

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

ZUDIVAN PETERLI

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXPERIMENTAL DA SECAGEM EM BAIXA
TEMPERATURA DE LODO SANITÁRIO COM O USO DE ENERGIA
HELIOTÉRMICA**

ITAJUBÁ
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

ZUDIVAN PETERLI

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXPERIMENTAL DA SECAGEM EM BAIXA
TEMPERATURA DE LODO SANITÁRIO COM O USO DE ENERGIA
HELIOTÉRMICA**

**Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia de Energia para a
obtenção do título de Mestre em Ciências em
Engenharia de Energia.**

Área de concentração: Sistemas Energéticos

Orientador: Dr. Osvaldo José Venturini

Coorientador: Dr. José Carlos Escobar Palácio

ITAJUBÁ

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

ZUDIVAN PETERLI

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXPERIMENTAL DA SECAGEM EM BAIXA
TEMPERATURA DE LODO SANITÁRIO COM O USO DE ENERGIA
HELIOTÉRMICA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia e aprovada por banca examinadora, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Itajubá.

Aprovado em 28 de agosto de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Diego Mauricio Yepes Maya
Examinador Interno – UNIFEI

Dr. Julio Augusto Mendes da Silva
Examinador Externo - UFBA

Dr. Osvaldo José Venturini
Orientador – NEST/IEM/UNIFEI

Dr. José Carlos Escobar Palácio
Coorientador – NEST/IEM/UNIFEI

ITAJUBÁ
2019

FLUIDO VITAL

A energia esta impregnada

Na música,

Na alegria,

Na transformação.

No andar do corpo,

No sorriso da face,

No toque da mão.

Mas no finamento

É a vida que acaba,

O espírito que parte,

Ou a energia que finda?

O que sobra ao chão?

Uma madeira sem seiva,

Um corpo sem vida,

Menos que um trapo de chão?

Quanta perplexidade sob a matéria...

Só para entender que,

Quando o movimento cessa

E a alegria finda:

Somos um corpo sem exergia,

Matéria sem vida,

Apenas o pó do chão.

ZUDIVAN PETERLI

(dedicado a Dr.^a Silvia e Dr. Arnaldo)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Osvaldo José Venturini, pelo exemplo como educador e pela oportunidade e liberdade de realizar este trabalho dentro do Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica e Distribuída (NEST).

Ao meu coorientador, Dr. José Carlos Escobar Palácio, pela prontidão e disposição em apoiar sempre quando necessário.

Buscando a essência da palavra orientador, sinto na obrigação de agradecer ao Dr. Arnaldo Martin Martinez Reyes e Dr. Electo E. S. Lora pela postura proativa em conduzir o meu pensamento para os melhores caminhos e pela inspiração para os trabalhos realizados.

Aos meus antigos orientadores, Dr.^a Raquel Machado Borges, Dr. Ricardo Franci Gonçalves e José Joaquim C.S. Santos, que me mostraram à conexão entre a energia e o saneamento, descrevendo um importante caminho a ser construído.

Aos professores e colegas de curso pelos ensinamentos, apoio e amizade durante esse período. Em especial aos servidores Osvaldo e Fabiano pelo grande apoio nas análises realizadas nos Laboratórios de Solos e Geotécnica e técnico Marcos no Laboratório de Maquinas Térmicas.

A empresa *Projection* serviços que financiou a construção da carcaça do secador de lodo.

A família da Republica Treme Treme, em especial ao Paulo Ricardo, Marcelo Braga, Daniel Reis e Otávio Refundini, pela luz durante algumas das longas noites de montagem mecânica e elétrica do secador experimental.

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), representada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, pela oportunidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) pela doação do lodo.

Por último, mas não menos importante, a toda a minha família e em especial a minha esposa e filho, Silvia e Mateus Louzada, pelo apoio, amor e compreensão sobre a jornada que iniciei nos últimos anos.

*“De nada vale o brilho da inteligência,
Se o coração permanece às escuras.”*

BEZERRA DE MENEZES

RESUMO

O desenvolvimento de um tratamento eficiente e de baixo custo para o lodo sanitário vai ao encontro do 6º objetivo da ONU que visa assegurar e disponibilizar o saneamento para a população mundial até o ano de 2030. Portanto, este trabalho avaliou, por meio de um modelo termodinâmico, a secagem em baixa temperatura pelo método do leito granular de lodo sanitário, previamente centrifugado, que foi integrado a um sistema heliotérmico com armazenamento térmico. Foram modelados o cenário 1 com o secador operando por 9 h.d⁻¹ e o cenário 2 por 24 h.d⁻¹ (operação contínua), sendo processados a mesma quantidade de lodo ao dia em cada cenário. Também foram realizados ensaios experimentais sobre a mistura de lodo úmido e tratado termicamente para estudar a influência da mistura sobre o processo de secagem. Os resultados mostraram que, nas condições estudadas, os teores de 50 e 90% de sólidos totais são os mais adequados para o lodo, respectivamente, na entrada e saída do secador de lodo. Enquanto a temperatura de secagem foi definida em 80°C, mas os ensaios não indicaram a vantagem sobre nenhuma temperatura dentro da faixa avaliada (60 a 104°C). Para o método de secagem do leito granular, o mesmo produziu um lodo de perfil menos grosseiro e com taxas de secagem de até 3,10 vezes maiores que o método convectivo. A modelagem alcançou a viabilidade termodinâmica para a integração do sistema heliotérmico quando os cenários 1 e 2 apresentaram, respectivamente, área espelhada de 3.848 e 3.345m², demanda térmica (com perdas globais do modelo) de 3,23 e 2,81GJ.tv⁻¹ e armazenamento térmico de 1.594 e 4.550kWh_t, demonstrando que o porte do sistema modelado é empregado comercialmente em vários países e que o cenário 2 é o mais interessante por indicar uma planta de menor porte. O modelo ainda mostrou que é possível produzir, naturalmente, água condensada para manter um ciclo de limpeza dos concentradores solares com periodicidade menor que 2 dias. Diante do exposto, conclui-se que a integração da secagem com a energia heliotérmica é viável do ponto de vista técnico e energético e ainda apresenta o benefício de produzir água para limpeza ou outros fins não potáveis, mitigando um dos principais impactos ambientais desta tecnologia e se tornando atraente em regiões de estresse hídrico. Também foi demonstrado que a técnica de mistura de lodo apresenta a capacidade de modificar as características morfológicas e reológicas do material, melhorando a permeabilidade e taxa de secagem, além de reduzir a plasticidade do lodo original. Por fim, comprova-se que o método de secagem do leito granular é capaz de produzir de forma atraente um biossólido granular, seco, possivelmente higienizado, e adequado para o uso em diversos processos produtivos.

Palavras-Chaves: Secagem térmica de lodo, Energia heliotérmica; biossólidos.

ABSTRACT

The development of an efficient and low-cost treatment for sanitary sludge meets the 6th UN objective that aims to and provide sanitation for the world population by the year 2030. In view of the above, this study evaluated, by means of a thermodynamic model, the drying of sanitary sludge at low temperature by the method of the granular bed, previously centrifuged, which was integrated into a heliothermic system with thermal storage. Scenario 1 was modeled with the dryer operating for 9h.d⁻¹ and scenario 2 for 24 h.d⁻¹ (continuous operation), and the same amount of sludge per day was processed in each scenario. Experimental assays were also conducted on the mixture of wet and thermally treated sludge to study the influence of the mixture on the drying process. The results showed that, in the conditions studied, the contents of 50 and 90% of total solids are the most suitable for sludge, respectively, in the inlet and outlet of the sludge dryer. While the drying temperature was defined at 80°C, as the tests did not indicate the advantage over any temperature within the range evaluated (60 to 104°C). The drying method of the granular bed, produced a less coarse profile sludge and with drying rates of up to 3.10 times higher than the convective method. The modeling achieved thermodynamic viability for the integration of the heliothermic system when scenarios 1 and 2 presented, respectively, a mirrored area of 3,848 and 3,345m², thermal demand (with global losses of the model) of 3.23 and 2.81GJ.t_v⁻¹ and thermal storage of 1,594 and 4,550kWh_t, demonstrating that the size of the modeled system is employed commercially in several countries and that scenario 2 is the most interesting for indicating a smaller plant. The model still showed that it is possible to produce condensed water naturally to maintain a cycle of cleaning the solar concentrators with periodicity less than 2 days. In view of the above, it is concluded that the integration of the drying with the heliothermic energy is feasible from a technical and energetic standpoint and still presents the benefit of producing water for cleaning or other non-potable purposes, mitigating one of the main impacts environment of this technology and becoming attractive in regions of water stress. It was also demonstrated that the sludge mixing technique can to modify the morphological and rheological characteristics of the material, improving the permeability and drying rate, in addition to reducing the plasticity of the original sludge. Finally, it is proved that the drying method of the granular bed is able to produce an attractive granular, dry, possibly sanitized biosolid, suitable for use in various production processes.

Keywords: Thermal drying of sludge, heliothermic energy; biosolids

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 22 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO | 25 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 25 |
| 1.3 OBJETIVOS | 26 |
| 1.3.1 Geral..... | 26 |
| 1.3.2 Específicos | 26 |
| CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 2.1 TRATAMENTO DE ESGOTO E DEMANDA DE ENERGIA | 27 |
| 2.2 LODO BIOLÓGICO | 28 |
| 2.2.1 Produção do lodo sanitário..... | 28 |
| 2.2.2 Composição do lodo sanitário..... | 30 |
| 2.2.3 Poder calorífico do lodo seco | 31 |
| 2.2.4 Calor específico do lodo seco | 32 |
| 2.2.5 Propriedades reológicas do lodo (propriedades mecânicas) | 33 |
| 2.2.6 Tipos de tratamento de lodo | 35 |
| 2.3 SECADORES MECÂNICOS DE LODO | 38 |
| 2.3.1 Métodos e princípios da secagem térmica de lodo | 39 |
| 2.3.2 Tipos de secadores mecânicos de lodo | 40 |
| 2.3.3 Secador de bandejas múltiplas | 41 |
| 2.3.4 Umidade de equilíbrio (UE)..... | 43 |
| 2.3.5 Característica plástica e recirculação de lodo..... | 44 |
| 2.4 ENERGIA HELIOTÉRMICA | 47 |
| 2.4.1 CSP cilindro parabólico..... | 50 |
| 2.4.2 Sistema de armazenamento de energia térmica..... | 51 |
| 2.4.3 Demanda de água para a limpeza dos CSP | 53 |
| 2.5 ENSAIO SOBRE O MÉTODO DO LEITO GRANULAR | 53 |
| 2.5.1 Associação entre a secagem em baixa temperatura e a energia solar | 55 |
| CAPITULO 3 – METODOLOGIA | 59 |
| 3.1 DELINEAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO | 59 |
| 3.2 DELINEAMENTO DO ESTUDO | 59 |
| 3.3 OBTENÇÃO DOS DADOS | 60 |
| 3.3.1 Dados climatológicos | 61 |
| 3.3.2 Dados coletados sobre o lodo centrifugado | 61 |
| 3.3.3 Caracterização do lodo | 61 |
| 3.3.3.1 Coleta e preparo das amostras | 63 |
| 3.3.3.2 Granulometria..... | 63 |
| 3.3.3.3 Estereomicroscopia | 64 |
| 3.3.3.4 Relações massa-volume | 65 |
| 3.3.3.5 Permeabilidade do lodo ao ar | 66 |
| 3.3.3.6 Tensão de adesão superficial | 67 |
| 3.3.3.7 Umidade residual e umidade de equilíbrio do lodo | 68 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 3.3.3.8 | Relação tempo-temperatura de secagem | 70 |
| 3.3.3.9 | Taxas de secagem no secador experimental | 70 |
| 3.3.3.10 | Comparação entre métodos de secagem | 78 |
| 3.4 | MODELO TERMODINÂMICO DE SECAGEM DE LODO | 79 |
| 3.4.1 | Submodelo do lodo úmido | 84 |
| 3.4.1.1 | Vazão mássica de lodo úmido | 84 |
| 3.4.1.2 | Vazão mássica de lodo seco | 85 |
| 3.4.1.3 | Vazão mássica de água líquida na entrada do modelo | 85 |
| 3.4.1.4 | Regenerador de calor 1 | 85 |
| 3.4.2 | Submodelo do ar de secagem | 88 |
| 3.4.2.1 | Propriedades do ar de referência | 89 |
| 3.4.2.2 | Propriedades do ar de secagem | 90 |
| 3.4.2.3 | Alteração das propriedades termodinâmicas do ar | 91 |
| 3.4.2.4 | Aquecimento do ar de secagem | 93 |
| 3.4.3 | Submodelo do sistema heliotérmico | 94 |
| 3.4.4 | Submodelo do lodo misturado | 96 |
| 3.4.4.1 | Balanco de massa do lodo misturado | 97 |
| 3.4.4.2 | <i>Balanco de energia do lodo misturado</i> | <i>98</i> |
| 3.4.5 | Submodelo do reator de secagem de lodo | 99 |
| 3.5 | ÍNDICES, INDICADORES, CENÁRIOS E CONDIÇÕES DO MTSL | 101 |
| 3.5.1 | Índice térmico do secador | 102 |
| 3.5.2 | Índice energético do secador | 103 |
| 3.5.3 | Indicadores do MTSL | 104 |
| 3.5.4 | Cenários modelados e condições do MTSL | 105 |
| | CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES | 106 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DO LODO | 106 |
| 4.1.1 | Coleta e preparo das amostras | 106 |
| 4.1.1.1 | Coleta e secagem inicial de parcela do lodo centrifugado | 106 |
| 4.1.1.2 | Destorroamento do lodo seco | 109 |
| 4.1.1.3 | Mistura de lodo destorroado e úmido | 109 |
| 4.1.2 | Caracterização morfológica dos lodos | 109 |
| 4.1.2.1 | Caracterização granulométrica | 109 |
| 4.1.2.2 | Caracterização estereomicroscópica | 113 |
| 4.1.2.3 | Caracterização das relações massa-volume | 117 |
| 4.1.2.4 | Permeabilidade do lodo ao ar | 118 |
| 4.1.3 | Tensão de adesão superficial | 119 |
| 4.1.4 | Umidade de equilíbrio (UE) e umidade residual do lodo (URL) | 121 |
| 4.1.5 | Relação tempo-temperatura de secagem | 123 |
| 4.1.6 | Taxas de secagem | 125 |
| 4.1.6.1 | Taxas de secagem no secador experimental | 125 |
| 4.1.6.2 | Comparação entre métodos de secagem | 127 |
| 4.1.7 | Definição dos teores de ST e temperatura operacional | 129 |
| 4.2 | RESULTADOS DA MODELAGEM | 131 |
| 4.2.1 | Caracterização e definição das condições de referência | 131 |

| | | |
|---------|--|------------|
| 4.2.1.1 | Caracterização da produção do lodo centrifugado | 131 |
| 4.2.1.2 | Caracterização climatológica do local estudado..... | 132 |
| 4.2.2 | Resultados do MTSL | 133 |
| 4.2.2.1 | Comportamento do lodo e ar de secagem no MTSL | 137 |
| | CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES | 140 |
| 5.1 | RECOMENDAÇÕES | 142 |
| | APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de st no lodo misturado..... | 143 |
| | APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de distribuição granulométrica | 145 |
| | APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de massas específicas | 148 |
| | APÊNDICE D – Resultados dos ensaios de umidade residual e de equilíbrio | 151 |
| | APÊNDICE E – Resultados dos ensaios de tempo-temperatura..... | 153 |
| | APÊNDICE F – Resultados dos ensaios no secador experimental | 154 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 161 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: rota da matéria orgânica nos tratamento de esgoto aeróbio e anaeróbio. | 29 |
| Figura 2: variação de volume e teores de sólidos totais e umidade do lodo..... | 34 |
| Figura 3: Relação entre a redução da umidade e do volume de lodo sanitário. | 35 |
| Figura 4: principais técnicas para diferentes níveis de tratamento do lodo e disposição final..... | 36 |
| Figura 5: secador de bandejas múltiplas (esquerda) e seu esquema de operação (direita)..... | 41 |
| Figura 6: secadores de bandejas múltiplas de contato indireto (esquerda) e direto (direita)..... | 42 |
| Figura 7: curva da umidade de equilíbrio em função da umidade ambiente..... | 43 |
| Figura 8: fluxo de lodo numa planta de secagem por tambor rotativo..... | 45 |
| Figura 9: taxas de secagem de dois tipos de lodo em função da recirculação de lodo seco..... | 46 |
| Figura 10: divisões e subdivisões dentro da energia solar. | 48 |
| Figura 11: forma de concentração de cada tipo de CSP..... | 48 |
| Figura 12: CSP cilindro parabólico da UNIFEI (A) e a sua representação didática (B)..... | 50 |
| Figura 13: comportamento de sistemas CSP com e sem TES em dois dias com distintas DNI..... | 52 |
| Figura 14: representação da secagem de lodo com base no processo de resfriamento evaporativo. | 55 |
| Figura 15: curva de umidade e pressão parcial do vapor d'água em função da temperatura..... | 57 |
| Figura 16: vista da ETE Mulembá I. | 59 |
| Figura 17: conjunto de peneiras com a base vibratória para o ensaio de granulometria..... | 64 |
| Figura 18: estereomicroscópio empregado na visualização dos grãos de lodo seco..... | 65 |
| Figura 19: aparato de permeabilidade pré-montado (esquerda) e leito do lodo (direita). | 66 |
| Figura 20: anemômetro utilizado na medição de vazão no ensaio de permeabilidade do lodo ao ar.... | 67 |
| Figura 21: máquina universal de ensaio durante a análise das TAS. | 68 |
| Figura 22: TGA que é utilizado para determinar as umidades e construir a curva de secagem dos lodos. | 69 |
| Figura 23: plataforma fabricada após a aplicação do zarcão (esquerda) e o acabamento (direita). | 70 |
| Figura 24: primeira (esquerda) e segunda (direita) camada do revestimento térmico. | 71 |
| Figura 25: indicação do ventilador (1), duto de expansão (2) e duto de aquecimento (3). | 71 |
| Figura 26: duto de aquecimento (esquerda) e um dos bancos de resistências (direita)..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27: quadro de disjuntores (esquerda) e <i>dimmers</i> na bancada de controle (direita). | 72 |
| Figura 28: <i>dampers</i> sendo montado na caixa de entrada (esquerda) e após a montagem (direita). | 73 |
| Figura 29: mangotes saindo do duto de aquecimento (esquerda) e entrando na caixa (direita). | 73 |
| Figura 30: endireitador de fluxo antes da montagem (esquerda) e a vista superior do mesmo a partir do local que ficará o leito de secagem (direita). | 74 |
| Figura 31: indicação da caixa de entrada (1) endireitador de fluxo (2) e leito de secagem (3). | 74 |
| Figura 32: suporte do leito de secagem (esquerda) e leito instalado sem lodo (direita). | 75 |
| Figura 33: leito de secagem antes (esquerda) e após a instalação no secador (direita). | 75 |
| Figura 34: leito de secagem em carregamento (esquerda) e em operação (direita). | 76 |
| Figura 35: indicação do trecho de saída do ar de secagem: peça de fechamento do leito (1), tronco de cone (2), endireitador de fluxo (3) e exaustor de tiragem (4). | 76 |
| Figura 36: croqui do secador de lodo experimental que foi desenvolvido no LEH da UNIFEI. | 77 |
| Figura 37: fluxograma ilustrativo das etapas previstas no MTSL. | 80 |
| Figura 38: etapas envolvidas no submodelo do lodo úmido. | 83 |
| Figura 39: etapas envolvidas no submodelo do lodo úmido. | 84 |
| Figura 40: etapas envolvidas no submodelo do ar de secagem. | 89 |
| Figura 41: etapas envolvidas no submodelo do sistema heliotérmico. | 95 |
| Figura 42: etapas envolvidas no submodelo do lodo misturado. | 97 |
| Figura 43 – etapas envolvidas no submodelo do reator de secagem. | 100 |
| Figura 44: início da secagem do lodo sobre chapa aquecida e a calha parabólica sob o leito. | 107 |
| Figura 45: liberação de vapor d'água e fumaça durante a secagem sobre chapa aquecida. | 107 |
| Figura 46: lodo de menor diâmetro revolvido e lodo aglomerado com maior diâmetro não revolvido. | 107 |
| Figura 47: lodo após 7 dias de secagem com a granulação grosseira e ausência de água livre. | 108 |
| Figura 48: lodo centrifugado no início da secagem em estufa (esquerda) e ao final (direita). | 108 |
| Figura 49: distribuição granulométrica do lodo centrifugado tratado por diferentes métodos. | 110 |
| Figura 50: lodo centrifugado com secagem em estufa (A) e no secador experimental (B). | 111 |
| Figura 51: distribuição granulométrica de todos os lodos submetidos a secagem neste estudo. | 112 |
| Figura 52: classificação das partículas e módulo de finura dos lodos submetidos a secagem. | 112 |

| | |
|--|-----|
| Figura 53: lodo tratado, respectivamente, destorroado (1), 70% (2), 80% (3) e 90% (4) de ST..... | 113 |
| Figura 54: lodo tratado, respectivamente, centrifugado (1), 20% (2) e 30% (3) de ST. | 114 |
| Figura 55: lodo tratado, respectivamente, 40% (1), 50% (2) e 60% (3) de ST. | 114 |
| Figura 56: indicação, no lodo seco centrifugado, do fio de cabelo vindo do interior do grão. | 114 |
| Figura 57 – indicação, no lodo destorroado, da ligação mecânica intergranular por fio de cabelo. ... | 114 |
| Figura 58: lodo com 50% de ST e a superfície úmida e recoberta de lodo centrifugado..... | 115 |
| Figura 59: lodo com 60% de ST apresentando fungos e recobrimento parcial de lodo centrifugado. | 115 |
| Figura 60: lodos úmidos com teores de 30% (1) e 20% (2) de ST com espessa camada de recobrimento. | 116 |
| Figura 61: indicação, no lodo centrifugado, dos pontos com fios de cabelo..... | 116 |
| Figura 62: massas específicas e índices de vazios dos lodos submetidos a secagem experimental. | 117 |
| Figura 63: distribuição das permeabilidades do lodo ao ar para diferentes pressões estáticas..... | 118 |
| Figura 64: resultado dos testes de adesão e a indicação do estado físico de cada amostra. | 120 |
| Figura 65: umidades residuais por tipo de lodo em função da temperatura de secagem. | 121 |
| Figura 66: taxas de secagem globais do lodo centrifugado processado no TGA. | 124 |
| Figura 67: decaimento de umidade dos lodos tratados no secador experimental à 80°C..... | 125 |
| Figura 68: taxas de secagem obtidas a 80°C no secador experimental. | 126 |
| Figura 69: taxas de secagem e decaimento de umidade no secador experimental à 80°C. | 127 |
| Figura 70: razão entre as taxas de secagem (RTS) obtidas a 80°C no secador experimental e TGA. | 128 |
| Figura 71: melhores taxas de secagem obtidas no secador experimental em comparação ao TGA. .. | 129 |
| Figura 72: fluxograma das etapas de produção de lodo na ETE Mulembá I. | 132 |
| Figura 73: perfil da DNI obtido pelo monitoramento da estação meteorológica A612 do INMET.... | 133 |
| Figura 74: comportamento do sistema heliotérmico no cenário 1 (9 horas de secagem)..... | 135 |
| Figura 75: comportamento do sistema heliotérmico no cenário 2 (secagem contínua). | 135 |
| Figura 76: comportamento do lodo ao longo das etapas do MTSL. | 137 |
| Figura 77: comportamento do ar de secagem ao longo das etapas do MTSL..... | 138 |
| Figura 78: comportamento dos fluxos que compoem o ar de secagem nas etapas do MTSL..... | 139 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: faixa de produção diária de lodo <i>per capita</i> em função do tipo de tratamento. | 29 |
| Tabela 2: composição elementar, em base seca, de diversos tipos de lodos sanitários..... | 30 |
| Tabela 3: poder calorífico do lodo e de outros resíduos..... | 31 |
| Tabela 4: caracterização das frações de água no lodo e os métodos de separação..... | 34 |
| Tabela 5: comparação entre as tecnologias de tratamento de lodo com higienização. | 36 |
| Tabela 6: enquadramento do lodo para uso agrícola (classe A). | 37 |
| Tabela 7: comparação entre as tecnologias de higienização no aspecto da instalação e operação. | 37 |
| Tabela 8: classificação dos secadores mecânicos pelo método utilizado..... | 39 |
| Tabela 9: tipos de secadores mecânicos mais empregados na área de saneamento. | 40 |
| Tabela 10: características operacionais e estado da arte de CSP cilindro parabólico. | 51 |
| Tabela 11: capacidade de absorção de vapor d'água no ar seco ao nível do mar para uma vazão de $1\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ | 56 |
| Tabela 12: composição e frações molares dos componentes do ar seco | 90 |
| Tabela 13: componentes, ordens e constantes empregadas na Equação 25. | 90 |
| Tabela 14: teores médios de ST e os desvios padrões das misturas de lodos..... | 109 |
| Tabela 15: correlações (R^2) entre as temperaturas com os teores de ST e com as URL. | 122 |
| Tabela 16: resultados de UE de lodo seco armazenado em saco plástico e lodo exposto ao tempo. ... | 123 |
| Tabela 17: capacidades de projeto da ETE Mulembá I..... | 131 |
| Tabela 18: produção de lodo na ETE Mulembá I na condição de projeto. | 132 |
| Tabela 19: balanço térmico da produção, consumo e armazenamento de energia no MTSL. | 134 |
| Tabela 20: indicadores do MTSL..... | 136 |
| Tabela 21: teores médios e desvio padrão das misturas de lodos neste trabalho | 143 |
| Tabela 22: distribuição granulométrica dos lodos destorroado e não destorroado..... | 145 |
| Tabela 23: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 90 e 80% de ST..... | 145 |
| Tabela 24: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 70 e 60% de ST..... | 146 |
| Tabela 25: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 50 e 40% de ST..... | 146 |
| Tabela 26: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 30 e 20% de ST..... | 147 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 27: distribuição granulométrica do lodo centrifugado tratado..... | 147 |
| Tabela 28: massa específica aparente (MEA) dos lodos úmidos. | 148 |
| Tabela 29: massa específica real (MER) dos lodos úmidos. | 149 |
| Tabela 30: massa específica aparente (MEA) dos lodos secos no secador experimental. | 149 |
| Tabela 31: massa específica real (MER) dos lodos secos no secador experimental. | 150 |
| Tabela 32: resultados dos ensaios de URL que foram realizados a 90 e 80°C. | 151 |
| Tabela 33: resultados dos ensaios de URL que foram realizados a 90 e 80°C. | 152 |
| Tabela 34: resultados de umidade e tempo de secagem do lodo centrifugado no TGA..... | 153 |
| Tabela 35: resultados de umidade e tempo de secagem do lodo centrifugado no TGA..... | 154 |
| Tabela 36: resultados de umidade no momento de 0,5 e 1,0 horas no secador experimental. | 156 |
| Tabela 37: resultados de umidade no momento de 1,5 e 2,0 horas no secador experimental. | 157 |
| Tabela 38: resultados de umidade no momento de 2,5 a 3,5 horas no secador experimental. | 158 |
| Tabela 39: resultados de umidade no momento de 4,0 a 5,0 horas no secador experimental. | 159 |
| Tabela 40: resultados de umidade no momento de 6,0 a 12,0 horas no secador experimental. | 160 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AES | Área espelhada para a secagem |
| CAPEX | <i>Capital Expenditure</i> |
| CESAN | Companhia Espírito Santense de Saneamento |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CSP | <i>Concentrating solar Power</i> |
| DAS | Demanda de ar para a secagem |
| DNI | <i>Direct normal irradiation</i> |
| DSC | <i>Differential Scanning Calorimeter</i> |
| DTH | Demanda térmica heliotérmica |
| DVS | Demanda de ventilação para a secagem |
| DTS | Demanda térmica do secador |
| ETE | Estação de tratamento de esgoto |
| FC | Fator de concentração |
| FTS | Fluxo térmico de secagem |
| HTF | <i>Heat transfer fluid</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IES | Índice energético do secador |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IRN | Instituto de Recursos Naturais |
| ITS | Índice térmico do secador |
| IV | Índice de vazios |
| LA | Lodo Ativado |
| LCGC | Laboratório de caracterização de gases combustíveis |
| LEH | Laboratório de Energia heliotérmica |
| MEA | Massa específica aparente |
| MER | Massa específica real |
| MF | Módulo de finura |
| MTSL | Modelo termodinâmico de secagem de lodo |
| NEST | Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída |
| NMP | Número mais provável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| OPEX | <i>Operational Expenditure</i> |

| | |
|---------------|---|
| PAS | Purga de ar de secagem |
| PC | Poder calorífico |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| PCS | Poder calorífico superior |
| PROCEL-SANEAR | Programa de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental |
| RAS | Relação água-superfície |
| RC | Regenerador de calor |
| RRA | Razão de renovação de ar |
| RTS | Razão entre as taxas de secagem |
| SANEPAR | Companhia de Saneamento do Paraná |
| SEGS | <i>Solar Electric Generating System</i> |
| ST | Sólidos totais |
| TAS | Tensão de adesão superficial |
| TC | Trocador de calor |
| TES | <i>Thermal Energy Storage</i> |
| TGA | Analisador termogravimétrico |
| UASB | <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> |
| UE | Umidade de equilíbrio |
| UFP | Unidade de formação de placa |
| UR | Umidade relativa |
| URL | Umidade residual do lodo |
| VBA | <i>Virtual Basic for Applications</i> |

