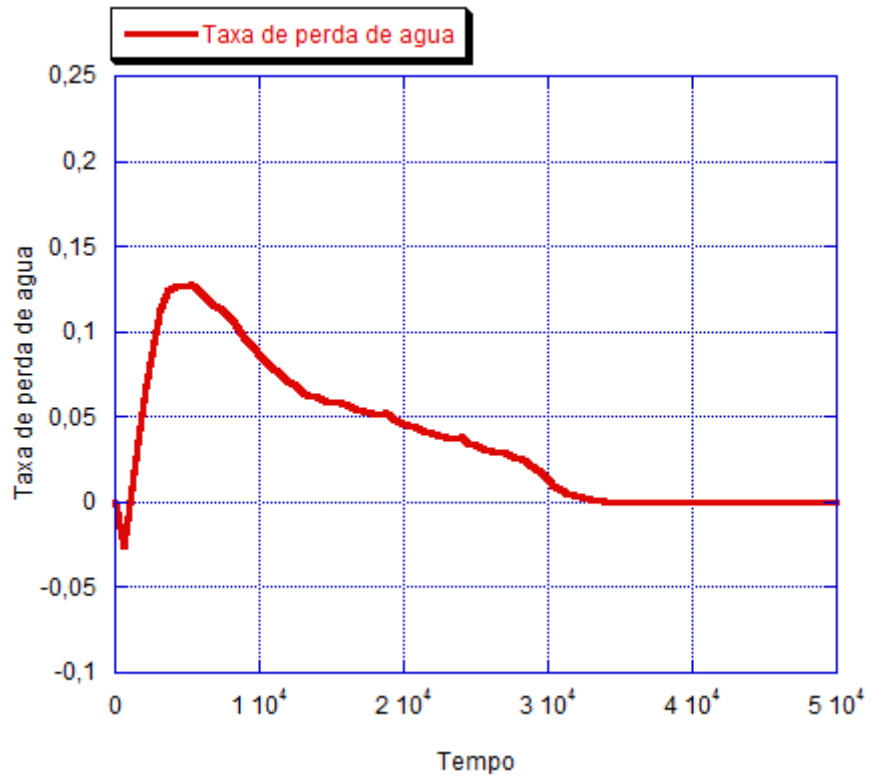
Pelo os resultados anteriores era para se esperar que a junção dos dois sistemas seria a melhor opção de secagem. Ao final da secagem sobrou aproximadamente 55 gramas de biomassa com teor de sólidos abaixo de 7,33% como mostrado na figura 16. Os gráficos 15 e 16 demonstram que o decaimento rápido da massa e a evolução da perda de água no processo.

Gráfico 15 – Decaimento de massa com sistema não convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 16 – Curva de secagem com sistema não convencional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Lodo após a secagem não convencional



Fonte: Obtido pelo autor

A diferença entre a secagem não convencional para a convencional é bastante elevada, tanto no qualitativo e quantitativo. Os acréscimos do sistema de revolvimento e piso radiante são eficazes em melhorar o processo de secagem. Pelo gráfico de decaimento de massa, nota-se que a secagem do lodo é finalizada antes das vinte horas e a curva de secagem durante a fase inicial do processo auxilia para esse entendimento, mostrando a eficiência do piso radiante com uma fonte de energia adicional. Além disso, a qualidade do lodo é a melhor, para a combustão em caldeira de leito fluidizado, entres os testes apresentados anteriormente. Isso porque o mecanismo foi acionado durante a fase solida do lodo, facilitando a quebra das placas formadas durante a secagem.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho ficou basicamente centrado na compreensão dos fenômenos secagem manifestados em um protótipo de laboratório. Com o objetivo de se avaliar parâmetros de funcionamento e operação em relação ao piso radiante e sistema de revolvimento, dos quais as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

1. Com a inserção do piso radiante, verificou-se a melhora significativa no processo de secagem do lodo. Pois a biomassa minimizou a questão tempo, em torno um quarto mais rápido, para chegar nas condições ideais. Além de diminuir em um quinto a umidade do lodo após as vinte horas de operação.
2. Com a inserção do sistema de revolvimento, verificou-se a mudanças no processo de secagem do lodo. Pois ao revolver o lodo facilita a secagem, mas é necessário acionar o sistema no momento com menos umidade na biomassa para obter melhores resultados. Pois testes com o lodo na forma pastosa não obteve resultados satisfatório, porém com a biomassas mais solida o resultado final agradou
3. As aluminas no piso radiante se mostraram eficiente na distribuição do calor porque a partir do mapeamento da temperatura foi possível notar uniformidade nos pontos medidos. Além disso, as medições realizadas

durante o teste se aproximam aos cálculos teóricos apesar de haver fugas de calor no sistema, demonstrando eficácia da bancada de estudo.