LISTA DE SIMBOLOS

| SIMBOLO | DESCRIÇÃO | UNIDADE |
|-----------------------------------|--|---------------------------------------|
| γ | Massa específica aparente | kg/m ³ |
| ρ | Massa específica real | kg/m ³ |
| μ | Viscosidade absoluta do ar na temp. de trabalho | Pa.s |
| ω_0 | Umidade absoluta do ar no estado 0 | kg _v /kg _{arseco} |
| η_{is} | Eficiência isentrópica para ventiladores | - |
| $\psi_{T_{104}}$ | Umidade na temperatura de 104°C | % |
| ψ_{T_x} | Umidade na temperatura x | % |
| \emptyset | Umidade relativa | % |
| ε | Eficiência do CSP cilindro parabólico | % |
| ε_{reg} | Efetividade no regenerador 1 | - |
| $\Delta h_{Ar5,6'}$ | Variação de entalpia do ar entre o estado 5 e 6' | kJ/kg |
| $\Delta h_{Ar10,11}$ | Variação de entalpia do ar entre o estado 10 e 11 | kJ/s |
| $\Delta H_{Ar10,11}$ | Demanda térmica do ar entre os estados 10 e 11 | kWh _t |
| $\Delta h_{L0,1'_{\acute{a}gua}}$ | Variação de entalpia da água entre o estado 0 e 1' do lodo | kJ/kg |
| $\Delta h_{L0,1'_{seco}}$ | Variação de entalpia do lodo seco entre o estado 0 e 1' | kJ/kg |
| $\Delta h_{L1'_{\acute{a}gua}}$ | Variação de entalpia da água entre o estado 0 e 1' do lodo | kJ/kg |
| ΔH_{TES} | Variação de energia no TES | kWh _t |
| ΔP | Variação de pressão estática aplicada no leito | Pa |
| ΔP_p | Variação de pressão estática no teste de permeabilidade | Pa |
| $\Delta p_{f1,2}$ | Variação de pressão do ar entre o estado 1 e 2 | bar |
| $\Delta p_{f5,6}$ | Variação de pressão do ar entre o estado 5 e 6 | bar |
| $\Delta p_{f6,7}$ | Variação de pressão do ar entre o estado 6 e 7 | bar |
| $\Delta p_{f8,9}$ | Variação de pressão do ar entre o estado 8 e 9 | bar |
| $\Delta T_{Ar5,6'}$ | Variação de temperatura do ar entre o estado 5 e 6' | °C |
| $\Delta T_{L0,1'}$ | Variação de temperatura do lodo entre o estado 0 e 1' | °C |
| $\sum_0^{23} \Delta H_{TES}$ | Somatória, em 24 horas, dos fluxos de energia no TES | kWh _t |
| A | Área superficial da chapa plana | m ² |
| A_{CSP} | Área espelhada do campo solar | m ² |
| A_{TES} | Autonomia do TES | horas |
| c | Carga de lodo úmido produzido na ETE Mulembá | kg/d |
| C | Carbono elementar | % |

| | | |
|-----------------------------|--|---|
| \bar{C}_{Ar5} | Capacidade térmica média do ar no estado 5 | $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$ |
| \bar{C}_{L0} | Capacidade térmica média do lodo úmido no estado 0 | $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$ |
| $C_{min_{reg1}}$ | Menor capacidade térmica entre os fluxos no RC 1 | $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$ |
| $Cp_{Lodo\ seco}$ | Calor específico | $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| C_{TES} | Capacidade térmica do TES | kWh_t |
| dx_{SE} | Taxa de secagem no secador experimental | $\%/h$ |
| dx_{TGA} | Taxa de secagem no TGA | $\%/h$ |
| DNI | Irradiação solar direta | kWh_v/m^2 |
| $f_{1,2}$ | Perda de carga do ar entre o estado 1 e 2 | $\%$ |
| H | Hidrogênio elementar | $\%$ |
| h | Período de horas de secagem ao dia | h/d |
| $h_{\acute{a}gua_{TL2}}$ | Entalpia da água na temperatura do lodo no estado 2 | kJ/kg |
| H_{Ar1} | Fluxo de energia do ar no estado 1 | kJ/s |
| h_{Ar1} | Entalpia específica do ar no estado 1 | kJ/kg |
| h_{Ar2} | Entalpia específica do ar no estado 2 | kJ/kg |
| H_{L1} | Fluxo de energia do lodo úmido no estado 1 | kJ/s |
| \dot{H}_{L2} | Fluxo de energia do lodo no estado 2 | kJ/s |
| $h_{L1\acute{a}gua}$ | Entalpia específica da água presente no lodo no estado 1 | kJ/kg |
| h_{L1seco} | Entalpia específica do lodo seco no estado 1 | kJ/kg |
| $h_{L4\acute{a}gua}$ | Entalpia específica da água presente no lodo no estado 4 | kJ/kg |
| h_{L4seco} | Entalpia específica do lodo seco no estado 4 | kJ/kg |
| $h_{vap_{TL2}}$ | Entalpia de vaporização na temp. do lodo no estado 2 | kJ/kg |
| $h_{v_{TAr2}}$ | Entalpia do vapor na temperatura do ar no estado 2 | kJ/kg |
| $h_{v_{TL2}}$ | Entalpia do vapor na temperatura do lodo no estado 2 | kJ/kg |
| $H_{W\ eva}$ | Fluxo de energia para a vaporização da água no secador | kJ/s |
| IV | Índice de vazios | $\%$ |
| k | Permeabilidade do leito de lodo | m^2 |
| k_{IS} | Constante isentrópica do ar no estado 10 | - |
| L | Altura do leito | m |
| M_x | Massa molar do componente x na mistura | kg/kmol |
| $\dot{m}_{Ar0\acute{a}gua}$ | Vazão mássica de água presente no ar no estado 0 | kg/s |
| \dot{m}_{Ar1} | Vazão mássica do ar no estado 1 | kg/s |
| \dot{m}_{Ar4} | Vazão mássica do ar no estado 4 | kg/s |

| | | |
|-------------------------------|---|-------------------|
| \dot{m}_{Ar5} | Vazão mássica do ar de purga no estado 5 | kg/s |
| $\dot{m}_{Ar5_{\text{água}}}$ | Vazão mássica de água presente no ar no estado 5 | kg/s |
| $\dot{m}_{Ar5_{\text{seco}}}$ | Vazão mássica de ar seco no estado 5 | kg/s |
| \dot{m}_{Ar_9} | Vazão mássica do ar no estado 9 | kg/s |
| $\dot{m}_{Ar_{10}}$ | Vazão mássica do ar no estado 10 | kg/s |
| \dot{m}_{L0} | Vazão mássica de lodo úmido na entrada do MTSL | kg/s |
| $\dot{m}_{L0_{\text{água}}}$ | Vazão mássica de água presente no lodo úmido | kg/s |
| $\dot{m}_{L0_{\text{seco}}}$ | Vazão mássica de lodo seco na entrada do MTSL | kg/s |
| \dot{m}_{L2} | Vazão mássica do lodo misturado no estado 2 | kg/s |
| $\dot{m}_{L2_{\text{água}}}$ | Vazão mássica de água presente no lodo no estado 2 | kg/s |
| $\dot{m}_{L2_{\text{seco}}}$ | Vazão mássica de lodo seco no estado 2 | kg/s |
| \dot{m}_{L4} | Vazão mássica do lodo misturado no estado 4 | kg/s |
| m_{lodo} | Massa do lodo adicionada na vidraria de MEA | g |
| $\dot{m}_{W_{\text{eva}}}$ | Vazão mássica de água evaporada no reator de secagem | kg/s |
| MF | Módulo de finura | - |
| N | Nitrogênio elementar | % |
| N ₂ | Nitrogênio molecular | - |
| O | Oxigênio elementar | % |
| p_0 | Pressão absoluta de referência | bar |
| p_1 | Pressão absoluta do ar no estado 1 | bar |
| p_2 | Pressão absoluta do ar no estado 2 | bar |
| p_3 | Pressão absoluta do ar no estado 3 | bar |
| p_8 | Pressão absoluta do ar no estado 8 | bar |
| p_{11} | Pressão absoluta do ar no estado 11 | bar |
| p_g | Pressão de saturação de vapor d'água na temperatura T | bar |
| p | Pressão absoluta na mistura na temperatura T | bar |
| p_{pp} | Percentuais acumulados nas peneiras padronizadas | % |
| Q | Vazão volumétrica do ar a 20°C e 1,013bar | m ³ /s |
| \dot{Q}_{L0-Ar5} | Troca de calor entre o lodo (estado 0) e ar (estado 5) | kJ/s |
| $\dot{Q}_{max_{L0-Ar5}}$ | Máxima troca de calor entre lodo (estado 0) e ar (estado 5) | kJ/s |
| RTS | Razão entre as taxas de secagem | - |
| S | Enxofre elementar | % |
| T_{Ar0} | Temperatura de referência do ar | °C |

| | | |
|--------------------|---|----|
| T_{Ar1} | Temperatura do ar no estado 1 | °C |
| T_{Ar2} | Temperatura do ar no estado 2 | °C |
| T_{Ar5} | Temperatura do ar de purga no estado 5 | °C |
| T_{Ar11} | Temperatura do ar de secagem no estado 11 | °C |
| TAS | Tensão de adesão superficial | Pa |
| T_{IS1} | Temperatura isentrópica do ar na descarga do ventilador 1 | °C |
| T_L | Temperatura do lodo seco | °C |
| T_{L0} | Temperatura do lodo úmido no estado 0 | °C |
| T_{L1} | Temperatura do lodo úmido no estado 1 | °C |
| T_{L2} | Temperatura do lodo no estado 2 | °C |
| T_{max} | Máxima tensão registrada | N |
| URL | Umidade residual do lodo | % |
| $V_{\gamma-lodo}$ | Volume da vidraria utilizada para MEA | mL |
| $V_{\rho-lodo}$ | Volume real do lodo | mL |
| V_{frasco} | Volume da vidraria utilizada para MER | mL |
| $V_{\acute{a}gua}$ | Volume de água adicionado na vidraria da MER | mL |
| X_{L0} | Teor de ST no lodo úmido na entrada do MTSL | % |
| X_{L2} | Teor de ST desejado no lodo misturado no estado 2 | % |
| X_{L3} | Teor de ST no lodo tratado no estado 3 | % |
| X_{L4} | Teor de ST no lodo recirculado no estado 4 | % |
| y_v | Fração molar do vapor d'água presente no ar | % |
| y'_x | Fração molar corrigida do componente x no ar úmido | % |
| y_x | Fração molar do componente x no ar seco | % |

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A qualidade de vida da população deve ser sustentada por serviços básicos que garantam o completo bem estar físico, mental e social dos seus indivíduos, sendo esse o conceito moderno de saúde. Entre estes serviços se encontra o saneamento básico que é formado por cinco diretrizes, que são: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, drenagem e manejo de águas pluviais, limpeza e manejo de resíduos sólidos urbanos e, considerada como uma nova diretriz, controle de vetores. Todas elas visam proteger a saúde da população.

A falta de infraestrutura de saneamento básico no mundo é tão preocupante que a Organização das Nações Unidas (ONU) coloca como o seu 6º objetivo, entre dezessete, a ação de assegurar a disponibilidade de água potável e demais infraestruturas do saneamento básico para toda a população até o ano de 2030. No entanto, a própria ONU (2017) relata que a conclusão deste objetivo ainda demandará um grande trabalho, pois 6 em cada 10 pessoas no mundo não tem acesso a saneamento seguro (4,5 bilhões) e dos quais 3 em cada 10 não tem acesso à água potável nas suas residências (2,1 bilhões). Entre os últimos, 263 milhões de pessoas precisam se deslocar por mais de meia hora a cada viagem realizada para coletar água de fontes externas a sua moradia, o que totaliza 159 milhões de pessoas que ainda fazem uso de água não potável proveniente de coleta direta em corpos hídricos superficiais.

Os dados sobre o esgotamento sanitário são ainda mais alarmantes, pois 2,5 bilhões de pessoas não têm acesso a banheiros, realizando as suas necessidades básicas em latrinas ao ar livre de acordo com a ONU (2016a).

No Brasil as proporções não mudam muito. Para um país constituído por 208.219.000 habitantes, de acordo com a projeção estatística do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), 40% da população brasileira não tem acesso adequado à água e 60% não tem esgotamento sanitário (ONU, 2016b), sendo que a falta de acesso para o esgotamento significa que não existe a infraestrutura de coleta e nem afastamento do esgoto, tão pouco o tratamento. Portanto, os 40% com cobertura de esgotamento sanitário não necessariamente são atendidos com a etapa de tratamento.

A população vulnerável pelo saneamento que foi apontada pela ONU (2017), em comparação a população total do Brasil, tornam mais clara a magnitude deste problema. Ao se aprofundar na perplexidade do tema, observa-se que o grupo mais vulnerável pela falta de acesso a saneamento seguro são as crianças. Estima-se que 361 mil crianças, menores de 5 anos, morrem de diarreia por ano no mundo (ONU, 2017).

A mortalidade de crianças menores que 5 anos representa uma taxa de quase 1.000 crianças ao dia, considerando apenas a diarreia que é uma morbidade de fácil tratamento para a medicina do século XXI. Tal dado mostra a urgência de maiores investimentos para o tratamento de esgotos, de forma a reduzir os impactos ambientais e sociais em relação à água.

Diversas tecnologias para o tratamento do esgoto estão consolidadas e disponíveis comercialmente, mas a implantação de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) ainda esbarra em questões de ordem econômica. As discussões sobre a implantação da infraestrutura de tratamento envolvem os custos operacionais e o problema da destinação adequada do lodo gerado, pois são estes problemas que, em longo prazo, se tornam mais significativos para as companhias de saneamento que os próprios valores de implantação do projeto.

Aprofundando nos custos operacionais, os principais incidem sobre a mão de obra, energia elétrica e lodo. O último, segundo Jordão e Pessoa (1995), torna-se um desafio maior a cada ano para a área de saneamento, pois a destinação do lodo é um dos principais problemas dentro da logística do esgotamento sanitário que é formada pela coleta, afastamento, tratamento e disposição final do esgoto e lodo gerado. Ainda que tenha transcorrido mais de duas décadas, o problema citado pelos autores, que são de grande renome no saneamento brasileiro, continua presente nas sociedades ao redor do mundo, conforme é indicado por Mawioo et al. (2017), Bianchini et al. (2015), Metcalf e Eddy (2016).

O uso do lodo de esgoto no Brasil se tornou um assunto ainda mais importante a partir do ano de 2014, quando a Lei de nº 12.305, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos, reforçou a restrição ao envio para os aterros sanitários de apenas os resíduos finais e sem viabilidade econômica para o reuso ou reciclagem. Entretanto, o lodo produzido em estações de tratamento não se enquadra perfeitamente como resíduo final, principalmente de esgoto sanitário, pois apresenta grande potencial de uso na agricultura, incremento no solo para aterros, obtenção de energia térmica e elétrica, entre outras possibilidades, desde que o lodo seja tratado adequadamente para cada uso previsto.

O uso mais comum do lodo sanitário, quando tratado, é a agricultura (DIENER et al., 2014). Mas o lodo seco é um promissor biocombustível sólido, pois é possível obter boas características energéticas se o lodo for processado adequadamente, somado a possibilidade de ser empregado como matéria prima para a produção de bio-óleos e gás combustível nos processos termoquímicos de pirólise e gaseificação (BIANCHINI et al., 2015; DIENER et al., 2014; LÉONARD et al. 2008; MAWIOO et al., 2017; TAŃCZUK et al., 2016).

Todos os usos citados são considerados possíveis e plausíveis, entretanto, para obter o lodo nas condições adequadas para essas finalidades, consideradas nobres, é necessário realizar tratamentos específicos. Para Zhu et al. (2012), a secagem térmica de lodo é um método maduro e que gera a valorização do material, mas o seu elevado consumo de energia, em comparação aos demais métodos, o torna restrito a poucas aplicações. Como exemplo do seu consumo, segundo Haandel e Marais (1999), são demandados, por metro cúbico de lodo tratado, o consumo médio de energia de 3,6 kJ para adensamento, $3,6 \times 10^3$ kJ para a centrifugação e $3,6 \times 10^6$ kJ para o tratamento térmico por vaporização.

Apesar dos últimos autores realizarem a comparação entre processos que demandam energias em formas diferentes, energia elétrica nos dois primeiros e térmica no último, a diferença ainda é muito significativa. Apesar do baixo consumo de energia para os métodos mecânicos de desaguamento, segundo Bianchini et al. (2015), eles não solucionam o grande problema de volume e risco biológico, pois o lodo desaguado não é higienizado e ainda contém de 70 a 90% da massa em água, inviabilizando o aproveitamento energético ou agrícola.

Existem outros processos de tratamento que envolve menores custos e ainda alcançam a higienização e redução de volume. Entretanto, os mesmos esbarram no problema de escala, pois são processos que demandam grandes áreas e longos tempos de tratamento, além das características heterogêneas de cada lote gerado. Por exemplo, Mawioo et al. (2017) relatam que os tratamentos de lodo por biodigestão e compostagem, em muitos casos, não apresentam viabilidade por serem processos lentos, contexto também abordado por Collard et al. (2017) quando avalia que os leitos de secagem podem não ter viabilidade para o manejo de elevadas produções de lodo, demandando um processo com maior velocidade de tratamento.

Desta forma, fica nítida a necessidade de buscar uma solução eficiente e eficaz para a secagem e higienização do lodo e que caminhe ao encontro dos princípios da sustentabilidade, abrangendo soluções viáveis economicamente, corretas ecologicamente e justas socialmente.

Portanto, a presente pesquisa busca verificar a viabilidade termodinâmica no acoplamento de um sistema heliotérmico com a secagem de lodo sanitário, em baixa temperatura (inferior aos 100°C), pelo método do leito granular. Os resultados desta pesquisa se voltam para as práticas de gerenciamento de lodo, pois este resíduo tem por características uma elevada quantidade de água, patógenos e nutrientes, tornando importante e necessário o seu tratamento para evitar a disseminação de doenças de veiculação hídrica que são responsáveis pela morte de milhões de pessoas ao ano, além de facilitar o seu aproveitamento como combustível ou, em último

caso, o simples retorno do material ao solo via a agricultura, garantindo a continuidade do ciclo dos nutrientes na natureza e não o seu confinamento em aterros sanitários.

Este trabalho ainda busca abordar o tema de secagem de lodo de maneira inter e transdisciplinar, por meio do diálogo entre disciplinas específicas da ciência e integrando os saberes dos profissionais da área de saneamento e engenharia de energia, superando, assim, os limites das abordagens unidisciplinares e reducionistas de uma mesma área do conhecimento.

1.1 MOTIVAÇÃO

Apesar de a energia solar ser considerada uma fonte intermitente e não apresentar uma cinética de secagem regular para o lodo, a mesma é considerada como uma grande oportunidade para viabilizar a secagem, pois pode reduzir os custos energéticos do processo e ainda conseguir boas reduções de patógenos e volume (BENNAMOUN, 2012).

Nítidos resultados que comprovam a ideia descrita podem ser observados a partir do estudo que foi realizado, de secagem em baixa temperatura, numa estufa solar por Bux et al. (2002), os quais obtiveram um consumo de energia que representa 28% de um secador mecânico, valores de referência que também são condizentes com Reyes et al. (2014) e Van Haandel (2009). Por este motivo, segundo Bennamoun et al. (2013), é que as tecnologias de secagem vêm sendo direcionadas na incorporação da energia solar como fonte energética primária.

Entre as formas de aproveitar a energia solar, destaca-se a energia heliotérmica e, dentro desta, as tecnologias dos concentradores de energia solar ou *Concentrating solar Power* (CSP). Tal tecnologia obtém a energia de forma diferenciada, pois os CSP aumentam o fluxo de radiação solar em determinada área, possibilitando a produção de energia térmica renovável, de alta qualidade e que pode substituir os tradicionais combustíveis empregados nos secadores mecânicos convencionais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do exposto, nota-se que é de interesse, do setor de saneamento e da sociedade, que a comunidade científica estude a integração da secagem térmica de lodo com a energia heliotérmica para o desenvolvimento de uma tecnologia que apresente baixo custo de operação e, ainda assim, mantenha as típicas vantagens de estabilidade, segurança e alta taxa de secagem dos equipamentos convencionais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Avaliar termodinamicamente a integração da energia heliotérmica para a secagem em baixa temperatura de lodo sanitário pelo método do leito granular.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar quali-quantitativamente o lodo sanitário estudado;
- Desenvolver um secador experimental para realizar o tratamento térmico de lodo sanitário, em baixa temperatura, pelo método do leito granular;
- Definir a temperatura de secagem e o teor de sólidos totais que o lodo úmido e lodo tratado devem apresentar para o método de secagem proposto;
- Comparar as taxas de secagem entre o método do leito granular e método convectivo;
- Desenvolver um modelo termodinâmico para a secagem de lodo com termoacumulação de energia e recirculação do fluido de secagem, além de regeneração de calor e umidade;
- Avaliar o processo de secagem com base nos indicadores descritos na literatura e desenvolver novos indicadores que correlacionem a secagem de lodo com o sistema heliotérmico;
- Avaliar o consumo energético deste sistema em comparação aos secadores mecânicos convencionais.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRATAMENTO DE ESGOTO E DEMANDA DE ENERGIA

O processo de tratamento de esgoto objetiva, minimamente, a remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica que se fazem presentes no líquido, sendo essas parcelas, juntamente com a biomassa microbiana formada durante o processo de tratamento, as que compõem o lodo (JORDÃO, PESSOA, 2011; NUVOLARI, 2011).

Os sistemas de tratamento de esgoto são grandes consumidores de energia tanto de forma direta, para a operação de equipamentos eletromecânicos e sistemas de secagem, quanto indireta, na energia incorporada para a produção e transporte de insumos químicos para o processo de tratamento (LONGO et al., 2016). De acordo com o Programa de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental (PROCEL-SANEAR, 2005), estima-se que 2,5% do consumo total de energia elétrica do Brasil, aproximadamente 10,4 bilhões de kWh.ano⁻¹, é consumido por prestadores de saneamento. Valor condizente com Gomes (2009) que relata que os sistemas de saneamento são responsáveis por, aproximadamente, 3% da energia consumida no mundo.

Tal realidade demanda o desvio de significativa parcela dos recursos financeiros arrecadados na prestação dos serviços de saneamento para custear esse insumo e garantir a continuidade da operação dos seus sistemas, tornando a energia a segunda parcela das despesas, ficando atrás apenas dos custos com a mão de obra (PROCEL-SANEAR, 2005; PROCEL, 2011).

Dentre as principais tecnologias implantadas para o tratamento dos esgotos sanitários, o sistema de Lodo Ativado é considerado como grande produtor de lodo e consumidor de energia para a operação (VON SPERLING, 2014; LONGO et al., 2016). Em relação ao lodo, o mesmo pode ser tratado em diversas etapas e com diferentes tecnologias, sendo as mais relevantes o adensamento para o aumento da concentração de sólidos; a biodigestão para a remoção de parcela da matéria orgânica e; desaguamento para que o lodo alcance elevados teores de matéria seca em comparação as fases anteriores.

O lodo sanitário é um problema atual e que desafia os métodos de gerenciamento e tratamento dentro das cidades densamente habitadas, gerando grande potencial de poluição e elevado consumo de energia para o seu tratamento (ARLABOSSE *et al.*, 2005; MAWIOO et al., 2017; LUBOSCHIK, 1999). Diante das pressões ambientais e sociais, o uso agrícola e energético do lodo vem sendo estudado e estimulado ao redor do mundo como tentativa de solucionar o problema, mas por questões de ordem sanitária, ambiental e técnica o material

continua necessitando de tratamentos específicos para essa finalidade (CHERNICHARO et al., 2009; COLLARD et al., 2017; CORRÊA et al., 2005).

Dentre os tratamentos específicos é destacada a secagem térmica do lodo, tratamento que reduz o volume e alcança a higienização, reduzindo os custos e riscos durante o transporte e manuseio, além de tornar o material apto para usos nobres como a obtenção de energia por processos de combustão, pirólise e gaseificação, além do típico emprego na agricultura que garante estabilidade ao solo e retorno dos nutrientes ao ciclo natural do meio ambiente (WENG et al., 2015; FERREIRA et al., 2003; LI et al., 2013). Mas, para Tańczuk et al. (2016), a secagem térmica ainda deve buscar melhores resultados de eficiência energética para ser empregada com maior intensidade, pois elevados custos decorrentes da sua elevada demanda de energia ainda é característica deste processo.

2.2 LODO BIOLÓGICO

2.2.1 Produção do lodo sanitário

O lodo sanitário é o principal resíduo gerado pelo tratamento de esgoto de origem doméstica, tornando a sua composição variada em função da qualidade do esgoto bruto, metabolismo e crescimento dos microorganismos, além da tecnologia utilizada. Tais critérios também permitem a classificação dos lodos como primários, secundários e terciários, sendo que no lodo de origem sanitária é inevitável a presença de diversos tipos de bactérias, vírus e protozoários que podem desencadear doenças de veiculação hídrica (LOBATO, 2011; EPA, 2003; LIANG; DAS; MCCLENDON, 2003; LUBOSCHIK, 1999).

Segundo van Haandel (2009), as taxas de produção de lodo nos processos aeróbios são maiores em comparação aos processos anaeróbios, tendo como a principal causa a diferenciação expressiva do anabolismo encontrado no processo aeróbio. Pode ser observado na Figura 1 que os processos aeróbios podem incorporar ao lodo até 40% da matéria orgânica presente no esgoto bruto e representam a maior parte não digerida, enquanto nos processos anaeróbios esse valor não ultrapassa 25%, correspondendo a, aproximadamente, 62% da produção aeróbia, além de apresentar uma maior estabilidade sobre a matéria orgânica.

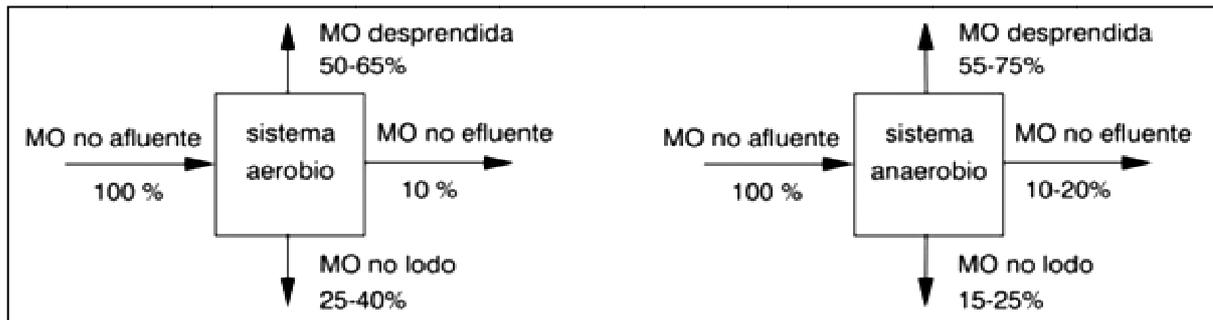


Figura 1: rota da matéria orgânica nos tratamento de esgoto aeróbio e anaeróbio.
Fonte: adaptado de van Haandel, 2009.

Apesar da característica de maior produção nos processos aeróbios em relação aos anaeróbios, ainda existe uma gama de produtividades de lodo em função da tecnologia empregada, sendo apresentadas na Tabela 1 algumas produções com base *per capita* por dia.

Tabela 1: faixa de produção diária de lodo *per capita* em função do tipo de tratamento.

| ORIGEM DO LODO | PRODUÇÃO DE LODO (g SS/hab.d) |
|---|----------------------------------|
| Tratamento primário (tanque séptico) | 20-30 |
| Tratamento primário convencional | 35-45 |
| Lagoa Facultativa | 12-32 |
| Lagoa anaeróbia + facultativa | 26-55 |
| Reator UASB | 12-18 |
| UASB + Lodo ativado | 20-32 |
| Lodo Ativado Convencional | 60-80 |
| Lodo Ativado Aeração Prolongada | 40-45 |
| Lodo Ativado Convencional com Filtração terciária | 65-85 |

Fonte: Von Sperling, 2014.

Tomando como base a população brasileira de 208.219.000 habitantes, de acordo com a projeção estatística do IBGE (2017), além do valor mínimo de produção de lodo sanitário do sistema de tratamento de esgoto do tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), que foi apresentado na Tabela 1 e é um sistema com grande aplicação no Brasil e considerado de baixa produção de lodo, estima-se que a produção média de lodo, se todos os brasileiros fossem atendidos com tratamento de esgoto sanitário, seria de 2.499 toneladas de lodo por dia (em base seca).

Usualmente o lodo é produzido, após as etapas de desaguamento, com valores médios de 20% de sólidos totais (ST) ou 80% de umidade em base úmida, isso resultaria numa produção real de 12.495 toneladas de lodo ao dia no Brasil. Esse valor é superior às exportações brasileiras diárias de óleo de soja bruto (5.500 toneladas), carne bovina *in natura* (5.700 toneladas), alumínio (1.200 toneladas) e óleos combustíveis (8.700 toneladas) (BRASIL, 2017). Tal comparação demonstra como a produção de lodo é um ponto relevante dentro do atual cenário de crescimento populacional e maior rigor da legislação ambiental vigente.

2.2.2 Composição do lodo sanitário

Lodos formados em ETE por via aeróbia apresentam na sua composição grande diversidade de microrganismos e parcela significativa de matéria orgânica ainda não biodegradada. No aspecto do desaguamento, os lodos provenientes de sistemas aeróbios são mais difíceis de serem desaguados quando comparados aos lodos, por exemplo, de decantadores primários que apresentam elevada eficiência na retirada de água em virtude de sua natureza fibrosa e grosseira (HAMMER, 1979).

No aspecto nutriente, os lodos apresentam quantidades adequadas para o uso agrícola e apreciável teor de carbono na sua composição elementar para uso como biocombustível. A Tabela 2 apresenta a composição química elementar de lodos gerados em diferentes processos de tratamento.

Tabela 2: composição elementar, em base seca, de diversos tipos de lodos sanitários.

| LODO | ELEMENTOS (%) | | | | | REFERÊNCIA | |
|--|---------------|-----|------|-----|-----|-----------------------|--------------------|
| | C | H | O | N | S | | |
| LA s/ secagem | 35,3 | 4,4 | 54,3 | 6,0 | NA | Collard et al. (2017) | |
| LA c/ secagem em 85°C | 36,2 | 5,5 | 52,0 | 6,3 | NA | | |
| LA c/ secagem em 120°C | 38,4 | 5,7 | 49,2 | 6,7 | NA | | |
| LA sem secagem solar | 30,3 | 4,5 | 58,5 | 5,7 | NA | | |
| LA c/secagem solar em estufa (2 semanas) | 33,2 | 4,9 | 55,5 | 5,4 | NA | | |
| LA c/ secagem solar em estufa (4 semanas) | 28,6 | 4,1 | 61,5 | 4,8 | NA | | |
| LA s/ secagem | 33,5 | 4,4 | 55,9 | 6,2 | NA | | |
| LA c/ secagem em leito (1 semana) | 28,3 | 4,4 | 62,8 | 4,5 | NA | | |
| LA c/ secagem em leito (2 semanas) | 26,4 | 4,5 | 64,8 | 4,3 | NA | | |
| LA c/ secagem em leito (3 semanas) | 33,2 | 4,4 | 56,6 | 5,8 | NA | | |
| LA c/ secagem em leito (4 semanas) | 33,5 | 4,9 | 56,2 | 5,4 | NA | | |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 22,3 | 4,1 | NA | 4,1 | 1,1 | | Lee, Wilcox (2017) |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 28,5 | 4,9 | NA | 4,8 | 1,1 | | |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 28,9 | 4,8 | NA | 4,7 | 1,0 | | |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 21,8 | 3,9 | NA | 3,9 | 1,1 | | |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 35,2 | 5,4 | NA | 5,6 | 0,6 | | |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 34,4 | 5,5 | NA | 5,7 | 0,9 | | |
| Lodo sanitário desaguado em centrifuga | 50,7 | 3,3 | 14,7 | 4,9 | 0,9 | Kokalj et al. (2017) | |
| LA com anóxico e desaguado em prensa | 35,1 | 5,1 | 22,5 | 6,2 | NA | Wang et al. (2017) | |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | 30,2 | 4,6 | 17,5 | 5,9 | 0,9 | Zhang et al. (2016) | |
| MÉDIA ARITMÉTICA DOS VALORES | 32,2 | 4,7 | 48,7 | 5,3 | 1,0 | - | |

LA: Lodo Ativado; NA: não analisado; C: carbono; H: hidrogênio; O: oxigênio; N: nitrogênio; S: enxofre.
Fonte: produção do próprio autor.

Com base em Metcalf e Eddy (2003), observa-se que o macronutriente nitrogênio é elevado nas composições apresentadas, pois os referidos autores relatam que os macronutrientes no lodo são da ordem de 3,3% para nitrogênio e 2,3% para fósforo, valores consideráveis em comparação aos típicos fertilizantes agrícolas que apresentam, respectivamente, 5,0 e 10,0 % em massa.

Além dos macronutrientes, responsáveis pela nutrição das plantas quando o lodo é utilizado na agricultura, a matéria orgânica também apresenta um importante papel para a estruturação do solo, retendo umidade e prolongando a liberação dos nutrientes no meio. A determinação do tipo de matéria orgânica presente no lodo foi realizada por Coscione e Ceolato (2006), relatando uma importante distribuição em proporções que variam de 40 a 60% para as proteínas, 25 a 50% para os carboidratos e 10% para as gorduras e óleos presentes na fração orgânica.

Para o uso do lodo como biocombustível o teor de carbono indica um atrativo para a produção de energia a partir da combustão ou em métodos de conversão termoquímica, como a gaseificação e a pirólise, que visam a produção de bio-óleos e singás, respectivamente (MAWIOO et al., 2017; TAŃCZUK et al., 2016).

2.2.3 Poder calorífico do lodo seco

De acordo com Mawioo et al. (2017), Almeida (2007) e Lee e Santos (2011), o lodo seco apresenta potencial para o aproveitamento energético a partir da combustão, pois quando seco o seu poder calorífico (PC) é próximo a materiais empregados como biocombustíveis sólidos, por exemplo, a madeira de descarte e o bagaço de cana processada na indústria sucroalcooleira .

A combustão do lodo seco pode representar um importante método para recuperar parte da energia consumida na secagem do material e tornar o seu balanço térmico mais próximo da viabilidade (MAWIOO et al., 2017). Tal contexto é perceptível na comparação entre o PC de diferentes tipos de lodo e materiais diversos que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: poder calorífico do lodo e de outros resíduos.

| MATERIAL | PC ^I | PCS ^{II} | PCI ^{III} | REFERENCIA |
|--|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| | MJ/kg | | | |
| Lodo Ativado centrifugado | 22,0 | - | - | Mawioo et al. (2017) |
| Lodo Ativado bruto | 19,0 | - | - | |
| Lodo fecal | 23,0 | - | - | |
| Lodo de tanque séptico | 16 | - | - | |
| Lodo aeróbio adensado | - | 14,6 | 13,4 | Bianchini et al. (2015) |
| Lodo aeróbio centrifugado | - | 11,7 | 10,7 | |
| Lodo aeróbio | - | 15,5 | 14,2 | |
| Lodo aeróbio c/ digestão anaeróbia | - | 15,4 | 14,1 | |
| Lodo aeróbio, dig. anaeróbia e prensado | - | 15,1 | 13,8 | |
| Lodo primário | - | 13,5 | 12,3 | |
| Lodo primário c/ dig. anaeróbia | - | 12,7 | 11,6 | |
| Lodo primário c/ dig. anaeróbia e prensado | - | 13,5 | 12,4 | |
| Lodo aeróbio-anóxico e prensado | - | 22,7 | - | Wang et al. (2017) |

Continuação da Tabela 3

| | | | | |
|--|-----------|-------|------|-----------------------------|
| | 17,9 | | | Lee, Wilcox (2017) |
| | 17,0 | | | Lee, Wilcox (2017) |
| Lodo sanitário (processo não especificado) | - | 20,1 | 18,6 | Borges et al., 2008 |
| | - | 16,27 | 15,3 | Lee e Santos, 2011 |
| | 11,8 | - | - | Andreoli, 2006 |
| | 12,5-15,0 | - | - | Almeida, 2007 |
| MATERIAIS COMPARATIVOS | | | | |
| Carvão betuminoso | | | 30,1 | |
| Carvão sub-betuminoso | | | 28,7 | Lee, Wilcox (2017) |
| Resíduos industriais misturados | - | 16,0 | - | |
| Resíduos hospitalares | - | 14,0 | - | Almeida, 2007 |
| Refugos variados | - | 18,5 | - | |
| Madeira de descarte | 13 | - | - | Arauterm (2008) <i>apud</i> |
| Bagaço de cana em briquete | 14,5 | - | - | Borges et al., 2008 |

Nota: I: sem especificação do tipo de PC; II: poder calorífico superior; III: poder calorífico inferior.

Fonte: produção do próprio autor.

O uso do lodo como biocombustível sólido é uma importante alternativa em comparação a sua disposição na agricultura. Por exemplo, Diener et al. (2014) avaliaram o emprego do lodo para três cidades do continente africano, observando em seus estudos que o uso como biobiocombustível sólido é mais atrativo financeiramente que o seu uso como estabilizador do solo, emprego mais comum para este tipo de biomassa quando tratada de forma adequada.

Independente do tipo de biocombustível gerado a partir do lodo, para produzir boas características térmicas ao material é necessário que o mesmo passe por uma etapa de secagem térmica de forma prévia.

2.2.4 Calor específico do lodo seco

Dentre as propriedades térmicas do lodo seco, merece destaque o calor específico, que corresponde à quantidade de energia necessária para variar em uma unidade de temperatura uma determinada massa do material. Tal propriedade termodinâmica do lodo é de extrema relevância durante os processos de secagem térmica.

Os autores Arlabosse, Chavez e Prevot (2005) avaliaram, empiricamente, o calor específico a pressão constante do lodo biológico seco numa faixa de temperatura de 35 até 105°C, obtendo, assim, uma função linear que correlaciona o calor específico a pressão constante com a temperatura do lodo seco, conforme retrata a Equação 1.

$$Cp_{Lodo\ seco} = 1434 + 3,29T_L \quad (1)$$

Sendo:

$Cp_{Lodo\ seco}$: calor específico do lodo seco na temperatura T, J.kg⁻¹.°C⁻¹;

T_L : temperatura do lodo seco, °C.

O calorímetro usado para a determinação do calor específico do lodo é denominado de *differential scanning calorimeter* (DSC), o qual promove o aquecimento do lodo numa taxa previamente determinada e mantém uma atmosfera a pressão constante e inerte a partir da aplicação de nitrogênio molecular (N_2) na forma gasosa. O DSC gera, após a análise, uma curva de entalpia específica em função da faixa de temperatura analisada, sendo o c_p do lodo obtido pela derivada da entalpia específica em determinada temperatura (uma função de ponto). De forma alternativa, pode-se determinar a equação que representa o calor específico ao longo da faixa de temperatura analisada por meio da regressão dos valores de entalpia em função da faixa de temperatura, semelhante ao realizado na Equação 1 que foi apresentada.

2.2.5 Propriedades reológicas do lodo (propriedades mecânicas)

Segundo Andreoli (2006) e Von Sperling (2014), com o tratamento do lodo o teor de umidade muda e a constituição física se altera significativamente. O lodo com características líquidas deixa de existir quando o teor de ST em base úmida fica superior aos 25%, dando origem a um semissólido com características plásticas. A característica plástica do lodo é descrita na literatura da área como a constituição física de pior manuseio e processamento (BENNAMOUN et al., 2013; DENG et al., 2017; LI et al., 2013).

Ainda, para Andreoli (2006) e Von Sperling (2014), ao aumentar a retirada de água o lodo entra no estado de sólido com elevada dureza ao toque, principalmente quando o teor de ST atinge a ordem de 45%. Quando o valor de sólidos atingem 60% o lodo começa a ter um comportamento granular, semelhante a carvão triturado, podendo apresentar a condição de material de baixa granulometria e virar pó quando o teor de ST ultrapassa os 85% (15% de umidade), conforme retrata a Figura 2, que mostra as características do lodo em função da umidade e teor de sólidos.

Para Al-Dawery (2016), as características reológicas dos lodos exercem influências no transporte e remoção da água durante os tratamentos mecânicos e térmicos. Por este motivo que as diferentes características reológicas apresentam, entre as suas várias causas, uma relação com a natureza da água presente no lodo.

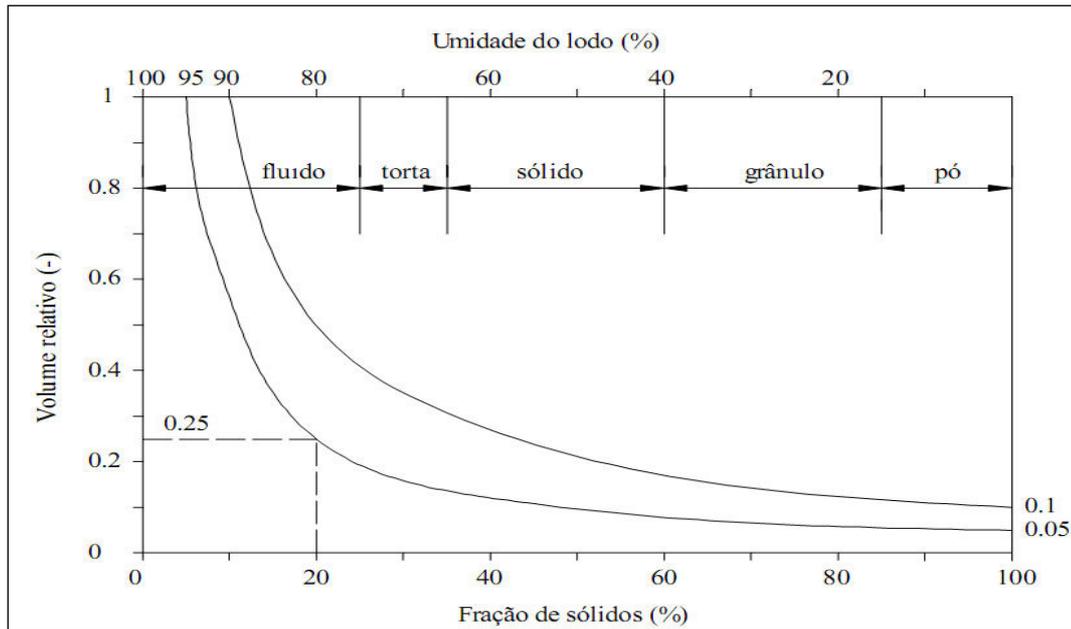


Figura 2: variação de volume e teores de sólidos totais e umidade do lodo.

Fonte: Van Haandel, Lettinga, 1994.

Portanto, o método escolhido para o tratamento do lodo é definido em função da natureza da água presente no mesmo. A Tabela 4 apresenta as principais frações de água que constituem o lodo biológico e os métodos de separações recomendados para cada forma existencial.

Tabela 4: caracterização das frações de água no lodo e os métodos de separação.

| NATUREZA | FRAÇÃO | FORMA EXISTENCIAL | MÉTODO DE SEPARAÇÃO |
|--------------------------|--------|---|--|
| Água Livre | 70% | Livre no meio | Força gravitacional (adensamento ou flotação) |
| Água Adsorvida e Capilar | 20% | Nas partículas em suspensão e coloidais | Diferença de pressão ou adição de floculantes. |
| Água Celular | 10% | No interior das células | Possível por meios biológicos ou através de mudança do estado de agregação da água (congelamento ou evaporação). |

Fonte: adaptado de Van Haandel, Marais (1999).

Quanto menor a fração de água presente no lodo, menor será a eficiência energética e maior se torna o consumo inerente ao processo de desaguamento, pois a água adsorvida e a intercelular necessitam de forças acima do que os processos mecânicos podem disponibilizar para serem removidas.

Mesmo com o emprego de métodos mecânicos, a retirada total da água livre não é possível e, dependendo do emprego esperado do lodo, será necessário um processo mais avançado para retirar o residual de água. Visão confirmada por Salihoglu et al. (2006) e Luboschik (1999) que relatam os processos mecânicos como limitados para alcançar valores elevados de ST no lodo, necessitando do emprego de processos térmicos para atingir tais níveis.

A remoção de água do lodo é de extrema importância para o manuseio e transporte deste material. A água livre é a principal parcela que deve ser removida, pois uma pequena redução de umidade nas primeiras etapas de tratamento pode gerar reduções significativas de volume. A Figura 3 mostra a relação entre o volume e o teor de ST para lodo sanitário.

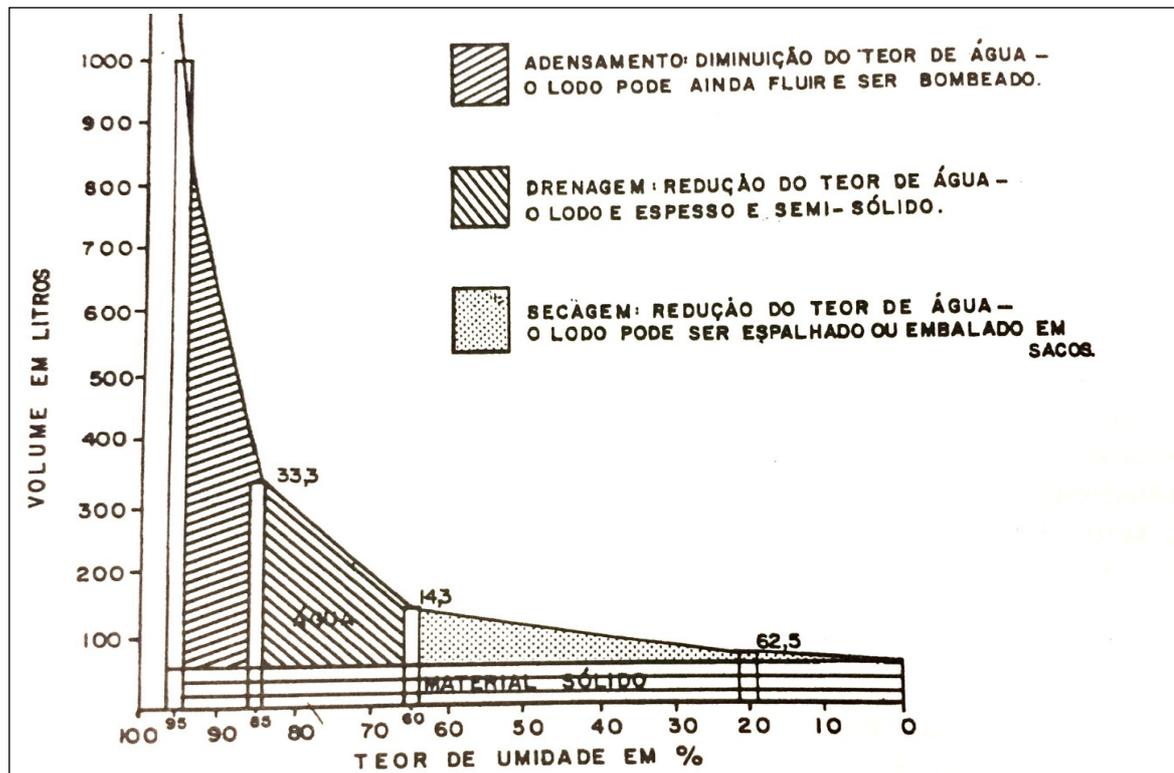


Figura 3: Relação entre a redução da umidade e do volume de lodo sanitário.
Fonte: Jordão, Pessoa (1995).

Observa-se, a partir da Figura 3, a importância da escolha adequada do tipo de tecnologia para o tratamento do lodo, pois uma pequena remoção de 15% da água presente no material pode reduzir em até 67% o volume inicial do lodo.

2.2.6 Tipos de tratamento de lodo

Diversos tipos de tratamento podem ser realizados com o lodo, variando, principalmente, em função do tipo de lodo e da destinação desejada ao mesmo.

A Figura 4 apresenta as diversas técnicas para o tratamento de lodo e formas de disposição final. No entanto, apesar da grande diversidade, a maioria das técnicas pode ser resumida com base no seu objetivo geral que varia do adensamento ou espessamento, estabilização, condicionamento, desidratação e higienização, podendo as técnicas apresentar mais que um objetivo simultaneamente (VON SPERLING, 2014; METCALF E EDDY, 2003).

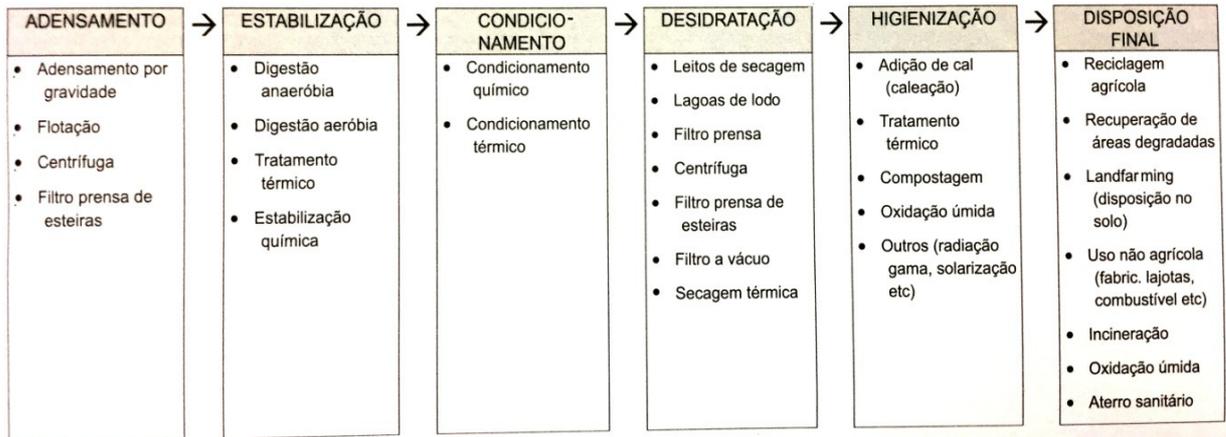


Figura 4: principais técnicas para diferentes níveis de tratamento do lodo e disposição final.
Fonte: Von Sperling (2014).

Entre as técnicas citadas para a desidratação, a secagem térmica apresenta um grande potencial para a redução de massa entre 70 a 80% e o volume na ordem de 90%, minimizando os custos com o transporte e destinação final do material.

A secagem térmica é caracterizada pela vaporização da água para um meio não saturado, como o ar ambiente com umidade relativa inferior a saturação, podendo resultar em teores de ST no lodo de 90 a 95% (BENNAMOUN et al., 2013; MACHADO, 2011; VAN HAANDEL, 2009; DAVID, 2002). Sendo considerada, entre as tecnologias de higienização, a mais eficaz na destruição de microorganismos e inativação de suas formas resistentes, conforme é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: comparação entre as tecnologias de tratamento de lodo com higienização.

| Processo | Efeito sobre os patógenos | | | Estabilidade do lodo | Redução volume | Odor | Observações |
|--------------------------|---------------------------|----------|----------|----------------------|----------------|----------|--------------------------------------|
| | Bactérias | Vírus | Ovos | | | | |
| Compostagem (leiras) | +++ / ++ | ++ / + | +++ / ++ | +++ | ↑ | +++ | Efeito depende da mistura |
| Compostagem (reator) | +++ | +++ / ++ | +++ | +++ | ↑ | ++ | Efeito depende da mistura |
| Dig. aeróbia autotérmica | +++ / ++ | +++ / ++ | +++ | ++ | ++ | ++ | Efeito depende do regime operacional |
| Pasteurização | +++ | +++ | +++ | ++ | + | ++ | Deve ser previamente estabilizado |
| Caleação | +++ / ++ | +++ | +++ / ++ | ++ / + | ↑ | +++ / ++ | Efeito depende da manutenção do pH |
| Secagem térmica | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | + | Estabilização e inativação total |
| Incineração | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | + | Estabilização e inativação total |

+++ : significativa importância; ++ : moderada importância; + pouca importância; ↑ aumento de volume

Fonte: Von Sperling (2014).

Conforme descrito na Tabela 5, a secagem térmica apresenta todas as premissas de um bom tratamento (redução de volume e estabilização bioquímica) e higienização (inativação total dos microorganismos), conseguindo atender aos parâmetros definidos na Resolução N°375/06 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estão mencionados na Tabela 6, para que o lodo sanitário possa ser utilizado diretamente em alguns cultivos agrícolas.

Tabela 6: enquadramento do lodo para uso agrícola (classe A).

| PARAMETRO | CLASSE A |
|----------------------------|-------------------------|
| Coliformes Termotolerantes | < 1.000 NMP/g lodo seco |
| <i>Salmonella SP</i> | < 4 NMP/4 g lodo seco |
| Vírus entéricos | < 1 UFP/4 g lodo seco |
| Ovos viáveis de helmintos | < 1 ovo/ 4 g lodo seco |

NMP: número mais provável; UFP: unidade de formação de placa.