4. O protótipo de laboratório se mostrou satisfatório para a realização dos testes sobre secagem de lodo. Pois a partir dele vários resultados foram e serão obtidos para investigar mais a secagem dessa biomassa.

Assim, os dois sistemas aplicados a este trabalho se mostraram viáveis para desenvolvimento de larga escala de um sistema de secagem não convencional pois ambos os sistemas apresentados melhoram o processo de secagem do lodo em termos de tempo e minimizando o custo das ETEs. Isso porque ao secar com eficácia a biomassa para a combustão diminui e evita o custo de transporte e armazenamento aos aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10.004. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos sólidos Classificação**. 2a Ed. 2004.
- ALEM SOBRINHO, P. - Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: **Biossólidos na agricultura**. Capítulo 7. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.
- ANDREOLI, Cleverton V.; SPERLING, Marcos Von; FERNANDES, Fernando. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG. 2001.
- BASU, Prabir. **Combustion and gasification in fluidized beds**. New York: CRC Press, 20015
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4ª ed., Editora AMGH, p. 902. 2012.
- CHEN, G.; YUE, P.L.; MUJUMDAR, A.S. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 3ª ed., CRC Press. p. 887-904. 2006.
- DAVID A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- FERNANDES F.; SOUZA S.G. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V (coord) **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, ABES, p. 29 – 56. 2001
- HAANDEL, A. V. **Potencial de geração de energia a partir de lodo de sistema de tratamento de esgoto**. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. 2009.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas-SP: Editora Átomo. 2005.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.
- KELESSIDIS, A.; STASINAKIS; A. S. Comparative study of the methods used for treatment and disposal of sewage sludge in European countries. **Waste management**. p. 1186-1195. 2012.
- Krawczyk, P., 2016. **Numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer during sewage sludge drying in solar dryer**. *Procedia Eng* 157 (2016), 230–237.
- M. Danish, H. Jing, Z. Pin, L. Ziyang, Q. Pansheng, **A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of CaO and NaClO**, *Appl. Therm. Eng.* 106 (2016) 141e152.

METCALF & EDDY, INC. - **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 3rd ed. McGraw-Hill, 1991

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: **Handbook of Industrial Drying**. 3^a ed., CRC Press. p. 4 - 31 2006.

NUNES, José Alves. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 5^a Ed. Aracajú: Info Graphics Gráfica & Editora Ltda, 2008.

POSSETTI, G. R. C. **Propriedades físicas, químicas e calorimétricas de lodos oriundos do processo de tratamento de esgoto doméstico na Sanepar**. Informe técnico. Curitiba: SANEPAR. 2013.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de água: Tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de lodos de estação de tratamento de água**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3^a edição, V. 1, Belo Horizonte: SEGRAC, 2005.

SPERLING, Marcos Von. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Volume 2. 8^a Ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2011

STANDARD METHODS For the Examination of Water and Wastewater. 22^o edição. 2012.

VESILIND, P.A. & HSU, C.C. Limits of sludge dewaterability. **Water Science Technology**. v. 36, n.11, 1997.

Zhang, X., Chen, M., Huang, Y., Xue, F., 2016. **Isothermal hot air drying behavior of municipal sewage sludge briquettes coupled with lignite additive**. Fuel 171, 108–115

APÊNDICE –MEMORIAL DE CÁLCULO

Tabela 1 – Cálculos de condução

Piso radiante	
Largura [m]	0,50
Comprimento [m]	0,25
Superfície [m ²]	0,13
Espessura [m]	0,50
Volume piso radiante[m ³]	0,0625
Temperatura superficial [°C]	25,00
Calor específico (agua) [kJ/kg*K]	4180,00
Temperatura[°C]	80,00
Condutividade térmica (agua) [W/m*K]	0,20
Taxa de transferência de calor por condução [W]	2,75