Fonte dos dados: Brasil (2006).

Os ovos de helmintos representam os organismos patogênicos mais resistentes as intempéries ambientais, pois apresentam valores médios de sobrevivência na ordem de meses no lodo e de dois a sete anos no solo. Portanto, tais organismos são ótimos indicadores para avaliar a higienização de lodos, pois se as detecções de ovos viáveis de helmintos forem abaixo do limite, existirá uma considerável possibilidade de todos os demais patógenos estarem inativos (JIMÉNEZ, 2007; SIMONETI, 2006; CAPIZZI-BANAS et al., 2004; EPA, 2003).

Assim sendo, o tratamento térmico se torna uma alternativa promissora por reduzir o volume do lodo com uma baixa demanda de área e tempo de processamento, agregando valor e tornando-o um material de fácil e segura manipulação pelo homem para o seu posterior uso na agricultura ou como biocombustível (MAWIOO et al. 2017; WERLE, WILK 2010)

Apesar das inúmeras vantagens mencionadas, o tratamento térmico ainda é um processo que demanda grande quantidade de energia e apresenta elevados custos, tanto de implantação como de operação, conforme mostra a Tabela 7, que compara as técnicas de higienização mencionadas, mas com enfoque nas demandas provenientes da instalação e operação.

Tabela 7: comparação entre as tecnologias de higienização no aspecto da instalação e operação.

| Processo | Área | Pessoal ¹ | Energia externa | Produtos Químicos | Biomassa Externa | Custos | |
|----------------------|------|----------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------|------|
| | | | | | | CAPEX | OPEX |
| Compostagem (leiras) | +++ | + | + / +++ | + | +++ | + | + |
| Compostagem (reator) | ++ | ++ | ++ | + | +++ | ++ | ++ |
| Biodigestão aeróbia | ++ | ++ | ++ | + | + | ++ | ++ |
| Pasteurização | ++ | ++ | +++ | + | + | ++ | ++ |
| Caleação | ++ | + / +++ | + | +++ | + | + | ++ |
| Secagem térmica | + | +++ | +++ | + | + | +++ | +++ |

NOTAS: 1: nível de especialização da mão de obra; +++: significativa importância; ++: moderada importância; + pouco importância; CAPEX: capital expenditure (investimento em bens de capital); OPEX: operational expenditure (despesas e dispêndios operacionais e no investimento em manutenção de equipamentos).

Fonte: Von Sperling (2014).

Sendo o foco deste trabalho no estudo da secagem térmica em secadores mecânicos de lodo, então esses referidos equipamentos serão mais bem tratados nos próximos subtópicos.

2.3 SECADORES MECÂNICOS DE LODO

Os secadores mecânicos são equipamentos que podem processar significativas quantidades de lodo e em altas taxas de secagem, gerando biossólidos com baixos teores de água, higienizados e adequados para o uso agrícola como biofertilizante e condicionador de solos, além do uso como biocombustível sólido para a queima em caldeiras e fornos na indústria e comércio.

De acordo com David e Tsutiya (2001), a secagem térmica em equipamentos mecanizados é realizada em altas temperaturas, por esse motivo é utilizado como fonte térmica o óleo combustível, carvão, biomassa e gás liquefeito de petróleo, além do próprio biogás gerado em determinados tipos de tratamento de efluentes. Porém, o uso destes tipos de combustíveis, associados a elevada demanda de energia do processo de vaporização, tornam a operação destes equipamentos de elevado custo.

Os autores David e Tsutiya (2001) ainda estudaram um secador de soleiras múltiplas instalado na ETE São Miguel, São Paulo, que utiliza gás natural e biogás para operar com temperaturas variando entre 280°C na entrada e 230°C na saída do secador. Enquanto Maldonado, Finzer e Lima Verde (2009) operaram um secador rotativo com temperatura média de 450°C na câmara de combustão e 135°C na saída do equipamento. Ambos demonstram como a energia é vital e inerente neste tipo de processo, pois o aquecimento do lodo úmido da temperatura ambiente até os valores mencionados geram significativas demandas por energia térmica e, por consequência, combustíveis.

Segundo Danish et al. (2016), a taxa de secagem do lodo é afetada por vários fatores, entre eles estão a temperatura, velocidade e umidade relativa (UR) do ar, características estruturais e umidade no lodo, além do método de secagem escolhido. Entretanto, desconsiderando as perdas em função do tipo de processo adotado, a água sempre demandará a mesma quantidade de energia térmica para a vaporização em determinada pressão de trabalho (HUANG *et al.*, 2015; COTA-ESPERICUETA, PONCE-CORRAL, 2008; HAMMER, 1979).

Para evaporar 1kg de água presente no lodo, em condições ideais, são necessários 2.744kJ de energia térmica (variando em função da pressão), mas esse valor pode aumentar em até 100% em virtude do processo, lodo e equipamentos utilizados (ANDREOLI, 2001). O valor

mencionado é próximo e coerente aos 2.600 kJ que foram descritos por Van Haandel (2009) para vaporizar 1kg de água presente em lodo desidratado com 80% de umidade.

O aumento de 100% da energia térmica para vaporizar água presente no lodo que foi mencionado por ANDREOLI (2001) é ocasionado pelas perdas energéticas e irreversibilidades, ambas inerentes ao processo termodinâmico real. Por exemplo, os autores Reyes et al. (2014) descrevem uma demanda de energia térmica entre 3.000 a 4.000kJ por quilograma de água durante a secagem de biomassa.

Considerando a exposição realizada, seria mais adequada a consideração de uma faixa de demanda de energia para o processo de secagem, semelhante ao apresentado por Reyes et al. (2014), e não um valor específico para o processo como foi apresentado pelos demais autores.

2.3.1 Métodos e princípios da secagem térmica de lodo

Segundo Metcalf e Eddy (2003), existem diversos tipos de secadores mecânicos, os quais são classificados em diretos, indiretos, infravermelho ou combinados, sendo o último a combinação simultânea entre duas ou três classes.

A classificação é obtida em função do princípio do método de transferência de calor, podendo ser por convecção, condução ou radiação (METCALF E EDDY, 2003; TUNCAL, USLU, 2014; BENNAMOUN et al., 2013). A Tabela 8 apresenta a classificação de forma didática e inter-relacionada com o método e a transferência de calor.

Tabela 8: classificação dos secadores mecânicos pelo método utilizado.

| PRINCIPIO DO METODO | TRANSFERENCIA DE CALOR | METODO |
|---------------------|---|---------------|
| Convecção | Ar aquecido ou gases de combustão entram em contato direto com o lodo. | Direto |
| Condução | Transferência de calor entre a fonte quente (geralmente vapor ou óleo) e o lodo através de um meio físico que realiza a condução térmica. | Indireto |
| Radiação | Lâmpadas elétricas ou queima de gás transmitem radiação infravermelha até o lodo. | Infravermelho |

Fonte: produção do próprio autor.

Os autores Bennamoun et al. (2013) avaliaram a cinética da secagem convectiva e condutiva, descrevendo três principais fases ao longo da curva de secagem:

- Fase da taxa de secagem crescente;
- Fase da taxa de secagem constante;
- Fase da taxa de secagem decrescente.

As três fases descritas estão intimamente relacionadas ao tipo de água vaporizada (livre, capilar e intersticial), salvo a primeira fase que envolve, além da vaporização da água livre, o processo de aquecimento do lodo.

Os referidos autores também descreveram alguns fenômenos físicos que ocorreram com os lodos durante a secagem térmica. Tais fenômenos foram atribuídos à vaporização da água e rearranjo da estrutura durante os processos de secagem convectiva e condutiva:

- **CONVECTIVO:** fase de encolhimento, fase de fissuras e fase de formação da crosta consolidada de secagem;
- **CONDUTIVO:** fase pastosa, fase aglomerada e fase granular.

Tais fenômenos influenciam na granulometria final do lodo e nas taxas de vaporização da água durante o processo de secagem térmico, podendo alterar o tempo de secagem e as características finais do material de forma significativa.

2.3.2 Tipos de secadores mecânicos de lodo

São destacados na Tabela 9 os principais secadores mecânicos utilizados na área de saneamento, sendo que os mesmos apresentam distinções em função do método de transferência de calor e da configuração de operação.

Tabela 9: tipos de secadores mecânicos mais empregados na área de saneamento.

| TIPO | MECANISMO DE OPERAÇÃO | CLASSIFICAÇÃO | LODO SECO ^I |
|--------------------|--|----------------------------|------------------------|
| Tambor Rotativo | Tambor rotativo construído em invólucro de aço, apoiado em rolamentos e trabalha com ligeira inclinação em relação a horizontal. | Direto, indireto ou misto. | 90 - 95% |
| Leito Fluidizado | Transferência de calor entre o leito e o lodo por meio de um trocador de calor instalado no leito. | Direto | 90 – 95% |
| Secador Flash | Lodo é pulverizado e fica suspenso pelos gases quentes no interior do secador pelo tempo necessário para a vaporização da água. | Direto | 90 – 92% |
| Secador de Esteira | Lodo é transportado por uma esteira horizontal, enquanto ar, gás ou vapor aquecido atravessam a esteira e o lodo no sentido vertical. | Direto | 90% |
| Bandejas Múltiplas | Formado por múltiplas bandejas num arranjo vertical, o lodo é alimentado na parte superior do secador e percorre, cada bandeira, até sair. | Direto, indireto ou misto. | 65-96% |

Nota: I: teor de lodo seco expresso em porcentagem de sólidos totais.

Fonte: adaptado de Metcalf, Eddy (2003); Hammer (1979); Tańczuk et al. (2016).

Segundo Bennamoun et al. (2013), os secadores de tambor rotativo, leito fluidizado, flash e esteira são mais usados como secadores diretos ou convectivos, apresentando um consumo energético que varia, na relação de energia térmica por massa de água evaporada, de 2.520 a

3.600 kJ.kg^{-1} , resultando numa taxa de vaporização de água de $0,2 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para um secador do tipo flash e de até $30 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para um secador do tipo esteira. Enquanto em secadores do tipo indireto, incluindo os secadores de bandejas múltiplas e de filmes finos, os valores ficam na faixa de 2.880 a 3.438 kJ.kg^{-1} e taxa de vaporização de 7 a $35 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

As faixas mencionadas para a vaporização são condizentes com os 3.000 a 4.000 kJ.kg^{-1} de Reyes et al. (2014) e que também abrangem ao valor de 2.600 kJ.kg^{-1} de Van Haandel (2009).

A seguir será tratado com maior especificidade o secador do tipo bandejas múltiplas, o qual apresenta alguns elementos importantes para o método de secagem do leite granular que é proposto e estudado neste trabalho.

2.3.3 Secador de bandejas múltiplas

Segundo Lobato (2011), os secadores de bandejas múltiplas, também conhecidos como secadores de soleiras múltiplas, apresentam boa eficiência na secagem e higienização de lodos, além de relativa simplicidade de operação e manutenção.

O autor Hammer (1979) descreve o secador de bandejas múltiplas como uma casca cilíndrica metálica com bandejas no seu interior e um eixo central rotativo dotado de braços que tem a função de revolver o lodo e transportá-lo para a próxima bandeja, conforme é mostrado na Figura 5 do secador indireto da empresa *Jiangsu Zhenxing Drying* na esquerda e o seu fluxo de secagem no esquema didático a direita.

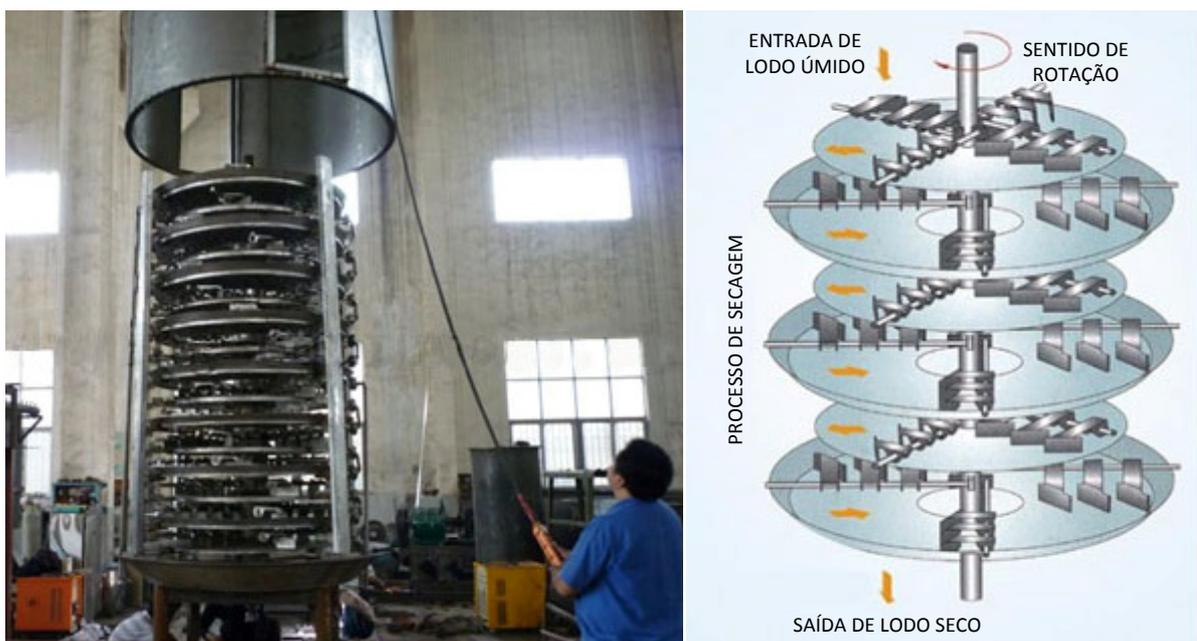


Figura 5: secador de bandejas múltiplas (esquerda) e seu esquema de operação (direita).

Fonte: adaptado de Zhenxing (2017).

A alimentação de lodo no secador de bandejas múltiplas é realizada na parte superior e, lentamente, o material segue para as bandejas inferiores com o movimento dos braços raspadores, induzindo ao lodo um movimento de espiral para garantir um adequado tempo de contato do material com o ar aquecido. A Figura 6 apresenta dois secadores de bandejas múltiplas com transmissão de calor de maneira indireta (esquerda) e direta (direita).

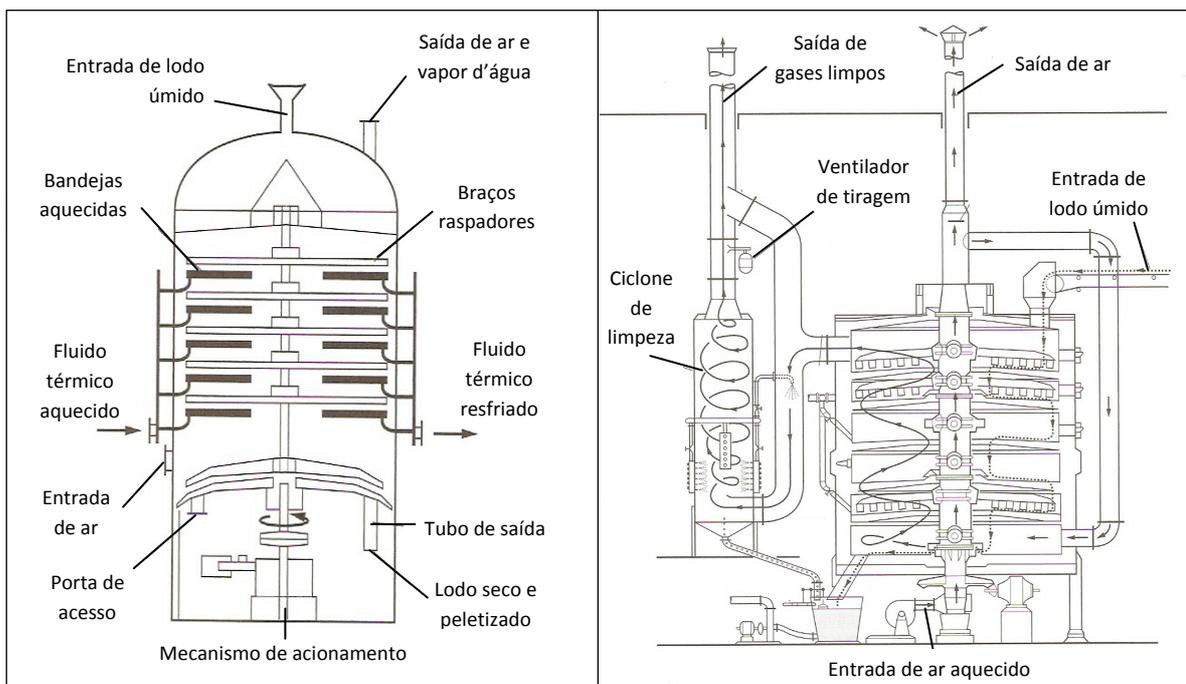


Figura 6: secadores de bandejas múltiplas de contato indireto (esquerda) e direto (direita).
Fonte: adaptado de Metcalf e Eddy (2003).

Para Hammer (1979), os secadores de bandejas múltiplas apresentam boa eficiência tanto para secagem como incineração de lodo, argumentando que o segundo é uma extensão do primeiro processo, mas com particularidades como a aplicação de uma intensidade maior de energia, volatilização de parcela do lodo e transformação do material residual em cinzas inertes.

Entretanto, a linha de pensamento descrita não é comum aos autores Metcalf e Eddy (2003), que descrevem os dois processos como distintos entre si e indicam que o equipamento de bandejas múltiplas é empregado apenas para secagem de lodo por via indireta. Neste contexto, o presente estudo adotará a linha de pensamento de Hammer (1979), aceitando tanto a existência dos secadores de bandejas múltiplas para a finalidade de secagem, quanto para a incineração de lodo.

Os autores Metcalf e Eddy (2003) relatam que, dependendo do uso previsto do lodo seco, o secador com transmissão de calor indireto pode ser regulado para alcançar o teor de ST durante a secagem de 65 a 95%. Usualmente, os valores de ST finais são definidos, além do

uso previsto para o lodo, em função da umidade de equilíbrio (UE) que o material apresenta, sendo esse assunto abordado a seguir.

2.3.4 Umidade de equilíbrio (UE)

De acordo com David (2002), para realizar a secagem térmica de lodo a UE do material deve ser considerada, evitando custos adicionais e perda de eficiência, pois a recuperação de água pelo lodo pode ocorrer quando a sua umidade for inferior a UE, possibilitando a reabsorção de água presente no ar ambiente até que o material alcance o equilíbrio com a atmosfera.

Para os sólidos em temperaturas na faixa de 15 a 50°C os valores de UE podem ser apresentados, com boa precisão, em função da umidade do ar ambiente (PERRY, CHILTON, 1980). A Figura 7 mostra a umidade de equilíbrio de lodo sanitário e de outros materiais em função da umidade relativa do ar ambiente.

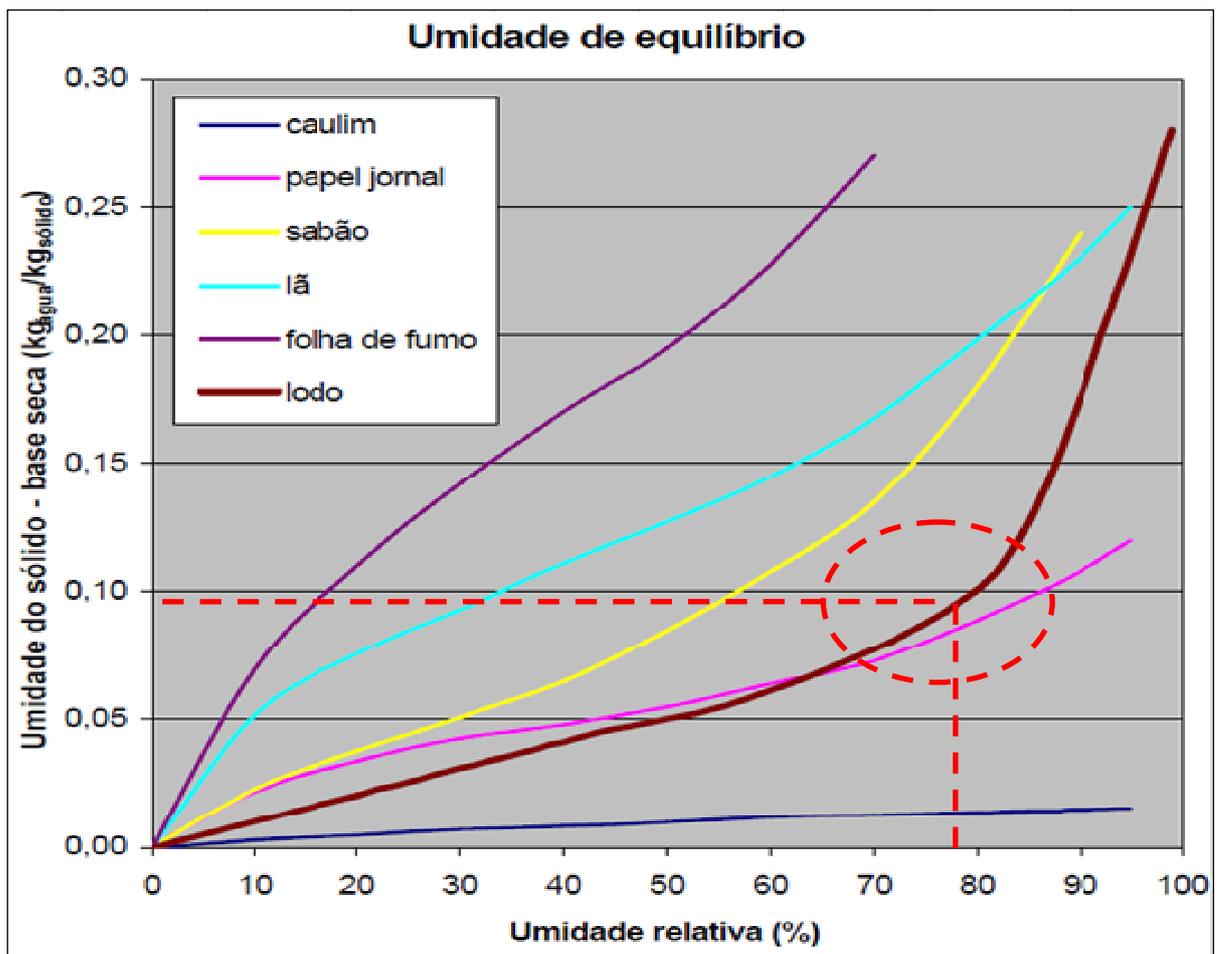


Figura 7: curva da umidade de equilíbrio em função da umidade ambiente.
Fonte: adaptado de David (2002).

Tomando, por exemplo, o município de Vitória, no Espírito Santo, onde a umidade relativa média ao longo do ano é de 78% (CORREA, 2011), observa-se que a linha tracejada vermelha intercepta a curva do lodo para uma UE ligeiramente inferior aos $0,10\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{sólido}}$ (equivalente a 10% de umidade) na Figura 7. Portanto, para evitar o uso desnecessário de energia durante a secagem de lodo neste município, o valor encontrado deve ser considerado como o ponto máximo que o processo deve alcançar, caso não haja métodos de controle de hidratação após a secagem.

2.3.5 Característica plástica e recirculação de lodo

Devido às características plásticas do lodo úmido, recomenda-se que a alimentação de lodo no secador seja realizada quando o teor de ST esteja entre 15 e 30%, dependendo da rota tecnológica e tipo de lodo utilizado, evitando, assim, a alimentação de lodo no estado líquido (ANDREOLI, 2001). Por este motivo é comum, antes da secagem, o processamento do lodo por outros métodos, como filtração e centrifugação (ZHAO, CHENG, 2017).

Teores de sólidos totais entre 20 e 30% são facilmente obtidos por processos mecânicos de desaguamento, por exemplo, a centrifugação (STASTA et al., 2006). Entretanto, o lodo na faixa de ST mencionada apresenta características plásticas que são consideradas pelos profissionais de saneamento como um ponto de atenção durante o processo de secagem, pois a transferência de calor e massa entre o lodo e o ar é severamente prejudicada nesta fase, somado ao fato que, dependendo das condições do lodo e da forma de operação do secador, pode ocorrer à obstrução do equipamento e paralisação do processo de secagem (BENNAMOUN et al., 2013; DENG et al., 2017).

Para Deng et al. (2017), a plasticidade está ligada à capacidade de se aglomerar e aderir nas superfícies de contato, podendo essa característica ser dividida em coesão (adesividade entre as partículas do lodo) e adesão (viscosidade da superfície do lodo nas paredes sólidas).

A coesão do lodo reduz drasticamente a superfície de contato com o ar de secagem e dificulta a permeabilidade do material ao ar. Enquanto a característica de adesão prejudica o manuseio e transporte do lodo dentro do secador, além de reduzir a superfície de contato devido à aderência nas superfícies do equipamento.

De acordo com Li et al. (2013), seus experimentos mostraram que o lodo sanitário pode apresentar elevada aderência nas paredes do secador quando atingem teores de ST em torno

de 40%, só conseguindo a redução na aderência e melhora na trabalhabilidade à medida que o teor de ST aumenta.

Por causa dessa característica plástica e pegajosa do lodo, normalmente uma parcela do material seco é misturada ao lodo úmido que será alimentado no secador, formando um material com maior teor de sólidos e garantindo, assim, as características físicas adequadas para o processo (METCALF E EDDY, 2003; OUTWATER, 1994). Outros materiais também podem ser misturados ao lodo para reduzir a coesão e aderência, por exemplo, Deng et al. (2017) misturaram serragem e óxido de cálcio com lodo para melhorar a trabalhabilidade.

A Figura 8 mostra o esquema de um secador que utiliza a recirculação do lodo seco, sendo uma prática usual nos processos de secagem para possibilitar, não apenas as mudanças das características do lodo de entrada, mas também o reprocessamento das partículas com dimensões inadequadas para a destinação final que foi prevista.

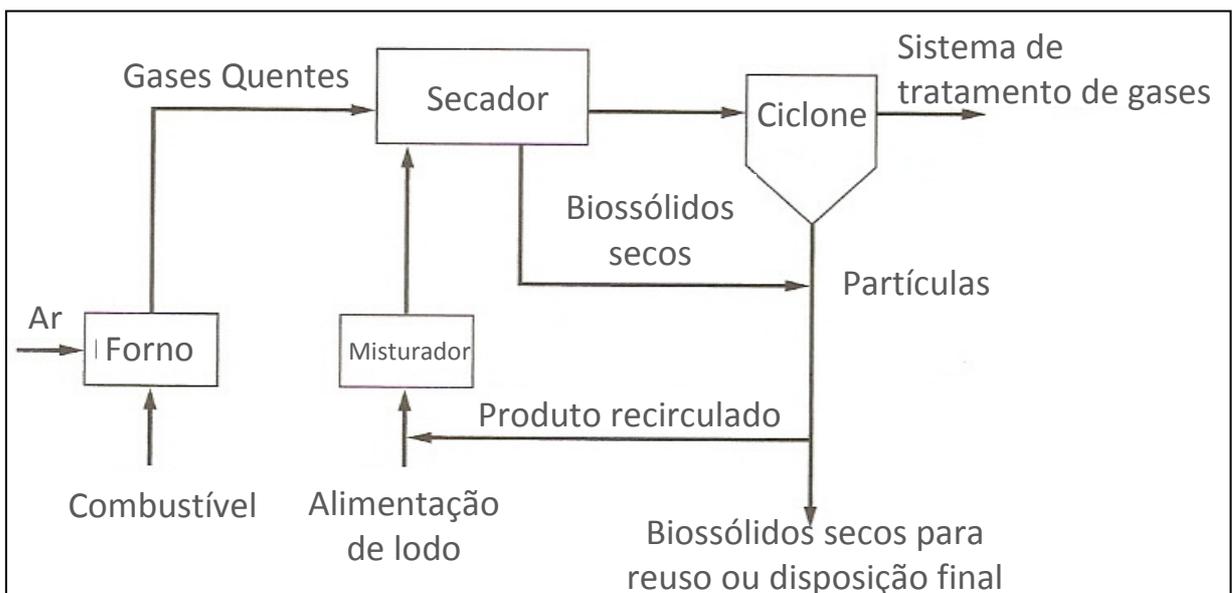


Figura 8: fluxo de lodo numa planta de secagem por tambor rotativo.
Fonte: adaptado de Metcalf e Eddy (2003).

A recirculação de lodo seco também colabora para aumentar a taxa de permeabilidade ao ar do material, resultando numa melhora na transferência de calor e massa. Tal afirmação foi comprovada por Léonard et al. (2008), os quais estudaram a recirculação de lodo seco para melhorar as taxas de secagem e mostraram que a mistura dos materiais aumentava a quantidade de espaço intergranular que, por sua vez, aumentava as trocas de massa e calor durante a secagem do lodo. Tais resultados dos últimos autores vão em direção à base teórica de Çengel (2012) que afirma, para processos convectivos, que a transferência de calor e massa são diretamente proporcionais a área de contato.

A Figura 9 mostra os resultados de secagem obtidos por Léonard et al. (2008) com base na recirculação de 0,1 a 0,4kg de lodo seco sobre dois tipos de lodos, ficando nítido como a recirculação melhora as taxas de secagem.

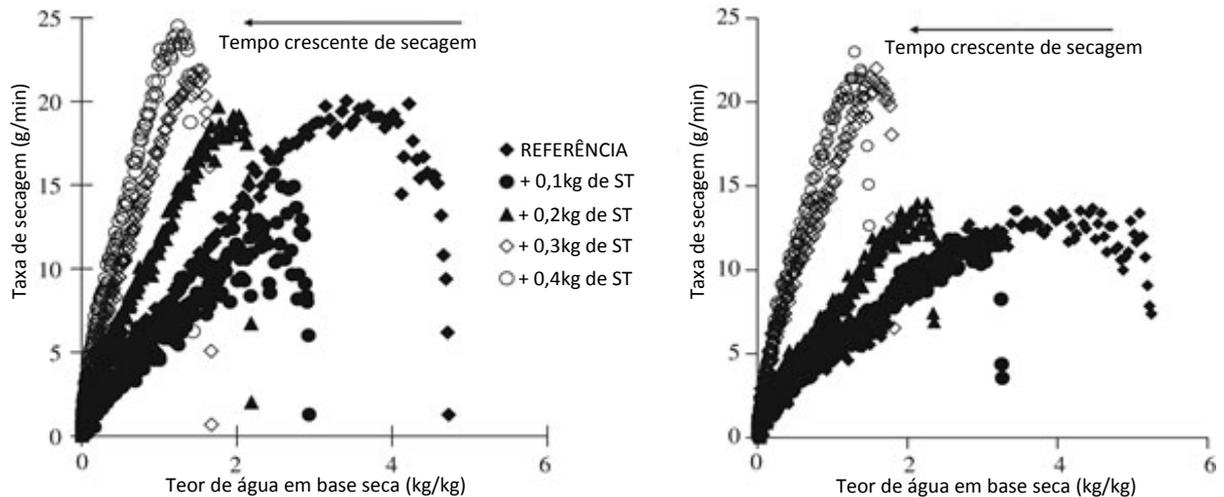


Figura 9: taxas de secagem de dois tipos de lodo em função da recirculação de lodo seco.
Fonte: adaptado de Léonard et al. (2008).

Existem outros estudos que relacionam o aumento da secagem térmica de lodo com a porosidade e a área superficial específica do material (ZHAO, CHENG, 2017; ZHU et al., 2012). Por exemplo, Zhu et al. (2012) testaram 3 formas de lodo para a secagem térmica, sendo a pastilha a forma que apresentou maior eficiência de secagem, pois apresentava a maior área superficial específica em comparação as formas cilíndrica e esférica nas mesmas condições de secagem.

A etapa de recirculação também colabora para evitar o que os autores Bennamoun et al. (2013) e Stickland (2015) descrevem como uma crosta, ou pele, formada na superfície do lodo que prejudica a transferência de calor e massa.

Para Stickland (2015) a formação da crosta é fortemente influenciada pela taxa de secagem e do teor de umidade do lodo, pois as altas taxas não permitem que a difusividade da água no interior do lodo abasteça de forma contínua a superfície do material, resultando na formação de uma crosta seca pela consolidação da secagem superficial. Enquanto o emprego de uma lenta taxa de vaporização permite que o lodo perca umidade de forma contínua e reduza, gradualmente, as diferenças de umidade ao longo do perfil do material.

2.4 ENERGIA HELIOTÉRMICA

A energia solar é uma das fontes primárias mais importantes do planeta Terra, pois a partir dela são derivadas algumas fontes secundárias de grande uso pela sociedade. Autores como Gauché et al. (2017) e Ju et al. (2017) relatam que, apesar do maciço uso das fontes secundárias, a energia solar é considerada a fonte energética mais promissora para o futuro. Mesmo com o posicionamento positivo dos autores citados, a energia solar ainda necessita vencer alguns desafios tecnológicos, econômicos e culturais para se tornar mais acessível à sociedade e aceita no mercado como opção energética válida e viável.

No atual cenário de desenvolvimento tecnológico, a energia solar pode ser dividida em fotovoltaica e solar térmica, sendo a térmica ainda subdividida, segundo Gauché et al. (2017), em sistemas planos e sistemas com concentração, sendo o último tipo o objeto deste tópico.

A energia heliotérmica é caracterizada pela produção de energia térmica, de origem solar, a partir de coletores planos ou CSP. Segundo Gauché et al. (2017), o processo de captação da energia nos CSP é diferenciada das demais técnicas, pois os mesmos aumentam o fluxo de radiação solar em determinada área, possibilitando a obtenção de energia térmica de melhor qualidade e numa menor área construída que os sistemas planos.

Os CSP ainda podem ser classificados de acordo com o foco ou direcionamento dada a radiação concentrada, sendo divididos em foco linear e foco central ou fixo. Indo além desta classificação, também é possível dividir os CSP de acordo com a forma geométrica do seu concentrador solar (área espelhada). Atualmente os principais tipos são os cilindros parabólicos, linear Fresnel, disco e torre central. As classificações descritas, com foco na energia heliotérmica, são apresentadas na Figura 10, enquanto a Figura 11 ilustra a diferenciação entre os tipos de CSP quanto à geometria dos seus concentradores e a forma de focalização.

Devido aos diferentes arranjos físicos para concentrar a radiação solar, cada tipo de CSP apresenta características operacionais muito distintas, variando consideravelmente no tipo, pressão e temperatura de operação do fluido de trabalho ou *heat transfer fluid* (HTF), capacidade do sistema de armazenamento térmico ou *Thermal Energy Storage* (TES), área requerida para a instalação, além das formas de orientação solar e fator de concentração (FC).

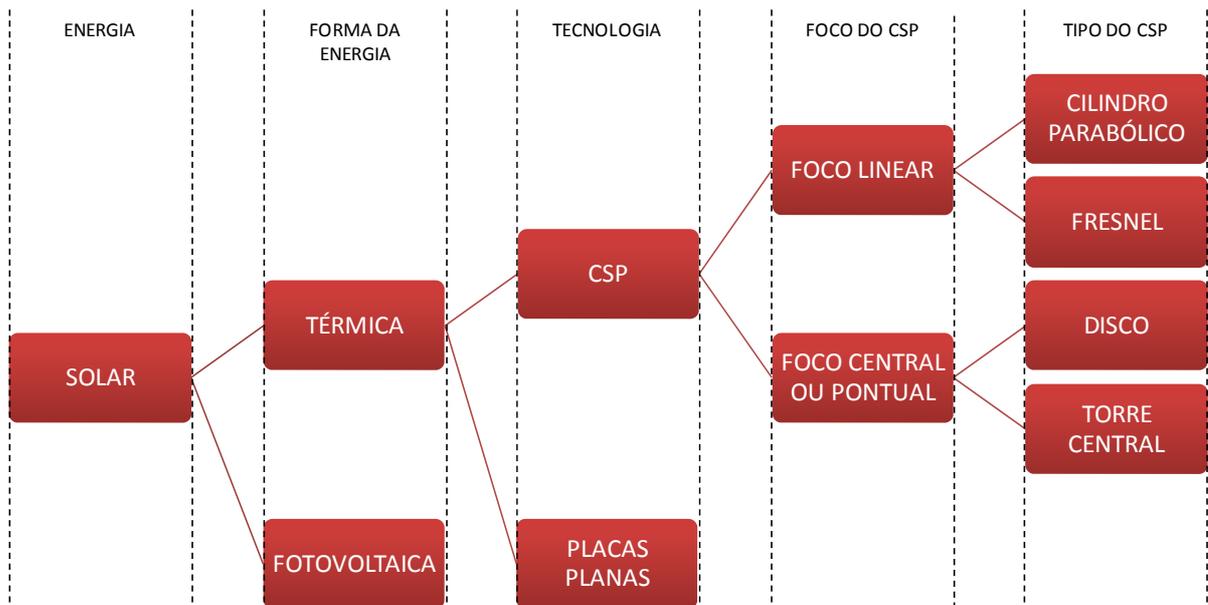


Figura 10: divisões e subdivisões dentro da energia solar.
Fonte: produção do próprio autor.

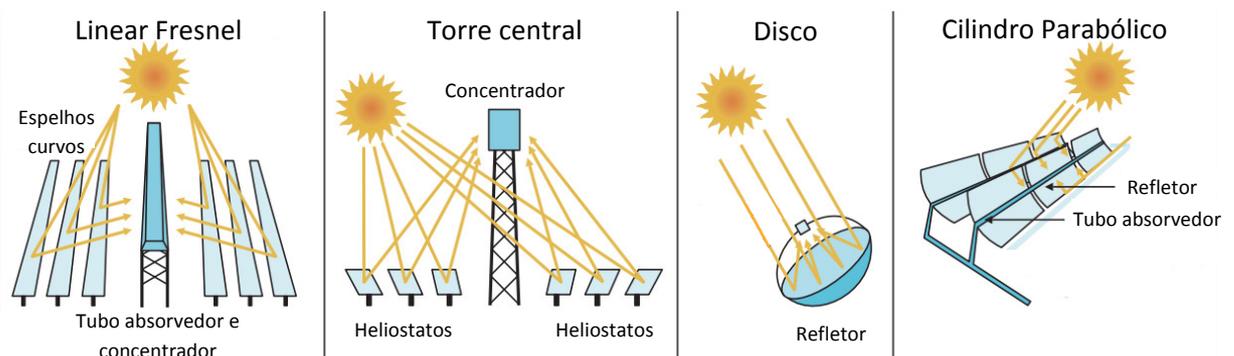


Figura 11: forma de concentração de cada tipo de CSP
Fonte: adaptado de IEA (2014).

O FC é a equivalência de energia concentrada em relação à placa plana com as mesmas características. Segundo a *Solar Thermal Energy* (2017), instituição que representa grandes empresas da área de energia solar, a concentração máxima teórica para sistemas com foco linear é de 212:1, enquanto no foco pontual o valor atinge os 44.000:1, mas as tecnologias trabalham, atualmente, com valores em torno de 121:1 e 1.000:1, respectivamente.

Os limites de concentração reais que foram citados estão atrelados, em grande parte, à limitação de materiais que podem operar a elevadas temperaturas. Por exemplo, CSP do tipo disco podem alcançar temperaturas superiores aos 1500°C, mas, segundo Espargilliere et al. (2017), mesmo com os grandes avanços tecnológicos sobre os materiais, os CPS comerciais

com foco em linha estão limitados a valores em torno de 400°C e de foco pontual a valores em torno de 800°C.

No atual estágio de desenvolvimento da energia heliotérmica, os sistemas em operação são voltados, em sua grande maioria, à produção de energia elétrica. Mas o uso com o objetivo final de produzir energia térmica, conforme descritos por Sharma et al. (2017), Savsani et al. (2017), Fernandez-García et al. (2017), Ortega-Delgado et al. (2016) e Gauché et al. (2017), também vem ganhando espaço nas indústrias, pois o sistema heliotérmico pode ser acoplado a qualquer tipo de processo que demande energia térmica para a sua produção.

Segundo Sharma et al. (2017), o uso da energia solar térmica na indústria ainda é tímido e equivale a uma área espelhada de 140.600m², existindo apenas 18 usinas com o campo solar acima dos 1.000m². Entretanto, as usinas para a produção de eletricidade já apresentam áreas maiores que 400.000m² desde a década de 80, como é o caso das usinas SEGS (*Solar Electric Generating System*) VIII e IX que foram instaladas em 1989-1990 na Califórnia e apresentam 464.340 e 483.960m² de campo solar, respectivamente (BAHAROON et al., 2015).

Apesar dos sistemas de grande porte que foram mencionados, após o ano de 2006 a construção de sistemas heliotérmicos cresceu expressivamente em número e capacidade, existindo plantas com área de 2.200.000m² como é o caso da usina Phoenix no Arizona que iniciou a sua operação em 2013 (BAHAROON et al., 2015).

Para atender às usinas em construção os CSP de mercado são do tipo disco, Fresnel e cilindro parabólico (SHARMA, 2017), sendo o último o mais difundido e que representa a maior parcela dos CSP instalados, pois são os mais maduros e economicamente viáveis para operações entre 150 e 400°C, principalmente quando acoplados a sistemas TES (BAHAROON et al., 2015; DUFFIE, BECKMAN, 2013; BELLO et al., 2017).

Juntos aos CSP, os TES se mostram extremamente importantes para equalizar a produção com a demanda de energia nos sistemas heliotérmicos, pois a intermitência da radiação solar não permite a produção contínua de energia sem o uso dos sistemas de armazenamento (BELLO et al., 2019; GAUCHÉ et al., 2017; DUFFIE, BECKMAN, 2013).

Diante do vasto emprego do CSP cilindro parabólico e da importância do TES nos sistemas heliotérmicos, ambos os assuntos serão abordados a seguir.

2.4.1 CSP cilindro parabólico

Os CSP cilindro parabólico são dominantes no mercado, sendo o principal modelo empregado nas usinas de energia heliotérmica no mundo (GAUCHÉ et al., 2017). Segundo Baharoon et al. (2015) e Duffie e Beckman (2013), a hegemonia deste tipo de CSP ocorre pelo extensivo estudo, teórico e experimental, de suas propriedades e aplicações nas usinas SEGS.

Os levantamentos feitos por Baharoon et al. (2015) confirmam o domínio de tal tecnologia, pois 95,7% da eletricidade produzida no mundo a partir de fontes heliotérmicas são provenientes de CSP cilindro parabólico, sendo que a primeira planta em operação comercial ocorreu em 1984 e, atualmente, a Espanha é a líder com 40 usinas e os EUA com 10 plantas.

A principal característica deste CSP é que a área espelhada apresenta o formato de calha cilíndrica e um perfil em parábola, além do receptor solar na forma de tubo que percorre toda a extensão longitudinal do concentrador, conforme ilustra a Figura 12.



Figura 12: CSP cilindro parabólico da UNIFEI (A) e a sua representação didática (B).

Fonte: imagem à esquerda: produção do próprio autor; imagem à direita: adaptado de NREL (2001).

O CSP cilindro parabólico direciona a radiação solar para o tubo receptor que transfere o calor para o HTF. O receptor, normalmente metálico e com revestimento especial, é protegido por um tubo de vidro que tem o objetivo de permitir a evacuação do ar entre os tubos (GAUCHÉ et al., 2017). O vácuo entre os tubos produz uma atmosfera isolante termicamente que reduz as perdas por condução e convecção e torna o sistema mais eficiente.

De acordo com Gauché et al. (2017), normalmente os CSP cilindro parabólico usam o óleo térmico como HTF para operação em torno dos 390°C, enquanto os sistemas de TES podem ser operados com sais fundidos. Entretanto, estes tipos de CSP podem ser operados, em menores escalas, com água líquida fazendo a função de HTF e para grande porte, segundo

Müller et al. (2014) e Baharoon et al. (2015), já existem tecnologias que operam com água-vapor e sais fundidos. Para o tipo de CSP mencionado, a Tabela 10 reúne as principais características e estado da arte para diferentes escalas.

Tabela 10: características operacionais e estado da arte de CSP cilindro parabólico.

| Ponto avaliado | Pequena escala | | Média escala | | Grande escala | |
|---------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 1 a 2 metros de largura | | 2 a 5 metros de largura | | 5-8m largura | |
| HTF | Óleo Térmico | Água e Vapor | Óleo Térmico | Vapor Direto | Sais Fundidos | Óleo Térmico |
| Estado da Arte | Comercial (2008) | Comercial (2004) | Comercial (1984) | Comercial (2012) | Comercial (2010) | Protótipo (2009) |
| T_{\min} (°C) | < 0 | 100 | < 0 | 100 | 142 | < 0 |
| T_{\max} (°C) | 390 | 250 | 390 | 500 | 535 | 390 |
| Pressão (bar) | 15 | 40 | 30 | 110 | 1 | 30 |
| Área (m^2/MW_i) | 3.000 | 3.000 | 3.600 | - | 4.000 | 3.100 |
| Potência (MW_i) | 0,05 a 20 | 0,05 a 20 | 20 a 1.000 | 20 a 1.000 | 20 a 1.000 | 200 a 1.000 |
| TES | Água | Água | Sal Fundido | Água | Sal Fundido | Sal Fundido |

Fonte: Müller et al. (2014).

De acordo com Kalogirou (2014) e Abdulhamed et al. (2018), os CSP cilindro parabólicos são caracterizados como uma tecnologia de baixo custo para processos que exigem temperaturas do HTF de até 400°C, sendo mais comum o seu emprego para cobrirem aplicações que operam entre 60 e 300°C, de acordo com Sharma et al. (2017), e 120 a 250°C, segundo Fernández-García et al. (2015).

O CSP cilindro parabólico tem a característica usual de apresentar o rastreamento em um eixo e podem ter uma eficiência térmica final de até 65% (BELLOS, 2019), mas que normalmente varia entre 50 e 65% (FERNANDEZ-GARCÍA et al., 2017; BELLO et al., 2017; Wirz et al., 2014; ABDULHAMED et al., 2018).

2.4.2 Sistema de armazenamento de energia térmica

Os TES são acoplados aos CSP para o armazenamento da energia térmica excedente que foi produzida durante o dia, permitindo o seu posterior uso nos horários de menor ou nenhuma radiação solar (DUFFIE, BECKMAN, 2013).

Diante da intermitência que é característica da energia solar e de outras fontes renováveis, o TES se torna um item indispensável aos sistemas CSP, permitindo a produção de energia de forma estável, flexível e segura, principalmente para as usinas em regiões com clima instável (JU et al., 2017; PETROLLESE et al., 2017).

O TES também permite, segundo Valenzuela et al. (2017), alinhar a oferta de energia com as demandas dos usuários, independente do recebimento de quantidades adequadas de radiação solar no momento da demanda. Por exemplo, a Figura 13 ilustra, em função da irradiação normal direta ou *direct normal irradiation* (DNI), a produção de energia heliotérmica em sistemas projetados com TES para suprir a produção em 0, 1, 6 e 15 horas.

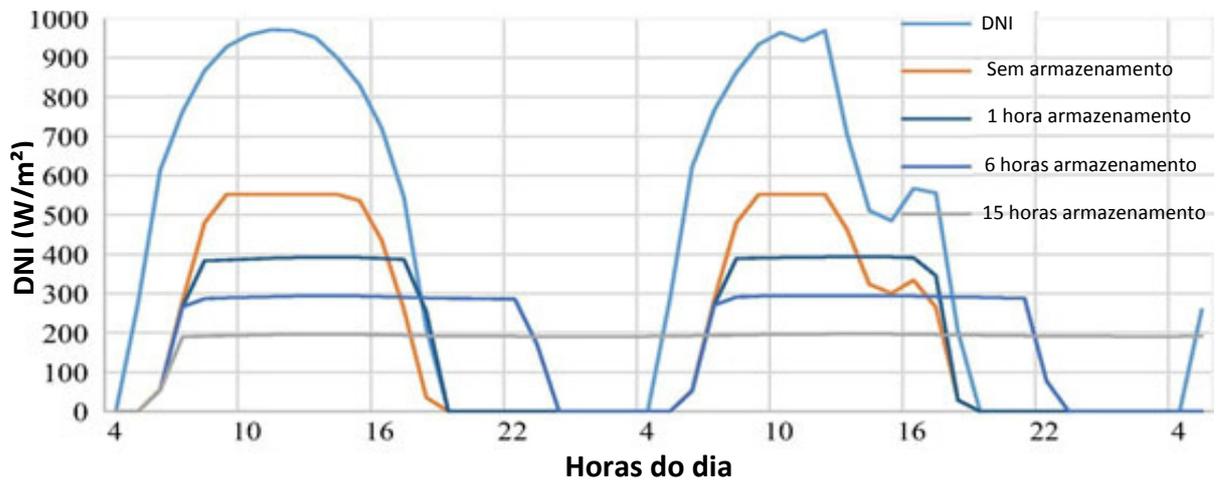


Figura 13: comportamento de sistemas CSP com e sem TES em dois dias com distintas DNI.

Fonte: adaptado de Gauché et al., 2017.

Nota-se que o TES pode ser projetado com autonomia para atender sistemas com operação contínua e sistemas que não demandam operar além do período diurno. Portanto, poucas horas de armazenamento já são suficientes para estabilizar a produção de energia em relação a pequenas flutuações da radiação solar.

Um importante parâmetro que é influenciado pelo TES é o múltiplo solar do campo heliotérmico, este parâmetro mostra a relação entre a capacidade de produção do campo solar em relação à demanda de energia do sistema. Segundo Gauché et al. (2017), quanto maior o TES de uma usina, maior será o múltiplo solar adotado. Enquanto sistemas sem TES, mas que buscam uma operação na condição nominal ao longo do dia, apresentam múltiplos solares variando entre 1,1 a 1,5 para compensar a menor radiação solar no início e término do dia.

Sistemas de energia heliotérmica de grande porte e sem TES ainda podem, por alguns minutos, se manter estáveis quando a radiação solar é reduzida, pois estes sistemas apresentam considerável inércia térmica (GAUCHÉ et al., 2017).

Por fim, o TES gera uma grande vantagem para a energia heliotérmica, pois permite armazenar a energia excedente em horários com elevada disponibilidade solar para o posterior uso em períodos de menor ou nenhuma radiação, gerando estabilidade e continuidade aos processos que fazem uso de fonte solar concentrada.

2.4.3 Demanda de água para a limpeza dos CSP

Apesar dos CSP serem considerados como uma tecnologia renovável, os mesmos ainda apresentam alguns impactos ambientais que devem ser avaliados, podendo se destacar a grande demanda de água para a limpeza da área espelhada.

O levantamento de indicadores do processo heliotérmico, por Baharoon et al. (2015), mostra um consumo de água por energia elétrica produzida, dependendo da tecnologia empregada, variando de 0,2 a 3,4 $\text{m}^3.\text{MWh}_e^{-1}$, faixa condizente com os valores descritos de $0,28\text{m}^3.\text{kWh}_e^{-1}$ por SOLWATT (2019) e 0,3 a $0,7\text{L}.\text{m}^{-2}$ por Fernández-García *et al* (2014), sendo que o último foi aplicado apenas para a limpeza da área espelhada dos CSP do tipo cilindro parabólico.

Entretanto, tal demanda hídrica pode ser suprida por água não potável recuperada de outros processos produtivos. Por exemplo, pode-se recuperar a água vaporizada durante a secagem de lodo sanitário, a partir da sua condensação, e fazer o uso da mesma para a limpeza dos CSP, desde que a planta heliotérmica esteja acoplada ou próxima ao sistema de secagem.

Com base na discussão levantada desde a introdução até este ponto, pode-se considerar que a secagem térmica em baixas temperaturas de lodo sanitário, quando acoplada a uma planta heliotérmica, pode ser uma oportunidade de desenvolver um processo que vai ao encontro da sustentabilidade nos seus mais amplos aspectos. Portanto, a possibilidade do acoplamento destas duas tecnologias é discutida ao longo do próximo subtópico.

2.5 ENSAIO SOBRE O MÉTODO DO LEITO GRANULAR

Os secadores mecânicos de lodo são baseados nas leis da termodinâmica e empregam, com destaque, o fenômeno de transferência de calor e massa entre corpos. Quando o lodo é submetido ao aquecimento com o objetivo de reduzir o seu teor de umidade, o mesmo recebe uma grande quantidade de energia térmica para aumentar a temperatura e gerar a mudança do estado físico de líquido para vapor.

Esses equipamentos de secagem trabalham, normalmente, com o princípio da transferência de energia de modo convectivo em secadores diretos e de modo condutivo em secadores indiretos. A energia é transferida da fonte quente (agente secante ou paredes do secador) para a fonte fria (lodo úmido), gerando um aumento de temperatura para a vaporização da água. Entretanto, os secadores induzem o lodo a temperaturas muito superiores a necessária para a vaporização, pois buscam maiores taxas de secagem através de elevadas temperaturas.

Neste contexto, pode ser considerado que o primeiro objetivo dos secadores mecânicos é transferir energia, sendo a transferência de massa de vapor d'água para o ar uma consequência do processo, igualmente ao alcance ou não do estado de saturação do ar na saída do secador.

Em contrapartida, o método do leito granular que é proposto por este estudo mostra que a secagem de lodo pode ser realizada em baixas temperaturas, desde que o objetivo principal do secador seja a transferência de massa e não de energia, buscando transferir a água líquida presente no lodo para o ar de secagem, até que o último atinja o ponto de saturação.

A teoria de que secadores podem operar em baixas temperaturas, inclusive com o lodo e o ar de secagem em iguais estados térmicos, parte da observação e estudo dos princípios de operação dos equipamentos de resfriamento evaporativo. Estes apresentam no seu principal objetivo a transferência de massa entre a água e o ar, resultando, para a última substância, a redução de temperatura e aumento da umidade relativa. Entretanto, ao observar por outro ponto de vista, tal método também pode ser aplicado com o objetivo de extrair água presente em um meio poroso para reduzir a sua umidade, tornando-se um processo de secagem.

Aplicando o último conceito descrito para a secagem térmica de lodo e partindo da hipótese que o objetivo principal seria a transferência de massa e não de energia, observa-se que, ao induzir um fluxo de ar não saturado através do lodo úmido, transferindo a água presente no sólido para o ar e deixando o último sair no limite da condição de saturado, tal processo permitiria a secagem do lodo e tornaria o mesmo, nesta hipótese, o meio poroso do clássico processo de resfriamento evaporativo e o ar apenas um agente de secagem.

Tal teoria pode ser observada na Figura 14 que ilustra uma adaptação do processo de resfriamento evaporativo para a secagem de lodo em baixas temperaturas, mas com a substituição do clássico meio poroso por um leito granular que poderia ser formado pela mistura de lodo úmido com lodo seco granulado.