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Cálculos de convecção

Ar de entrada	
Tar(°C)	40,00
HR (%)	60%
Vazão volumétrica de entrada [m ³ /s]	0,0528
Vazão mássica de ar úmido da entrada [kg/s]	0,0593
Diâmetro da entrada de ar [m]	0,1000
Área superficial da entrada de ar [m ²]	0,0079
Psat(Pa)	7.220,59
Pv(Pa)	4.332,35
P (tot)(Pa)	101.325,00
Y [kg água/kg ar seco]	0,0278
Vazão de ar úmido (kg/s)	0,0593
Vazão de ar seco (kg/s)	0,0577
Velocidade de entrada do ar seco[m/s]	6,5382
Convecção Natural	
Pr	7,0604E-01
Ra	1,9508E+07
Gr	2,7630E+07
Nu natural	3,5888E+01
Taxa de transferência de calor por convecção (W)	39,94

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Cálculos de radiação

Lâmpadas	
Potência elétrica [W]	30,00
Número de lâmpadas	5,00
Conversão da potência elétrica em calor	70,00%
Taxa de transferência calor por radiação [W]	105,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

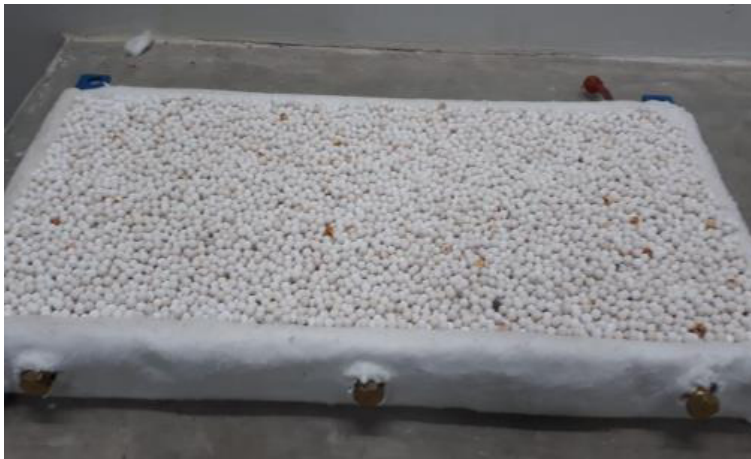
APÊNDICE – IMAGENS E DESENHO DO PROTÓTIPO DA SECAGEM.

Figura 17 – Protótipo de secagem do lodo



Fonte: Obtido pelo autor

Figura 18 – Piso radiante com esferas de alumina



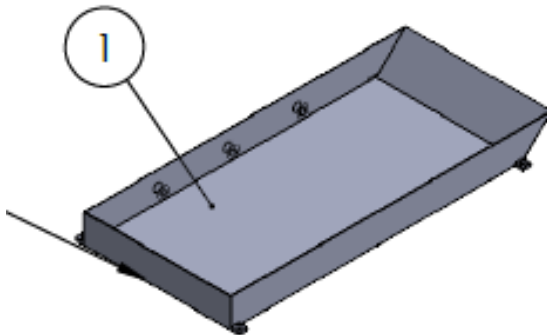
Fonte: Obtido pelo autor

Figura 19 – Analisador de umidade



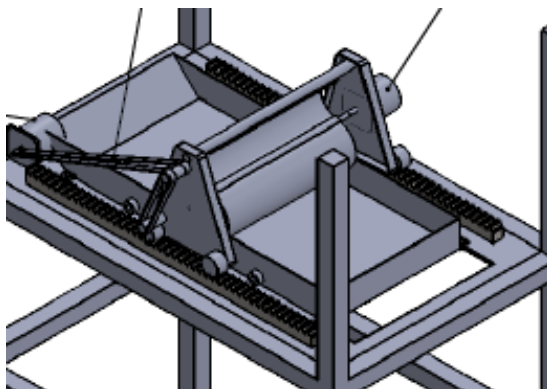
Fonte: Obtido pelo autor

Figura 20 – Desenho conceutivo secador



Fonte: Obtido pelo autor

Figura 21 – Desenho conceutivo do revolvimento



Fonte: Obtido pelo autor