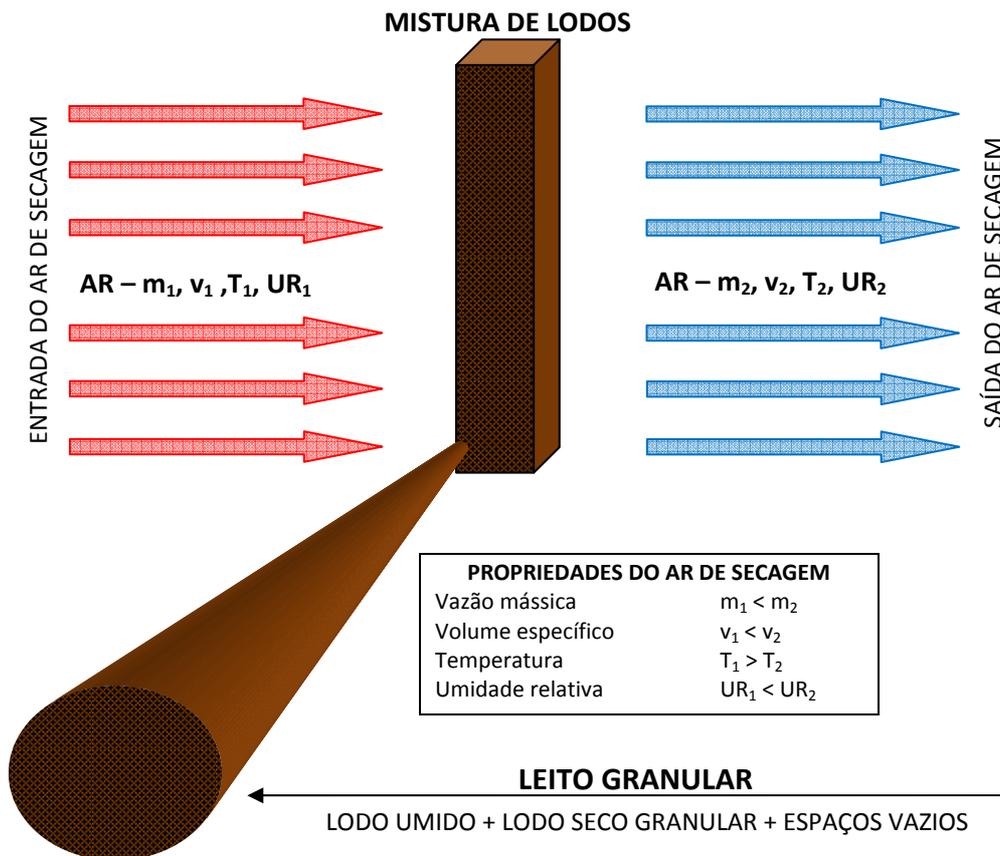


Figura 14: representação da secagem de lodo com base no processo de resfriamento evaporativo.
Fonte: produção do próprio autor.

2.5.1 Associação entre a secagem em baixa temperatura e a energia solar

Para o método do leito granular o emprego de uma fonte térmica para aumentar a temperatura do ar de secagem, levemente acima da temperatura do lodo, pode apresentar três significativos ganhos sobre o processamento, conforme descrito a seguir.

- 3 Aumentar a capacidade do ar em absorver o vapor d'água pela elevação da temperatura;
- 4 Reduzir a vazão de ar de secagem em virtude do aumento de sua capacidade de absorção (reduz o porte e custos de instalação e operação dos equipamentos);
- 5 Aumentar as chances de se obter, além da secagem, a completa higienização quando for possível elevar a temperatura do lodo a valores acima dos 70°C.

Por exemplo, considerando que o processo de secagem térmica é realizado com a vazão mássica de 1 kg.s^{-1} de ar ao nível do mar e com temperatura de 25°C e UR de 80%. Ao aquecer o referido ar para a temperatura de 35°C ocorre um aumento na sua capacidade de absorção de vapor d'água em 82%. Caso a temperatura fosse elevada até os 80°C esse ganho

chegaria aos 2.641%, reduzindo a umidade relativa inicial de 80% para, respectivamente, 44% e 3% ao final dos dois aquecimentos citados, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11: capacidade de absorção de vapor d'água no ar seco ao nível do mar para uma vazão de $1\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

| Temperatura (°C) | Capacidade de Absorção ¹ (g vapor/s) | Varição da capacidade em relação à referência | UR |
|---------------------|--|--|-----|
| 25°C | 20,169 | REFERÊNCIA | 80% |
| 35°C | 36,754 | 82% | 44% |
| 45°C | 65,408 | 224% | 25% |
| 60°C | 153,532 | 661% | 11% |
| 70°C | 279,149 | 1.284% | 6% |
| 80°C | 552,894 | 2.641% | 3% |

Nota: I: com base na vazão mássica de $1\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ de ar nas condições de referência que foram descritas.

Fonte: produção do próprio autor.

Os autores Murthy (2009) e Dincer e Sahin (2004) descrevem que o aquecimento do ar, utilizado na secagem de produtos alimentícios, é empregado para acelerar a evaporação da água, conseguindo maiores taxas de secagem em comparação ao uso do ar nas condições ambientes. De forma similar, os ensaios de secagem de Deng et al. (2015) comprovaram que, quanto mais elevado for a temperatura do ar, menor será o tempo para a secagem do lodo.

Considerando que é necessário um pequeno aumento da temperatura do ar para obter ganhos consideráveis na sua capacidade de secagem, somado ao fato que a secagem de grãos e outros gêneros alimentícios são realizados com a energia solar a décadas, entende-se que é possível construir uma relação entre a energia solar e secagem em baixa temperatura de lodo sanitário.

Nos experimentos realizados por Salihoglu et al. (2006) foi desenvolvido um secador solar de lodo, do tipo estufa, que apresenta um sistema de ventilação forçado para que o ar externo, ao entrar no sistema, eleve a temperatura e reduza a UR. Tal ação de renovação da atmosfera do secador tem por objetivo a manutenção de baixos valores de UR do ar para garantir boas taxas de secagem, pois o ar mais seco provoca o aumento da velocidade de vaporização da água.

O aquecimento do ar, para a secagem térmica em baixas temperaturas, vai além da ampliação da umidade absoluta de saturação e no fornecimento de calor ao material que será seco. O aquecimento também proporciona um expressivo aumento da propriedade higroscópica do ar em virtude do aumento exponencial do gradiente de pressão da água entre o ar e o lodo, potencializando, assim, a eflorescência no lodo, que consiste na característica que algumas substâncias hidratadas possuem de liberar espontaneamente a água para o ar.

A Figura 15 mostra como a pressão de saturação de vapor d'água cresce numa taxa exponencial e, por consequência, o gradiente de pressão entre a água no lodo e o vapor d'água presente no ar acompanha a mesma proporção de variação para um sistema estacionário.

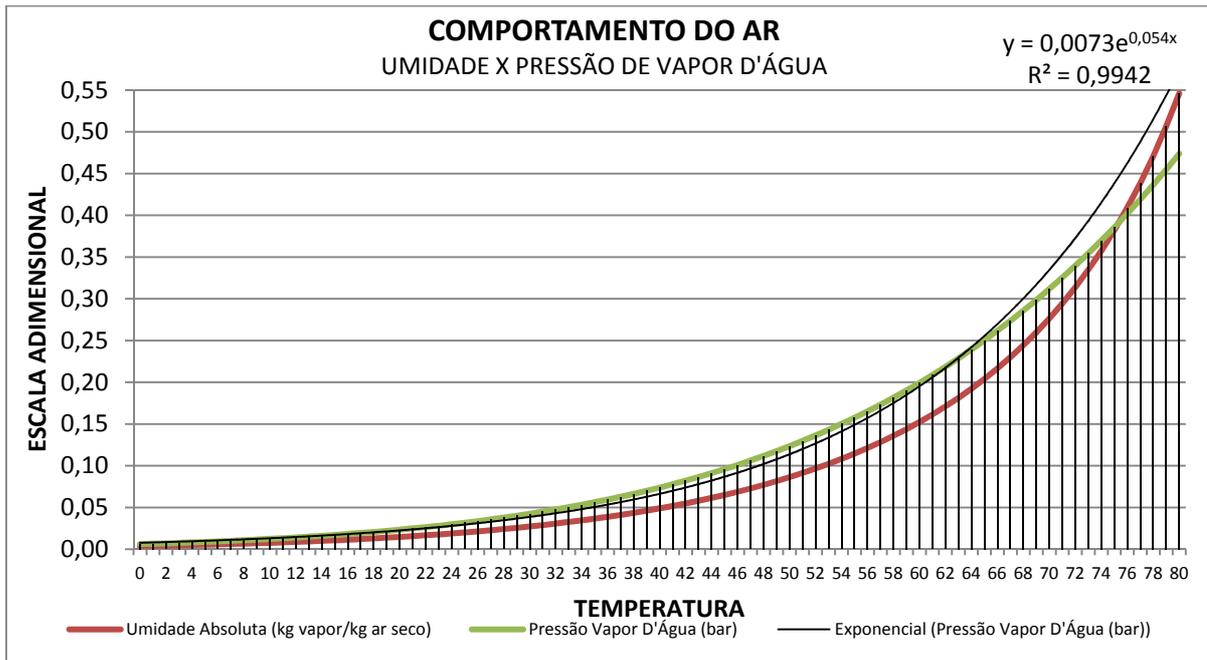


Figura 15: curva de umidade e pressão parcial do vapor d'água em função da temperatura.

Nota: a pressão do vapor d'água foi obtida a partir do *Software Steam Table*®.

Fonte: produção do próprio autor.

Para Deng et al. (2015), a taxa de secagem do lodo é proporcional à diferença de umidade entre o material e o ar, sendo essa diferença a força motriz responsável pela difusão da água ao longo do perfil do lodo. Por exemplo, Luboschik (1999) ao descrever um sistema de secagem de lodo com aproveitamento de energia solar, localizado na Alemanha, afirmou que os melhores resultados de secagem foram obtidos com o lodo aquecido e o ar mais seco.

A literatura tem fortes evidências que a secagem de lodo a partir de energia solar é eficaz e ainda deve ser investigada para novos desenvolvimentos, por exemplo:

- Haralambopoulos et al. (2002) operaram um secador solar com temperaturas de 54°C e elevaram o teor de ST do lodo de 0,2% para, aproximadamente, 35%;
- Bux et al. (2002) alcançaram variações de 3,0 a 93,0% de ST no lodo submetido à secagem solar com o ar de secagem atingindo até 50°C acima da temperatura ambiente;
- Gill, Singh e Pal Singh (2012) alcançaram a secagem de 46,0% para 91,7% de ST para o fosfato de cálcio num secador solar que alcançou temperaturas na ordem de 60°C;

Correlacionando a secagem térmica em baixas temperaturas com a higienização, pode-se afirmar que a partir de 60°C a completa eliminação de patógenos poderá ser alcançada para atender aos padrões de higienização, que são definidos na Resolução de nº375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil, para uso do lodo na agricultura. Somado a

isso, torna-se ainda mais eficiente à higienização quando a temperatura atinge os 80°C, pois o tempo necessário para a completa eliminação dos patógenos é da ordem de minutos.

A última relação de temperatura e tempo de exposição foi confirmada na Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) por Andreoli e Bonnet (2000). Os referidos autores submeteram o lodo de origem anaeróbia em leitos de secagem cobertos por estufa, alcançando a higienização para ovos viáveis de Helintos com exposição de 50 °C em 48 horas, 60 °C em 6 horas e 80 °C em 5 minutos. Também são notáveis os resultados de Arce (2009) e Barés (2010) que observaram uma considerável redução da quantidade de microorganismos quando analisaram amostras de lodo que foram submetidos a tratamento térmico em temperaturas de 50, 60 e 70°C em intervalos de tempo de, respectivamente, 90, 60 e 30 minutos.

Outras pesquisas também identificaram bons resultados de higienização em baixas temperaturas, por exemplo:

- Aroza e Kazmi (2015) ao pesquisarem o tratamento de esgoto, em sistemas de vermicompostagem, alcançaram a eliminação de 96,9% de *Salmonellas sp.* e 99,3% de *Escherichia Coli* para a faixa de 38 a 40°C, higienização não observada entre 25 a 27°C;
- Pecson et al. (2007) realizaram experimentos para a higienização de lodo sanitário submetido a diversas temperaturas, resultando na eliminação da viabilidade de 99% dos ovos de *Ascaris sp.* a 50°C e em 100 minutos de exposição das amostras, enquanto para as temperaturas de 40, 30 e 20°C o tempo para a inativação foi na ordem de dias;
- Serenotti (2009) observou em amostras de lodo, semelhante ao caso acima, a eliminação de microorganismos em temperaturas de 60°C a partir de 60 minutos;
- Passamani, Keller e Gonçalves (2002) relatam a completa eliminação da viabilidade dos ovos de helmintos em amostras de lodo anaeróbio que foram pasteurizadas a 70°C.

Portanto, a temperatura de 80°C pode ser mais interessante por associar a secagem e higienização de lodo com alta taxa, pois o tempo necessário para a higienização é reduzido e a taxa de transferência de água é ampliada em conjunto com a capacidade de absorção do ar.

Como consequência de uma secagem térmica em baixas temperaturas, é possível vislumbrar o acoplamento da energia heliotérmica aos secadores mecânicos de lodo, sendo um caminho para o desenvolvimento de uma tecnologia de tratamento que seja eficiente, eficaz e segura, mas, ainda assim, com baixo custo de operação e que colabore para que as estações de tratamento de esgoto sejam autossustentáveis energeticamente.

CAPITULO 3 – METODOLOGIA

3.1 DELINEAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

O lodo empregado neste estudo é proveniente da etapa de centrifugação da ETE Mulembá I, localizada no município de Vitória, Espírito Santo. Uma visão da estação e do local de produção e armazenamento do lodo é apresentada na Figura 16.



Figura 16: vista da ETE Mulembá I.
Fonte: produção do próprio autor.

A unidade possui configuração do tipo Lodo Ativado, faz uso da tecnologia belga de denominação *UNITANK* e é considerada uma estação de grande porte com a capacidade de atender a uma população de 74.791 habitantes e tratar a vazão média de 204 L.s^{-1} de esgoto sanitário. Somada a isso, a sua instalação pertence à Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) e a operação, manutenção e monitoramento ambiental são realizados por empresa privada terceirizada.

A referida estação é tomada como exemplo para este estudo devido à existência de boa infraestrutura para a coleta do lodo centrifugado, além da autorização de acesso obtida da CESAN. No entanto, este estudo pode ser replicado para outras ETE, de diferentes portes, tipos e tecnologias de tratamento.

3.2 DELINEAMENTO DO ESTUDO

A presente pesquisa busca avaliar a integração da tecnologia CSP como fonte de energia térmica para realizar a secagem, em baixas temperaturas, de lodo sanitário. Dentre os resultados desta avaliação, espera-se destacar a viabilidade energética de tal concepção de projeto, além de fornecer indicadores de dimensionamento para um sistema real.

O modelo termodinâmico desenvolvido é um aprimoramento, do modelo de secagem desenvolvido por Peterli (2015), para integrar a energia térmica produzida por um sistema heliotérmico com a energia demandada para a secagem de lodo sanitário em secador mecânico pelo método do leito granular.

O modelo termodinâmico aprimorado trabalha com transferência de massa e energia em baixas temperaturas, recirculação e regeneração de calor e umidade do fluído de secagem (ar), além do controle das características reológicas do lodo.

O estudo é composto, junto ao modelo termodinâmico, por uma pesquisa documental sobre as características do processo de tratamento que originou o lodo e dados climáticos do local de estudo, além de ensaios experimentais de caráter investigativo para caracterizar o lodo sanitário coletado e processado durante a secagem térmica.

Ainda dentro da abrangência deste estudo, é considerado o lodo como uma mistura de matéria seca e água líquida, sendo denominado de “lodo úmido”, enquanto os termos “lodo seco” e “água líquida” são as denominações dadas às partes, respectivamente, sólida e líquida que estão presentes no lodo úmido ou de forma pura no sistema. Somada às definições apresentadas, a caracterização experimental faz referência ao termo “lodo centrifugado” para o lodo coletado na ETE Mulembá I, “lodo tratado” para o lodo que é submetido à secagem térmica experimental e está na condição de seco, e “lodo misturado” para a mistura de lodo tratado com lodo centrifugado em diferentes proporções.

3.3 OBTENÇÃO DOS DADOS

A alimentação do modelo termodinâmico de secagem de lodo (MTSL) é realizada por dados coletados sobre a ETE Mulembá I e as condições climáticas na sua localidade, além dos dados provenientes da caracterização experimental do lodo.

Para os dados climatológicos, os mesmos são provenientes dos bancos de dados gratuitos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), além de estudos científicos publicados na área. Enquanto os dados e amostras do lodo centrifugado são provenientes da Mulembá I, sendo coletadas com a empresa privada que realiza a gestão da estação, após a prévia autorização da divisão de pesquisas da CESAN,

3.3.1 Dados climatológicos

São coletadas, para definir as condições de referência do MTSL e fornecer parte dos dados de entrada do sistema heliotérmico, as seguintes informações sobre o ar atmosférico no município em que a ETE Mulembá I fica localizada:

- *Direct Normal Irradiation* (DNI) ou Irradiação Solar Normal Direta (kJ.m^{-2});
- Umidade relativa do ar atmosférico (%);
- Temperatura de bulbo seco do ar atmosférico ($^{\circ}\text{C}$);
- Pressão absoluta da atmosfera (bar).

Todos os dados coletados são com base horária e com período anual, sendo originados na estação meteorológica automática A-612 que pertence ao INMET e fica localizada no município de Vitória.

3.3.2 Dados coletados sobre o lodo centrifugado

Os dados do lodo centrifugado são constituídos por informações coletadas durante três visitas técnicas realizadas na ETE Mulembá I, além dos dados extraídos do manual de operação da estação para a caracterização da unidade e da sua produção de lodo, conforme descrito a seguir:

- Vazão mássica de lodo úmido produzido (kg.s^{-1});
- Teor de ST ou umidade no lodo centrifugado nas condições de projeto (%);
- Capacidade de tratamento de esgoto prevista em projeto;
- Fluxograma das etapas de produção do lodo.

Para este estudo é definido que toda referência ao termo “teor de umidade” ou “teor de ST” presente no lodo sempre é com base úmida.

3.3.3 Caracterização do lodo

A caracterização do lodo estudado neste trabalho é realizada pela descrição da coleta e preparo das amostras, somado aos resultados obtidos nos ensaios experimentais, conforme listado a seguir:

- I. Coleta e preparo das amostras que são compostas por 4 etapas:

- Coleta de lodo centrifugado na ETE Mulembá I;
 - Tratamento de parte do lodo coletado sobre chapa aquecida e em estufa;
 - Destorroamento do lodo tratado sobre chapa aquecida;
 - Mistura de lodo destorroado e lodo centrifugado para formar o lodo misturado com diferentes teores de ST.
- II. Caracterização morfológica e de suas propriedades que são compostas em 4 etapas:
- Granulométrica;
 - Estereomicroscopia;
 - Relações massa-volume;
 - Permeabilidade ao ar.
- III. Caracterização da tensão de adesão superficial (TAS);
- IV. Caracterização da umidade residual do lodo (URL) e umidade de equilíbrio (UE);
- V. Caracterização da relação tempo-temperatura de secagem;
- VI. Caracterização das taxas de secagem que são compostas em 2 etapas:
- Taxas de secagem no secador experimental;
 - Comparação entre métodos de secagem.

Por fim, é realizada uma avaliação holística dos resultados para definir:

- O teor de ST mais adequado que o lodo misturado deve apresentar na entrada do secador no MTSL (com base nos experimentos I, II, III e VI);
- O teor de ST mais adequado que o lodo tratado deve apresentar na saída do secador no MTSL (com base no ensaio IV);
- A temperatura de secagem mais adequada para o MTSL desenvolvido (com base no ensaio V).

Os ensaios descritos são realizados com técnicas e em laboratórios distintos, conforme são apresentados nos próximos subtópicos.

3.3.3.1 Coleta e preparo das amostras

A coleta e o transporte do lodo centrifugado são realizados pelo autor. O material coletado é transportado para uma área rural no Espírito Santo, onde ocorre a secagem térmica de parte do lodo coletado sobre uma chapa aquecida e utilizando lenha residual como fonte térmica.

O objetivo desse primeiro tratamento é o de produzir lodo seco para realizar a mistura com o lodo centrifugado e gerar um material com diferentes teores de ST para a etapa de caracterização. Somada a isso, a secagem inicial também objetiva a redução do volume e massa de parte do material, pois a próxima etapa é constituída pelo transporte do lodo para o Laboratório de Energia Heliotérmica (LEH) da UNIFEI, no estado de Minas Gerais.

Posteriormente ao transporte do lodo para Minas Gerais, é realizada a secagem de 10kg de lodo centrifugado a 80°C, na estufa elétrica da fabricante Nova Ética e modelo E400 que fica instalada no laboratório de caracterização de gases combustíveis (LCGC) do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST) da UNIFEI.

Tal secagem tem como base o método 2540C descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), mas que é adaptado para a secagem na temperatura de 80°C. Somado a isso, essa secagem é realizada para permitir a caracterização granulométrica do lodo tratado por diferentes métodos.

Por fim, é misturado o lodo tratado sobre a chapa aquecida e lodo centrifugado para obter um material com os teores de ST variando de 20 a 90% com intervalos de 10%.

3.3.3.2 Granulometria

Para compreender como a mistura de lodo tratado e centrifugado e o método de secagem influenciaram no diâmetro final das partículas, são realizadas as análises de distribuição e classificação granulométrica, além do módulo de finura (MF), para os seguintes materiais.

- Lodos com os teores iniciais de 20 a 90% de ST que são submetidos à secagem térmica no secador experimental (método do leito granular);
- Lodo centrifugado que é submetido à secagem térmica no secador experimental (método do leito granular) e em estufa (método convectivo);
- Lodo centrifugado (não destorroado e destorroado) que é submetido à secagem sobre chapa aquecida.

O ensaio da distribuição granulométrica, além do cálculo do MF, seguiu a NBR 7217, determinação da composição granulométrica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo a determinação realizada com as peneiras de malhas padronizadas, variando de 0,075 até 25mm de abertura, de fabricante Bertel, e que estão no Laboratório de Geotécnia do Instituto de Recursos Naturais (IRN) da UNIFEI, conforme mostrado na Figura 10.



Figura 17: conjunto de peneiras com a base vibratória para o ensaio de granulometria.
Fonte: produção do próprio autor.

Para o cálculo do Módulo de Finura, emprega-se a Equação 2.

$$MF = \frac{\sum p_{pp}}{100} \quad (2)$$

Sendo:

MF: módulo de finura, adimensional;

P_{pp}: percentuais acumulados nas peneiras padronizadas, %.

Por último, é realizada a classificação granulométrica das partículas de acordo com o sistema unificado de classificação dos solos que é descrito por BRAJA (2011).

3.3.3.3 Estereomicroscopia

Para visualizar a interação superficial entre a mistura de lodo tratado e centrifugado, além das características dos grãos seco obtidos na secagem experimental, é realizado o ensaio no estereomicroscópio da fabricante Nikon, modelo SMZ745, ampliação de 0,67-5,0 vezes e que fica instalado no laboratório de Zoologia do IRN da UNIFEI, conforme ilustra a Figura 18.



Figura 18: estereomicroscópio empregado na visualização dos grãos de lodo seco.
Fonte: produção do próprio autor.

As amostras são acondicionadas em placas de Petri com papel milimetrado ao fundo, permitindo a identificação e avaliação visual das principais características morfológicas presentes na sua estrutura superficial.

3.3.3.4 Relações massa-volume

O lodo constitui um sistema trifásico formado de sólidos, água e ar, sendo as relações massa-volume uma importante forma de compreender a mudança desse sistema durante a mistura de lodos. Desta forma, este estudo ensaia e determina a massa específica aparente (MEA), real (MER) e índices de vazios (IV) a partir das Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$\gamma = \left(\frac{m_{\text{lodo}}}{V_{\gamma\text{-lodo}}} \right) \cdot 1000 \quad (3)$$

$$\rho = \left(\frac{m_{\text{lodo}}}{V_{\rho\text{-lodo}}} \right) \cdot 1000 = \left[\frac{m_{\text{lodo}}}{(V_{\text{frasco}} - V_{\text{água}})} \right] \cdot 1000 \quad (4)$$

$$e = \frac{(V_{\gamma\text{-lodo}} - V_{\rho\text{-lodo}})}{V_{\rho\text{-lodo}}} \quad (5)$$

Sendo:

γ : massa específica aparente, kg.m^{-3} ;

ρ : massa específica real, kg.m^{-3} ;

m_{lodo} : massa do lodo acionada na vidraria da MEA, g;

$V_{\gamma\text{-lodo}}$: volume da vidraria utilizada para a MEA, mL;

$V_{\rho\text{-lodo}}$: volume real do lodo, mL;

V_{frasco} : volume da vidraria utilizada para a MER, mL;

$V_{\text{água}}$: volume de água adicionada na vidraria da MER, mL;

e : índice de vazios, adimensional.

Os ensaios são realizados no LCGC do NEST-UNIFEI e seguem os procedimentos descritos na NBR NM 52 e conceitos abordados por Braja (2011).

3.3.3.5 Permeabilidade do lodo ao ar

Para o método de secagem em leito granular, defendido neste estudo, a permeabilidade é uma propriedade importante para obter a ampliação da área de contato entre lodo-ar e alcançar maiores taxas de secagem em comparação ao método convectivo.

Diante disso, ensaios de permeabilidade ao ar são realizados no Laboratório de Energia heliotérmica (LEH) da UNIFEI com o aparato experimental construído por um tubo de PVC de 75mm de diâmetro interno com 4,5m de extensão, sendo o lodo acondicionado sobre um leito construído com tela metálica de abertura 6x3mm (formato de losango) e numa posição intermediária de 1,9m em relação ao início do tubo, garantindo 25 diâmetros a montante e 35 diâmetros a jusante do leito de lodo.

Os ensaios são realizados à pressão constante, sendo aplicadas três pressões diferentes sob um leito de 100mm de altura. A Figura 19 mostra o aparato experimental pré-montado e o leito de suporte do lodo que é utilizado no ensaio.



Figura 19: aparato de permeabilidade pré-montado (esquerda) e leito do lodo (direita).

Fonte: produção do próprio autor.

A vazão no ensaio é determinada a partir de uma tríplice medição da velocidade do fluxo de ar com o anemômetro de marca *Hold Peak* e modelo HP-866A, apresentado na Figura 20, que é acoplado no bocal de saída do aparato experimental.



Figura 20: anemômetro utilizado na medição de vazão no ensaio de permeabilidade do lodo ao ar.
Fonte: produção do próprio autor.

A partir das velocidades dos fluxos, as vazões são calculadas pela equação da continuidade e corrigidas para 20°C e 1,013bar com o auxílio da equação de estado do gás ideal. Para a medição de temperatura é utilizado o termômetro digital de haste metálica da marca *Equitherm*, modelo 315FM, faixa de leitura de -50 a 300°C e precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$. Por fim, o cálculo de permeabilidade é realizado pela Lei de Darcy, expressa na Equação 6.

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (6)$$

Sendo:

k : permeabilidade do leito, m^2 ou Darcy $\times 10^{12}$;

Q : vazão volumétrica do ar na condição de 20°C e 1,013bar, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

μ : viscosidade absoluta do ar na temperatura de trabalho, Pa.s;

L : altura do leito, m;

ΔP : variação da pressão estática aplicada no leito, Pa.

O ensaio de permeabilidade é realizado para o lodo úmido com os teores de ST de 20 a 90%, variando em 10% para cada amostra, além do lodo centrifugado.

3.3.3.6 Tensão de adesão superficial

Com o objetivo de caracterizar as forças adesivas presentes no lodo, além de definir os limites físicos entre o seu estado fluído, plástico e sólido, é realizado o ensaio da TAS na máquina universal de ensaios de fabricante EMIC, modelo DL e com célula de carga de 50N.

Para o ensaio foram fabricadas duas peças metálicas, sendo uma caixa para armazenar o lodo e uma chapa plana em aço carbono (SAE 1020), sem revestimento, quinas arredondadas e com área superficial de 300cm^2 para realizar a adesão no lodo, conforme mostra a Figura 21.



Figura 21: máquina universal de ensaio durante a análise das TAS.
Fonte: produção do próprio autor.

O ensaio constituiu em aplicar uma força entre 0 e 1N sobre a superfície do lodo com a chapa plana e, em seguida, iniciar o teste de tração e registrar a tensão máxima gerada, com base nas orientações da NBR nº6892/13. Posteriormente, a TAS é calculada a partir da equação 7.

$$TAS = \frac{T_{max}}{A} \quad (7)$$

Sendo:

TAS: tensão de adesão superficial, Pa;

T_{max} : máxima tensão registrada, N;

A: área superficial da chapa plana, m².

Para a TAS são preparadas 14 amostras distintas, sendo lodos com teores de ST variando de 15 a 90%, somadas às amostras com 3,5% (lodo adensado) e 7,5% de ST (mistura de lodo adensado e lodo seco tratado), além de água potável e lodo destorroado.

O objetivo do uso de amostras com baixos teores de ST e o lodo destorroado é de melhor caracterizar as forças adesivas presentes no lodo, além de permitir a compreensão das faixas de ST que geram os limites físicos entre o lodo fluído, plástico e sólido.

3.3.3.7 Umidade residual e umidade de equilíbrio do lodo

São ensaiadas amostras de lodo úmido com diferentes teores de ST e em distintas temperaturas para definir a URL, permitindo determinar se a secagem em baixas temperaturas é capaz de remover a mesma quantidade de água que o processo em alta temperatura.

Em paralelo ao ensaio de URL, também são realizadas as análises de UE com o lodo tratado que é acondicionado por 17 dias das seguintes formas:

- Dentro de saco plástico fechado e abrigado no LEH, sendo o saco aberto todos os dias, por um período curto de tempo, para a coleta de amostras;
- Sobre um saco plástico, ficando exposto ao sol e chuva de forma indireta sob a cobertura do galpão do LES.

As determinações das URL e UE são realizadas no Analisador Termogravimétrico (TGA) da fabricante LECO, modelo 701, instalado no LCGC do NEST na UNIFEI, conforme ilustra a Figura 22.



Figura 22: TGA que é utilizado para determinar as umidades e construir a curva de secagem dos lodos.
Fonte: produção do próprio autor.

O ensaio para determinar a UE é realizado na temperatura de 104°C no TGA e segue o método 2540C descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Enquanto os ensaios para determinar a URL são efetuados nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C e, ao final de cada ensaio, o material residual é aquecido a 104°C para definir o valor da URL, conforme representa a Equação 8.

$$URL = \psi_{T_{104}} - \psi_{T_x} \quad (8)$$

Sendo:

URL: umidade residual do lodo, %;

$\psi_{T_{104}}$: umidade determinada na temperatura de 104°C, %;

ψ_{T_x} : umidade determinada na temperatura x, %.

O ensaio é realizado em pressão ambiente e a atmosfera interna do TGA é renovada por um fluxo de ar atmosférico com vazão próxima de 10L.min⁻¹.

3.3.3.8 Relação tempo-temperatura de secagem

Para definir a temperatura de secagem mais adequada para um processo que opera em baixa temperatura, avalia-se o tempo e a taxa global de secagem do lodo centrifugado para quando a taxa instantânea de secagem for próxima de $0,1\% \cdot \text{min}^{-1}$ nas temperaturas de 60, 70, 80, 90 e 104°C . Sendo o ensaio realizado no TGA que fica instalado no LCGC do NEST na UNIFEI, além de empregar o método 2540C descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) que foi adaptado para as temperaturas descritas.

Este ensaio busca identificar a menor temperatura que permita, além da secagem do lodo, a sua higienização com base nos tempos descritos na literatura técnica da área de saneamento.

3.3.3.9 Taxas de secagem no secador experimental

O ensaio experimental para determinar as taxas de secagem do lodo úmido, com diferentes teores de ST, tem o objetivo de identificar o quanto a mistura de lodo tratado e centrifugado pode influenciar nas taxas de secagem pelo método do leito granular.

O ensaio é realizado no secador experimental, instalado no LEH da UNIFEI, que é desenvolvido para secar o lodo em baixas temperaturas pelo método do leito granular.

O secador está montado sobre uma plataforma metálica de $3000 \times 500 \text{mm}$, construída com perfis de aço carbono, seção retangular de $30 \times 20 \text{mm}$, revestida com um fundo a base de tetróxido de chumbo (denominado comercialmente de zarcão) e acabamento em esmalte sintético de cor preto fosco, conforme mostra a Figura 23.



Figura 23: plataforma fabricada após a aplicação do zarcão (esquerda) e o acabamento (direita).

Fonte: produção do próprio autor.

A carcaça do secador foi fabricada no município de Vila Velha, estado do Espírito Santo, pela metalúrgica *Projection* serviços que financiou a fabricação das mesmas. Em seguida, as peças

foram transportadas para o LEH, onde ocorreu a fabricação da plataforma metálica e a montagem mecânica e elétrica do secador, sendo essas etapas realizadas pelo próprio autor.

A montagem mecânica das peças foi realizada sobre a plataforma e, à medida que a montagem progredia, foram feitos os isolamentos térmicos em duas camadas, sendo a primeira composto por uma lâmina de alumínio com feltro de 10mm de espessura e a segunda com uma manta de polietileno de 2mm com lâmina de alumínio, conforme ilustra a Figura 24.



Figura 24: primeira (esquerda) e segunda (direita) camada do revestimento térmico.
Fonte: produção do próprio autor.

O secador desenvolvido busca simular a secagem em baixa temperatura, pelo método do leito granular, que é estudada. Para isso, o mesmo faz uso de ar atmosférico que é aspirado por um ventilador centrífugo e descarregado num duto de expansão (para reduzir a velocidade do fluxo) que encaminha o ar para a etapa de aquecimento, conforme ilustra a Figura 25.



Figura 25: indicação do ventilador (1), duto de expansão (2) e duto de aquecimento (3).
Fonte: produção do próprio autor.

No duto de aquecimento, posterior a passagem pelo duto de expansão, o ar é aquecido por quatro bancos de resistências elétricas que são aletadas e simulam a transferência de calor do sistema heliotérmico do MTSL. O duto de aquecimento é formado por dois bancos de $7,5\text{kW}_e$ cada (composto por 10 resistências elétricas de $1,5\text{W}_e$ no total) e dois bancos de $2,0\text{kW}_e$ cada (composto por 10 resistências elétricas de $0,4\text{kW}_e$ no total), conforme mostra a Figura 26



Figura 26: duto de aquecimento (esquerda) e um dos bancos de resistências (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

Os bancos de maior potência ($7,5\text{kW}_e$) são os bancos de base, sendo acionados diretamente pelos disjuntores presentes no quadro elétrico do secador, enquanto os bancos de menor potência ($2,0\text{kW}_e$) são os bancos de controle, sendo controlados por três *dimmers* que estão instalados na bancada de controle. Os disjuntores e os *dimmers* são apresentados na Figura 27 à esquerda e o esquema do circuito elétrico montado para o controle é mostrado à direita.

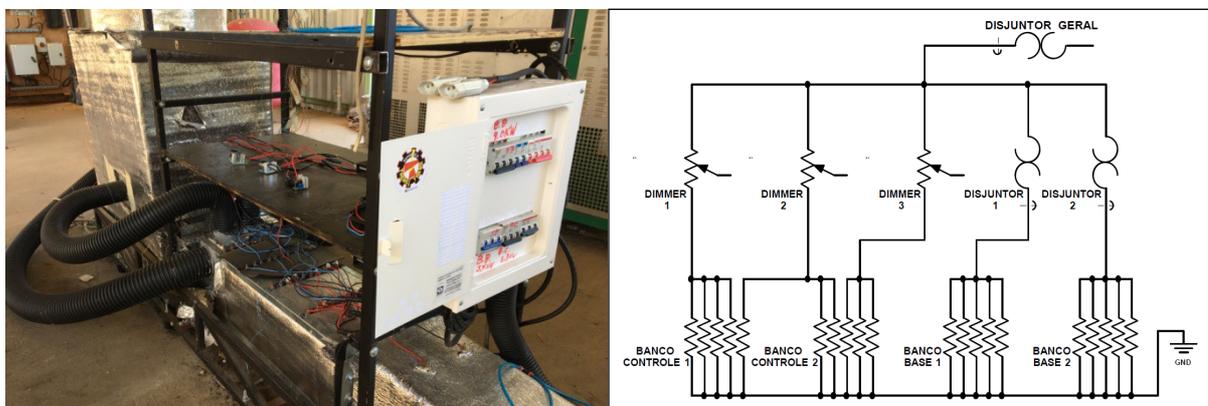


Figura 27: quadro de disjuntores (esquerda) e *dimmers* na bancada de controle (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

Os *dimmers* são controlados, manualmente, em função da temperatura do ar na entrada do leito de secagem. A medição de temperatura é realizada pelo mesmo termômetro de haste metálica que é descrito no subtópico 3.3.3.5 para o teste de permeabilidade ao ar.

Posterior ao aquecimento, o ar é direcionado para a caixa de entrada da coluna de secagem, local que recebe o fluxo de ar aquecido de duas formas:

- Do duto de aquecimento, posterior a passagem pelo *damp*er, conforme mostra a Figura 28;
- Dos mangotes laterais da caixa, derivados antes do *damp*er, conforme mostra a Figura 29.



Figura 28: *damper* sendo montado na caixa de entrada (esquerda) e após a montagem (direita).
Fonte: produção do próprio autor.



Figura 29: mangotes saindo do duto de aquecimento (esquerda) e entrando na caixa (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

O *damper* montado apresenta as dimensões de 300x300mm e permite controlar a vazão de ar que é direcionada pelos mangotes laterais, pois os mesmos estão à montante do *damper*. Enquanto os mangotes laterais visam garantir uma melhor distribuição do fluxo de ar no início da seção circular da coluna de secagem (posterior à caixa de entrada).

No início da coluna de secagem o ar passa por um endireitador de fluxo, mostrado na Figura 30, que é formado por tubos de aço carbono de 150mm de comprimento e 15mm de diâmetro interno. Tais tubos estão montados dentro da coluna de secagem e o espaço intertubular está preenchido por resina de poliéster (comercialmente denominada de resina cristal).



Figura 30: endireitador de fluxo antes da montagem (esquerda) e a vista superior do mesmo a partir do local que ficará o leito de secagem (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

O endireitador de fluxo fica instalado a 0,5m (equivalente a um diâmetro da coluna de secagem) da saída da caixa e do leito de secagem, conforme mostra a Figura 31.

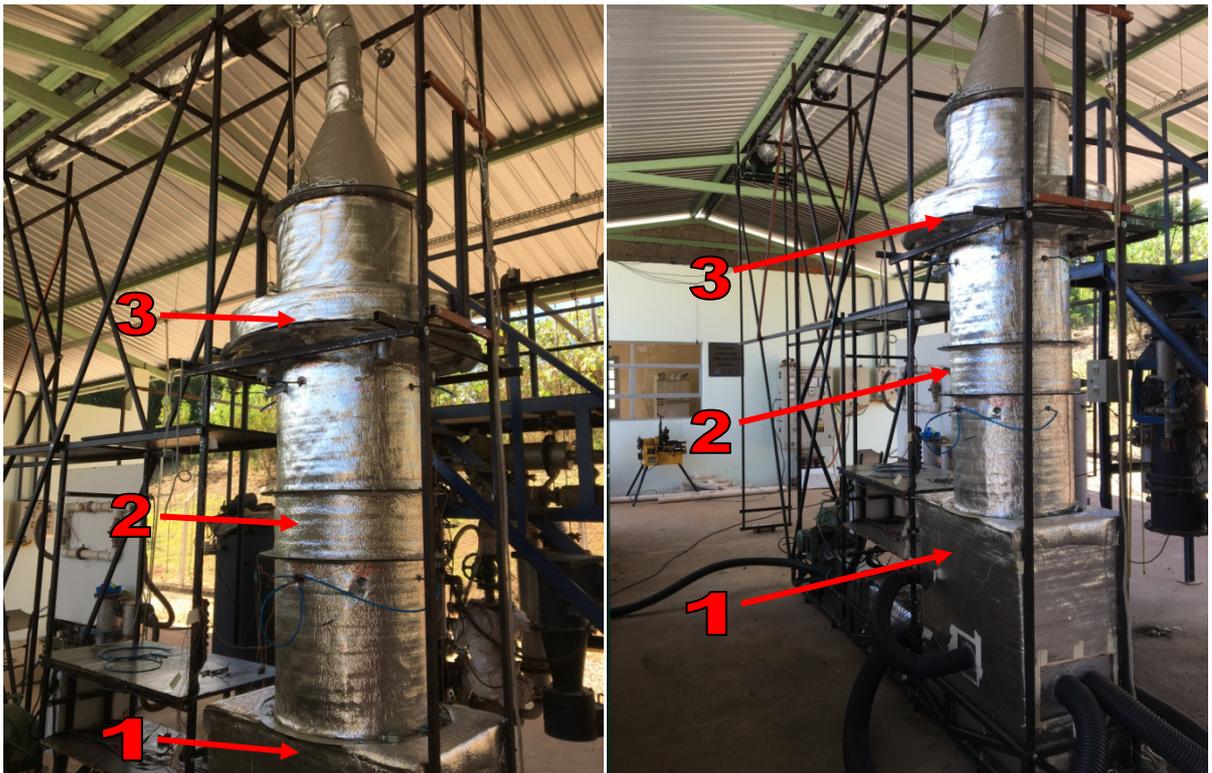


Figura 31: indicação da caixa de entrada (1) endireitador de fluxo (2) e leito de secagem (3).
Fonte: produção do próprio autor.

O endireitador de fluxo instalado à montante do leito de secagem tem o objetivo principal de evitar o desenvolvimento do perfil de escoamento do fluxo de ar ao longo da coluna de secagem, pois o perfil desenvolvido facilita a secagem no centro do leito em detrimento das

laterais, enquanto o perfil achatado, obtido por um escoamento turbulento e não desenvolvido, permite uma secagem com maior homogeneidade na seção do leito de lodo.

Posteriormente ao endireitador de fluxo se encontra o leito de secagem que apresenta o mesmo diâmetro interno da coluna de secagem (0,5m), conforme ilustra a Figura 32.



Figura 32: suporte do leito de secagem (esquerda) e leito instalado sem lodo (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

O leito de secagem é composto por um anel em aço carbono que é recoberto por uma tela de alumínio com abertura em formato de losango, com dimensões de 6x3mm, e fixada por parafusos e arrebites no anel. Sobre a tela, encontra-se um segundo anel metálico de 700mm de altura e de mesmo diâmetro que a coluna de secagem, mas este é responsável por limitar o lodo na área e altura de trabalho do leito, conforme mostra a Figura 33.



Figura 33: leito de secagem antes (esquerda) e após a instalação no secador (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

O leito, depois de carregado com lodo, é fechado pela parte superior da coluna de secagem que é móvel e tem o diâmetro interno maior que o leito de secagem, conforme ilustra a Figura 34.



Figura 34: leito de secagem em carregamento (esquerda) e em operação (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

Posteriormente a passagem pelo leito, o ar é conduzido por uma redução no formato de tronco de cone, passando por um segundo endireitador de fluxo (formado por tubos de cobre de 200mm de comprimento e 10mm de diâmetro interno), exaustor de tiragem e tubo de saída do ar para a atmosfera, conforme ilustrado na Figura 35.



Figura 35: indicação do trecho de saída do ar de secagem: peça de fechamento do leito (1), tronco de cone (2), endireitador de fluxo (3) e exaustor de tiragem (4).
Fonte: produção do próprio autor.

De forma geral, as principais partes do secador experimental, incluindo as suas medidas, são apresentadas no croqui da Figura 36.

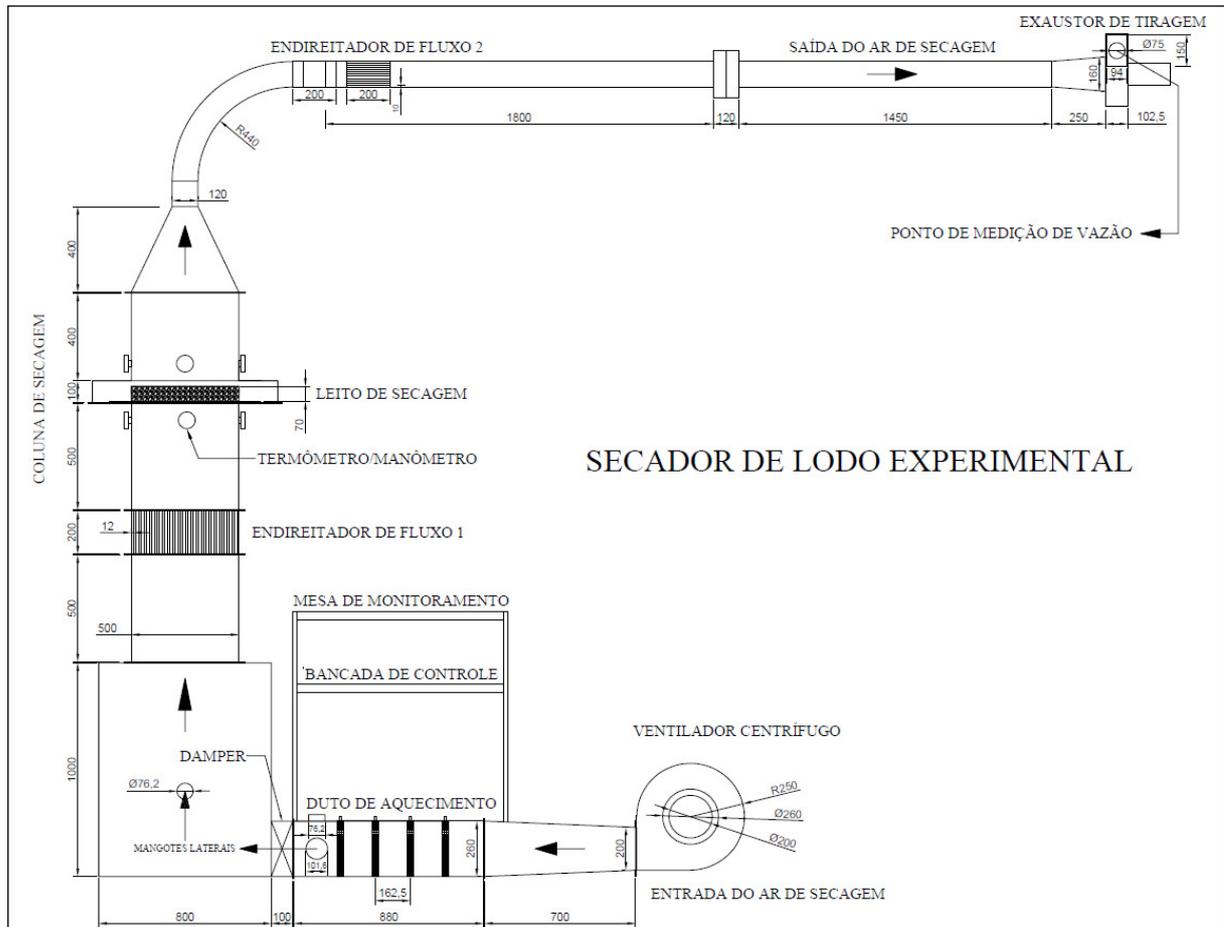


Figura 36: croqui do secador de lodo experimental que foi desenvolvido no LEH da UNIFEI.

Fonte: produção do próprio autor.

A operação do secador experimental ocorre nas seguintes etapas:

- Abertura, carregamento com lodo úmido e fechamento manual do leito de secagem;
- Acionamento do ventilador para a produção do fluxo de ar de secagem;
- Acionamento de todos os bancos de resistência elétrica na potência máxima;
- Controle dos *dimmers*, com base na temperatura medida do ar na entrada do leito de secagem, para atingir a temperatura desejada;
- Registro da temperatura e pressão estática do fluxo de ar a montante do leito de secagem a cada 30 minutos;
- Desligamento dos bancos de resistência elétrica e ventilador a cada 30 minutos;
- Abertura manual do leito de secagem;

- Medição de temperatura do lodo no leito com o termômetro de haste metálica;
- Coleta de três amostras de lodo em diferentes posições e profundidades;
- Fechamento manual do leito de secagem;
- Reacionamento dos bancos de resistência elétrica e ventilador;
- Reinício do monitoramento de temperatura e controle do aquecimento pelos *dimmers* até o próximo período de coleta.

Para cada ensaio o leito é preenchido com uma coluna de 50mm de lodo úmido e submetido à secagem térmica, durante 12 horas, com ar aquecido e pressão estática constante. A temperatura do ar de secagem é monitorada e controlada para manter a temperatura definida no ensaio descrito no subtópico 3.3.3.8.

Somado ao objetivo de determinar o teor de ST no lodo úmido que garante a maior taxa de secagem pelo método do leito granular, este ensaio também possibilita a sua comparação com o método convectivo, conforme detalhado a seguir.

3.3.3.10 Comparação entre métodos de secagem

Em paralelo a determinação das taxas de secagem no secador experimental que faz uso do método do leito granular, também é determinada as taxas de secagem no TGA que segue o método convectivo, permitindo a comparação dos métodos pela razão entre as taxas de secagem (RTS) no mesmo instante de tempo, conforme prevê a Equação 9.

$$RTS = \left(\frac{dx_{SE}}{dx_{TGA}} \right)_t \quad (9)$$

Sendo:

RTS: razão entre as taxas de secagem, adimensional;

dx_{SE} : taxa de secagem no secador experimental do LES, $\%.\text{min}^{-1}$ ou $\%.\text{h}^{-1}$;

dx_{TGA} : taxa de secagem no TGA, $\%.\text{min}^{-1}$ ou $\%.\text{h}^{-1}$.

A interpretação do RTS segue a seguinte lógica:

- $RTS > 1$: Indica que o método do leito granular é mais vantajoso;
- $RTS = 1$: Não indica vantagem para nenhum método pelas taxas de secagem;
- $RTS < 1$: Indica que o método convectivo é mais vantajoso.

3.4 MODELO TERMODINÂMICO DE SECAGEM DE LODO

O MTSL é constituído em sua base por balanços de massa e energia entre uma fonte quente, representada pelo sistema heliotérmico, e uma fonte fria, representada pelo lodo centrifugado.

Os princípios que envolvem o MTSL são baseados nas propriedades psicrométricas do ar para a vaporização de água em temperatura e pressão inferior a de saturação, transferência de calor e massa em volumes de controle com operação em regime permanente, perdas e eficiências isentrópicas de ventiladores e efetividade de trocadores de calor (TC).

O MTSL é desenvolvido com base em dois fluxos principais, descritos a seguir:

- Fluxo de ar: Apresenta como referência de propriedades intensivas o ar atmosférico (estado 0) e passa por 12 estados (estado 0 ao 11) e 9 transformações termodinâmicas ao longo do modelo.
- Fluxo de lodo: Apresenta como referência as propriedades intensivas do lodo centrifugado (estado 0) e passa por 6 estados (estado 0 ao 5) e 3 transformações termodinâmicas ao longo do modelo.

Considera-se que o lodo centrifugado e o ar atmosférico da ETE Mulembá estão em equilíbrio térmico e mecânico, portanto, apresentam as mesmas temperatura e pressão no estado 0. Somado a isso, segue-se o princípio que a entalpia é uma propriedade termodinâmica relativa, sendo considerada nula na referência.

A seguir são apresentados, com base no desenho esquemático da Figura 37, os principais detalhes e hipóteses empregadas no MTSL aprimorado para este trabalho.

As etapas de preaquecimento do lodo (estado 0 ao 1) e do ar de renovação (estado 8 ao 9) são realizadas por regeneradores de calor (RC) de fluxo contracorrente e contato indireto, sendo que o objetivo da regeneração é o de aumentar a eficiência global do MTSL e produzir água de condensação para a limpeza dos CSP. Apesar do desafio de ordem técnica que representa a aplicação de RC entre fluxos com baixa diferença de temperatura e, entre eles, fluxos do tipo sólido-gás, entende-se que a análise técnica desta solução ultrapassa os limites propostos neste trabalho e deve ser realizada, posteriormente, num estudo específico para este fim.

Para o aquecimento do ar de secagem no TC (estado 10 ao 11) o objetivo principal é o de garantir que, no secador, a transferência de calor entre lodo-ar seja suficiente para que o lodo atinja a temperatura desejada e o ar saia saturado e com a menor vazão possível.

A regeneração de calor a partir do lodo tratado (estado 5) não é modelada neste estudo em

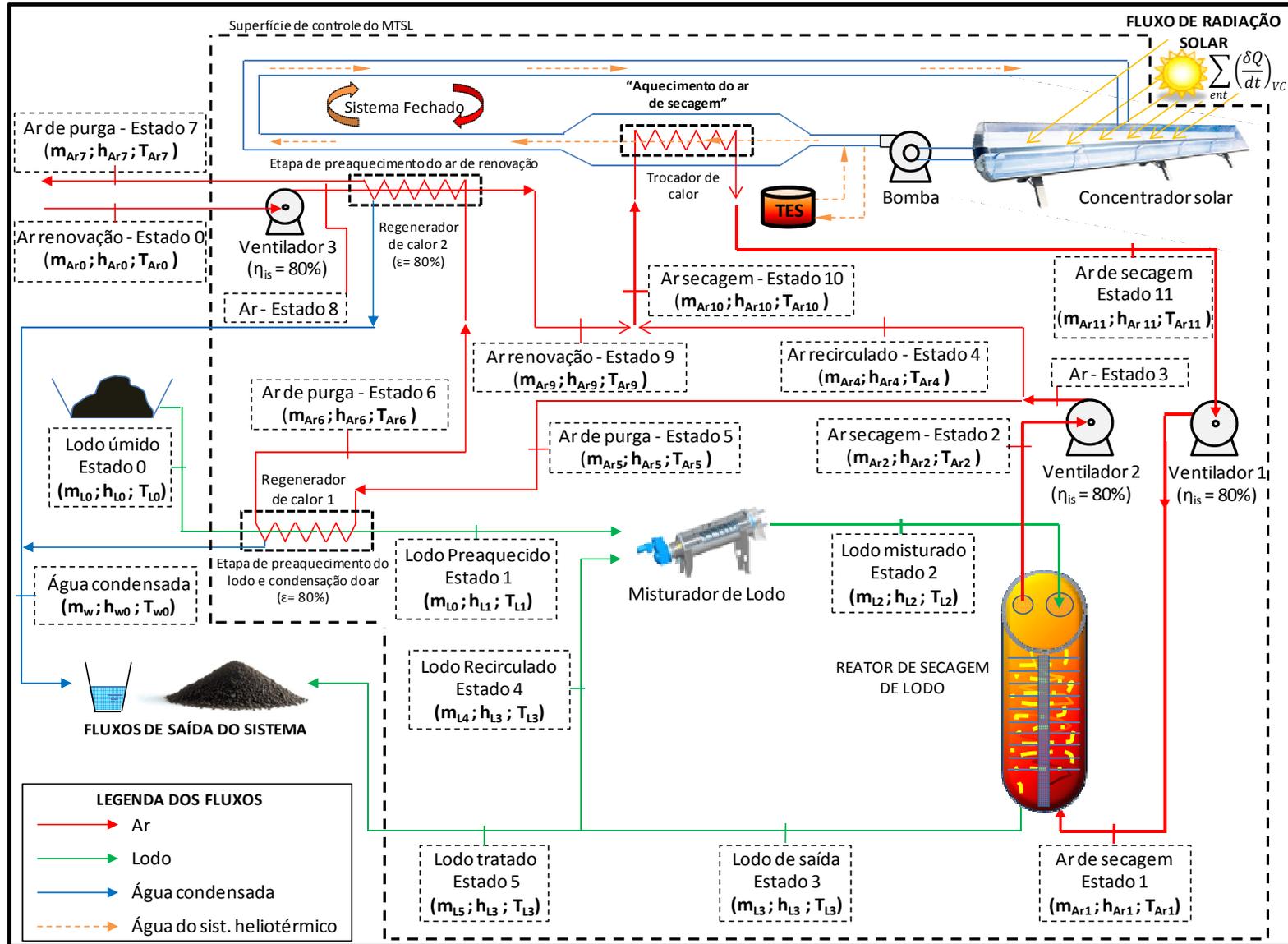


Figura 37: fluxograma ilustrativo das etapas previstas no MTSL.

Fonte: produção do próprio autor.

referência ao trabalho realizado por Peterli (2015), pois é demonstrado que essa regeneração não apresenta ganhos significativos para a eficiência global do MTSL em virtude da baixa capacidade térmica presente no fluxo de lodo tratado.

O reator de secagem deste modelo é admitido como um secador do tipo soleiras múltiplas de contato direto, pois o MTSL é desenvolvido com base no método de secagem do leito granular, que demanda uma configuração de secador do tipo contracorrente, para que o ar possa escoar através do leito de lodo.

O modelo também apresenta uma etapa em que o lodo preaquecido (estado 1) é submetido, antes da etapa de secagem, a uma mistura com parte do lodo de saída do reator de secagem (lodo recirculado – estado 4), gerando o lodo misturado (estado 2). Tal mistura tem como objetivo o aumento da temperatura do lodo para melhorar o processo de difusão da água no interior do sólido e reduzir o diferencial térmico entre o ar e o lodo no interior do secador.

Também é importante relatar que a etapa de mistura de lodos reduz a umidade relativa do material resultante, aumentando a permeabilidade ao ar e diminuindo a plasticidade do mesmo, pois os espaços que antes eram ocupados apenas por água no lodo centrifugado, agora coexistem com os vazios gerados pela mistura.

De forma geral, o MTSL é modelado com base nas seguintes hipóteses:

- Volume de controle em regime permanente, nos quais as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis;
- O ar é considerado como um gás ideal, conforme modelo de gás de Dalton, devido à consideração que a maioria dos gases em baixas pressões podem ser modelados como ideais com baixo erro (ÇENGEL, 2012);
- Nos trocadores de calor e ventiladores, equipamentos com apreciáveis potenciais de perdas e irreversibilidades, é considerado o valor de 0,8 de efetividade para o primeiro (CERQUEIRA, 1999; MORAM, SHAPIRO, 2014) e eficiência isentrópica para o segundo (MORAM, SHAPIRO, 2014);
- São consideradas as perdas de carga para o escoamento do ar nos TC e RC de 2,5% (CERQUEIRA, 1999; MORAM, SHAPIRO, 2014) e secador de lodo de 10% (definido arbitrariamente para garantir um valor conservador em virtude da falta de informações nas bibliografias pesquisadas), pois a pressão do fluxo de ar é uma

importante propriedade intensiva que influencia a capacidade de secagem do ar (pressão de saturação e ponto de orvalho);

- O sistema heliotérmico é modelado com hipóteses extras e que são detalhadas e justificadas no subtópico 3.4.3;
- Considera-se a perda térmica global no secador de lodo de 20% sobre o fluxo térmico demandado para a secagem e partida do reator, valor baseado no trabalho de Rosa et al. (2016);
- Nas tubulações, TC e RC não são consideradas perdas térmicas específicas, pois é considerado que tais perdas já estão incluídas nas perdas atribuídas (20% de perdas) ao secador de lodo;
- O tempo de detenção do ar no secador é o suficiente para aquecer o lodo até a temperatura de secagem e transferir apenas a vazão de água prevista para vaporizar;
- A vaporização no interior do reator ocorre apenas para a substância água, que por sua vez é integralmente incorporada ao ar de saída;
- A energia necessária para a vaporização da água no secador é, invariavelmente, proveniente do ar de secagem que entra no reator. Portanto, a temperatura do ar de secagem é decrescente à medida que escoar no sentido longitudinal do reator e o decaimento de sua temperatura é limitado ao equilíbrio térmico com o lodo de entrada do secador.
- Nenhum componente do ar é incorporado ao lodo ou perdido no MTSL.

Devido à elevada interatividade e hipóteses adotadas no MTSL, é demandando o uso de três importantes recursos computacionais presentes no *software Microsoft Excel*® para executar a modelagem, conforme são pontuados a seguir:

- Ferramenta *Solver* para estabelecer condições de operação do modelo (as condições são descritas, com maiores detalhes, no subtópico 3.5.4);
- Suplemento termodinâmico *Steam Table*® para a determinação dinâmica das propriedades termodinâmicas da água nos seus diferentes estados;
- Ambiente de programação *Virtual Basic for Applications* (VBA) para o desenvolvimento do algoritmo que automatizou a interação e as condições de operação entre os submodelos presentes no MTSL.

Por fim, devido à complexidade do MTSL, o mesmo é subdividido em cinco submodelos principais que são detalhados ao longo dos próximos subtópicos e apresentados, por meio de um fluxograma de blocos, na forma da Figura 38.

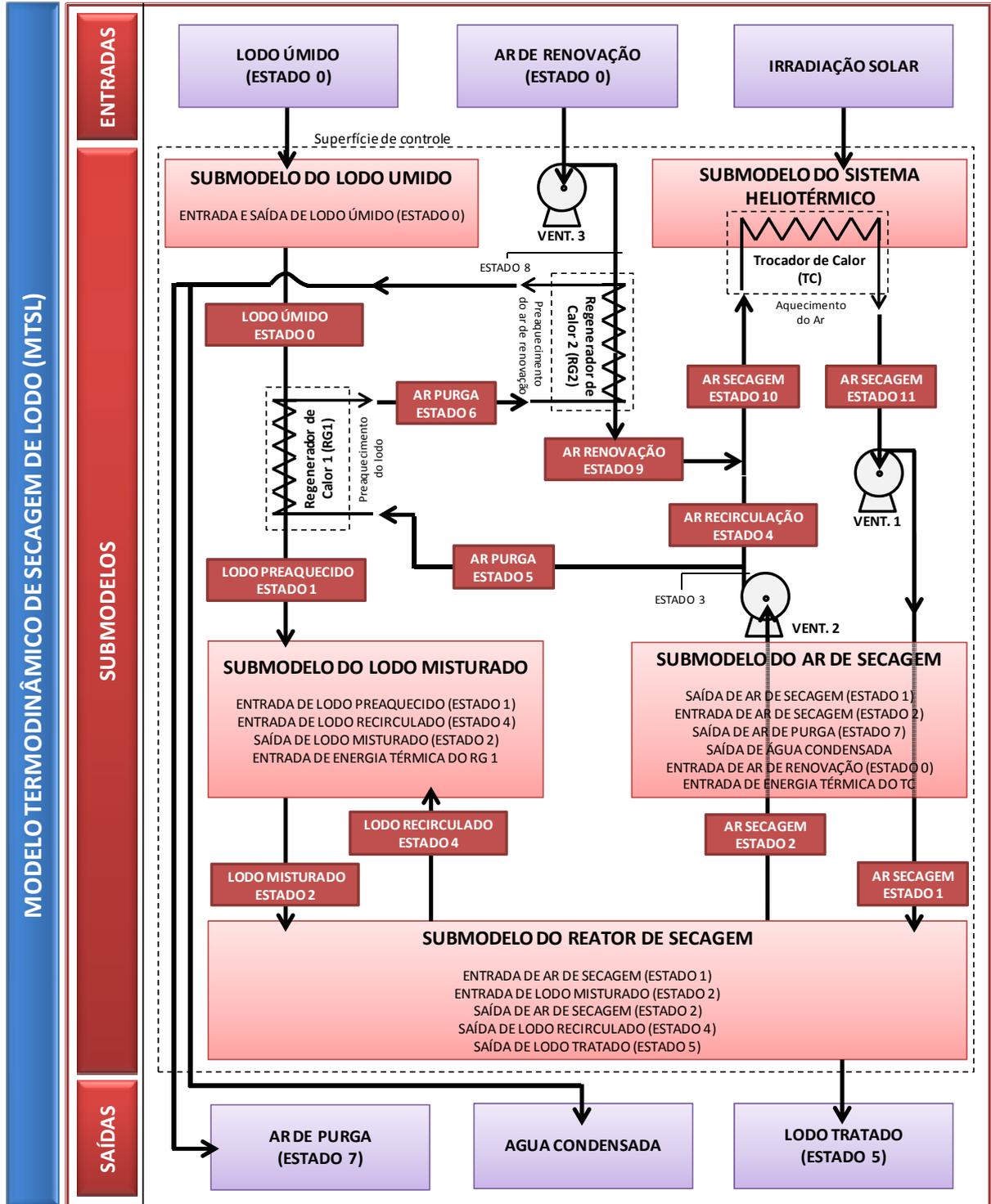


Figura 38: etapas envolvidas no submodelo do lodo úmido.
Fonte: produção do próprio autor.

3.4.1 Submodelo do lodo úmido

Neste submodelo são estimadas as entalpias e vazões mássicas de lodo seco e água que compõem, juntas, o lodo úmido no estado 0 e 1, além da condensação de vapor d'água a partir do ar de purga no estado 5, conforme ilustra a Figura 39.

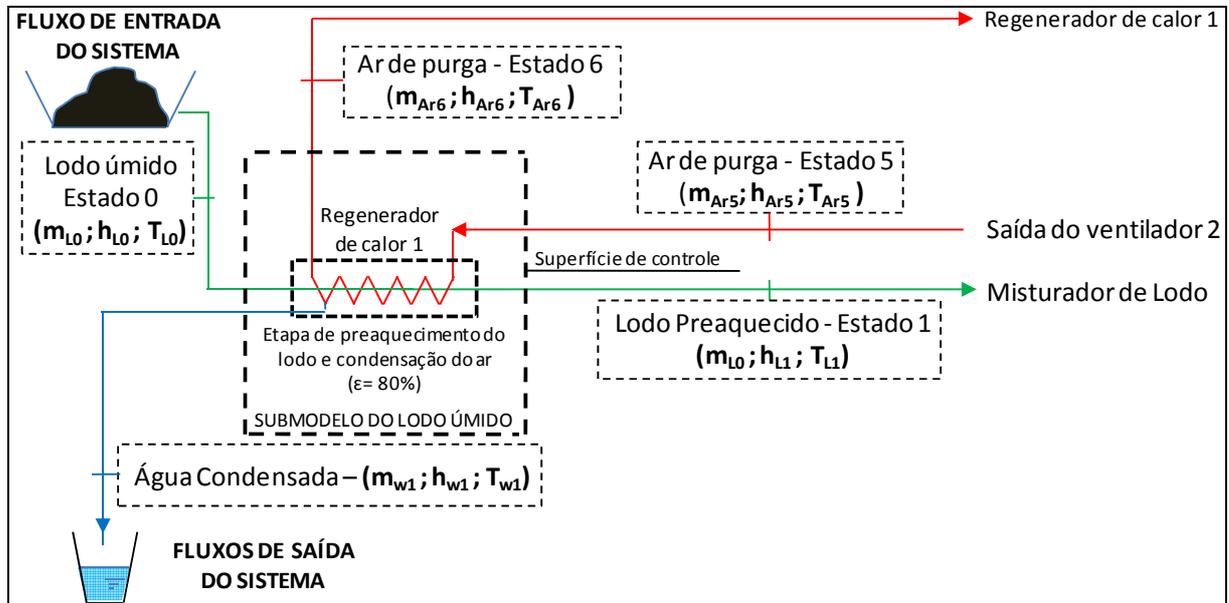


Figura 39: etapas envolvidas no submodelo do lodo úmido.
Fonte: produção do próprio autor.

O lodo úmido (estado 0) representa o lodo centrifugado, da ETE Mulembá I, no caso específico deste estudo, mas o modelo é geral e está preparado para avaliar o comportamento do lodo de outras fontes.

3.4.1.1 Vazão mássica de lodo úmido

A Equação 10 apresenta o cálculo da vazão mássica de lodo úmido, originado no processo de centrifugação, que é alimentado no MTSL.

$$\dot{m}_{L0} = \left(\frac{c}{3600h} \right) \quad (10)$$

Sendo:

m_{L0} : vazão mássica de lodo úmido na entrada do modelo, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

c : carga de lodo úmido produzida por dia na estação, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$;

h : período de horas que é considerado para a secagem de lodo por dia, $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$.

A carga de lodo é um dado fornecido ao modelo e representa a condição de projeto da ETE. Enquanto o período de secagem é uma premissa do modelo e é considerado como 9 e 24 horas

ao dia, respectivamente, para o cenário 1 e 2 que são modelados (conforme descrito no subtópico 3.5.4).

3.4.1.2 Vazão mássica de lodo seco

A Equação 11 estima, por meio do teor de ST do lodo úmido, a vazão mássica de lodo seco que constitui a mistura.

$$\dot{m}_{L0_{seco}} = \left(\frac{\dot{m}_{L0} X_{L0}}{100} \right) \quad (11)$$

Sendo:

$\dot{m}_{L0_{seco}}$: vazão mássica de lodo seco presente no lodo úmido na entrada do modelo, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

X_{L0} : teor de ST presentes no lodo úmido na entrada do modelo, %.

O teor de ST presente no lodo úmido (X_{L0}) também é um dado fornecido ao modelo e obtido da condição de projeto da ETE.

3.4.1.3 Vazão mássica de água líquida na entrada do modelo

A Equação 12 estima, a partir do teor de ST do lodo úmido, a vazão mássica de água líquida que constitui a mistura.

$$\dot{m}_{L0_{\text{água}}} = \frac{\dot{m}_{L0}(100-X_{L0})}{100} \quad (12)$$

Sendo:

$\dot{m}_{L0_{\text{água}}}$: vazão mássica de água presente no lodo úmido na entrada do modelo, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.4.1.4 Regenerador de calor 1

A etapa de preaquecimento do lodo úmido (estado 0 ao 1), que também é a etapa de condensação de água a partir do ar de purga (estado 5 ao 6), consiste na transferência de calor do ar de purga para o lodo úmido, sendo que a modelagem desta etapa é baseada no método ε -NUT, descrita por Incropera et al. (2015).

O primeiro passo desta etapa é o de definir qual dos fluxos de entrada no regenerador 1, lodo úmido (estado 0) ou ar de purga (estado 5), apresenta a menor capacidade térmica para determinar a possível troca de calor máxima entre os fluxos, considerando um processo adiabático, regime permanente e sem variações de energia cinética e potencial, conforme ilustra a Equação 13.

$$\dot{Q}_{max_{L0-Ar5}} = C_{min_{reg1}}(T_{Ar5} - T_{L0}) \quad (13)$$

Sendo:

$Q_{max_{L0-Ar5}}$: máxima troca de calor entre o lodo no estado 0 e o ar no estado 5, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$;

$C_{min_{reg1}}$: menor capacidade térmica entre os fluxos de entrada no RC 1, $\text{kW}\cdot\text{°C}^{-1}$;

T_{Ar5} : temperatura do ar de purga no estado 5 – entrada do RC 1, °C ;

T_{L0} : temperatura do lodo úmido no estado 0 – entrada do RC 1, °C .

Considerando que a capacidade térmica é determinada pelo produto da vazão mássica pelo calor específico do material, desta forma, o calor específico pode ser substituído pela razão entre a entalpia específica e a sua correspondente variação de temperatura, conforme mostra a Equação 14 para o ar de purga no estado 5.

$$\bar{C}_{Ar5} = \dot{m}_{Ar5} \left(\frac{\Delta h_{Ar5,6'}}{\Delta T_{Ar5,6'}} \right) \quad (14)$$

Sendo:

\bar{C}_{Ar5} : capacidade térmica média do ar ao longo do RC 1, $\text{kW}\cdot\text{°C}^{-1}$;

\dot{m}_{Ar5} : vazão mássica do ar de purga no estado 5 – entrada do RC 1, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

$\Delta h_{Ar5,6'}$: variação de entalpia específica do ar de purga entre o estado 5 e 6', $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$\Delta T_{Ar5,6'}$: variação de temperatura do ar entre o estado 5 e 6', °C .

A variação de temperatura dos fluxos entre a entrada e a saída não são conhecidas, sendo a determinação dos estados de saída dos fluxos o objetivo desta etapa da modelagem. Portanto, é considerado na equação anterior o calor específico médio do estado 5 até um possível estado 6' para o ar, considerando o último com a mesma temperatura do lodo úmido no estado 0. Tal consideração, ainda que incorpore um pequeno erro, permite o emprego de um calor específico médio, que representa toda a faixa da possível variação de temperatura para o ar.

Para o cálculo da variação de entalpia específica do ar de purga entre a entrada e saída do RC 1, considera-se o resfriamento e a condensação do vapor d'água presente no fluxo durante a modelagem. Enquanto para as propriedades do ar de purga no estado 5, as mesmas são obtidas do submodelo do ar de secagem, retroativamente, também durante a modelagem.

Para a vazão mássica do ar de purga no estado 5, a mesma é calculada com base na vazão de vapor que a constitui, sendo que essa vazão é igual à soma da vazão de água evaporada pelo secador de lodo com a vazão de vapor d'água proveniente do fluxo de ar de renovação (estado 0) do MTSL, permitindo manter a mesma quantidade de água no modelo a cada ciclo, conforme descreve a Equação 15.

$$\dot{m}_{Ar5\acute{a}gua} = \dot{m}_{W_{eva}} + \dot{m}_{Ar0\acute{a}gua} \quad (15)$$

Sendo:

$\dot{m}_{Ar5\acute{a}gua}$: vazão mássica de água presente no fluxo de ar de purga no estado 5, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

$\dot{m}_{W_{eva}}$: vazão mássica de água líquida vaporizada no reator de secagem, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

$\dot{m}_{Ar0\acute{a}gua}$: vazão mássica de água presente no fluxo de ar de renovação no estado 0, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

A vazão mássica de água evaporada é definida em função da vazão mássica de lodo seco no estado 0 (referência) e pelo teor de ST desejado no lodo na saída do reator de secagem (estado 3), conforme mostra a Equação 16.

$$\dot{m}_{W_{eva}} = \left[\frac{\dot{m}_{L0seco} \left(1 - \frac{X_{L3}}{100} \right)}{\left(\frac{X_{L3}}{100} \right)} \right] \quad (16)$$

Sendo:

X_{L3} : teor de ST presente no lodo seco na saída do reator de secagem, %.

O teor de ST desejado no lodo de saída (X_{L3}) é um dado de entrada do modelo e definido a partir da caracterização do lodo que esta descrita no subtópico 3.3.3.7.

Retornando a modelagem do RC 1, de forma análoga a consideração de um calor específico médio que é descrito para o ar de purga, a Equação 17 retrata a capacidade térmica média do lodo úmido com base na variação de entalpia e temperatura do estado 0 até um possível estado 1', considerando o último como a temperatura do ar de purga no estado 5.

$$\bar{C}_{L0} = \dot{m}_{L0seco} \left(\frac{\Delta h_{L1'seco}}{\Delta T_{L0,1'}} \right) + \dot{m}_{L0\acute{a}gua} \left(\frac{\Delta h_{L1'\acute{a}gua}}{\Delta T_{L0,1'}} \right) \quad (17)$$

Sendo:

\bar{C}_{L0} : capacidade térmica média do lodo úmido na entrada do RC 1, $\text{kW}\cdot\text{°C}^{-1}$;

$\Delta h_{L0,1'seco}$: variação de entalpia do lodo seco entre o estado 0 e 1', $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$\Delta h_{L0,1'\acute{a}gua}$: variação de entalpia da água líquida entre o estado 0 e 1', $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$\Delta T_{L0,1'}$: variação de temperatura do lodo entre o estado 0 e 1', °C .

Para calcular a entalpia da água líquida não saturada, utiliza-se a entalpia específica entre a água líquida na temperatura do lodo no estado 1' pela entalpia específica de referência (estado 0). Enquanto a variação de entalpia da massa seca do lodo é obtida pela integral do calor específico em função da sua variação de temperatura, sendo que o calor específico do lodo seco é obtido do estudo realizado por Arlabosse, Chavez e Prevot (2005).

A integral da função mencionada é apresentada na Equação 18, sendo que o coeficiente de ordem 10^{-3} é introduzido na referida equação para que o resultado da entalpia seja obtido, diretamente, em kJ.kg^{-1} .

$$\Delta h_{L0,1'_{seco}} = \frac{1434(T_{Ar5}-T_{L0})+3,29(T_{Ar5}^2-T_{L0}^2)}{10^3} \quad (18)$$

De posse da troca de calor máxima entre os fluxos, aplica-se o conceito de efetividade do método ε -NUT, conforme mostra a Equação 19, resultando na troca de calor possível entre os fluxos com base na efetividade.

$$\dot{Q}_{L0-Ar5} = \varepsilon_{reg1} C_{min_{reg1}} (T_{Ar5} - T_{L0}) \quad (19)$$

Sendo:

Q_{L0-Ar5} : troca de calor possível entre o lodo no estado 0 e o ar no estado 5, kJ.s^{-1} ;

ε_{reg1} : efetividade do regenerador de calor 1, adimensional.

Pelo emprego do conceito da efetividade, é possível estimar a temperatura do lodo preaquecido pela Equação 20, que correlaciona a temperatura do lodo com a transferência de calor do ar de purga (estado 5 ao 6), além do fluxo de energia pela Equação 21.

$$T_{L1} = \left[\frac{\varepsilon_{reg1} C_{min_{reg1}} (T_{Ar5} - T_{L0})}{C_{L0}} \right] + T_{L0} \quad (20)$$

$$\dot{H}_{L1} = \left[(\dot{m}_{L0_{seco}} h_{L1_{seca}}) + (\dot{m}_{L0_{\acute{a}gua}} h_{L1_{\acute{a}gua}}) \right] \quad (21)$$

Sendo:

H_{L1} : fluxo de energia do lodo úmido no estado 1 – saída do RC 1, kJ.s^{-1} ;

$h_{L1_{seco}}$: entalpia específica do lodo seco no estado 1, kJ.kg^{-1} ;

$h_{L1_{\acute{a}gua}}$: entalpia específica da água líquida presente no lodo úmido no estado 1, kJ.kg^{-1} ;

T_{L1} : temperatura do lodo úmido no estado 1 – saída do RC 1, $^{\circ}\text{C}$.

Para a modelagem do RC 2 e a determinação das propriedades da água líquida e lodo seco, são realizadas com o mesmo método descrito neste subtópico.

3.4.2 Submodelo do ar de secagem

Neste submodelo são apresentadas as equações empregadas para modelar o fluxo de ar, além das transformações ocorridas durante a sua passagem pelos ventiladores e TC, conforme ilustra o fluxograma presente na Figura 40.

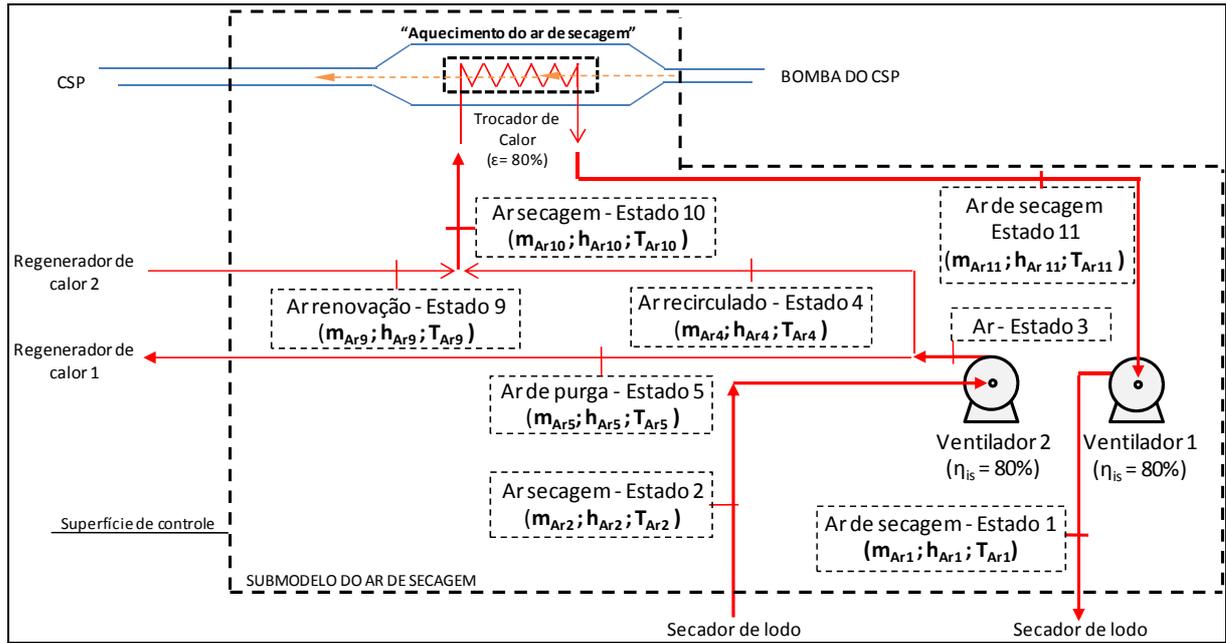


Figura 40: etapas envolvidas no submodelo do ar de secagem.

Fonte: produção do próprio autor.

3.4.2.1 Propriedades do ar de referência

Para estimar a fração molar de vapor d'água, presente no ar atmosférico de referência do MTSL, é utilizada a Equação 22.

$$y_v = \phi \left(\frac{p_g}{p} \right)_T \quad (22)$$

Sendo:

y_v : fração molar de vapor d'água presente no ar atmosférico de referência, %;

ϕ : umidade relativa do ar atmosférico de referência, %;

p_g : pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da mistura, bar;

p : pressão absoluta da mistura na temperatura T, bar.

Com a fração molar de vapor d'água presente na mistura, determinam-se as parcelas que representam o ar seco a partir da Equação 23.

$$y'_x = y_x \left(1 - \frac{y_v}{100} \right) \quad (23)$$

Sendo:

y'_x : fração molar do componente x na mistura de ar úmido, %;

y_x : fração molar do componente x no ar seco, %.

A Tabela 16 descreve as frações molares utilizadas na Equação 24 e que representam a composição do ar seco adotado para este estudo.

Tabela 12: composição e frações molares dos componentes do ar seco

| X | COMPONENTE | FRAÇÃO MOLAR (%) | MASSA MOLECULAR (kg/kmol) |
|--------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| 1 | Nitrogênio | 78,09 | 28,013 |
| 2 | Oxigênio | 20,95 | 31,999 |
| 3 | Dióxido de carbono | 0,03 | 44,01 |
| 4 | Argônio | 0,93 | 39,948 |
| TOTAL | - | 100 | 28,964 |

Fonte: adaptado de Moran, Shapiro (2014).

Os gases traços somam, aproximadamente, 0,01% da fração molar do ar seco. Portanto, tais gases são considerados na fração molar do nitrogênio (elevando de 78,08% para 78,09% a sua participação) para simplificar a modelagem e, ainda assim, continuar com boa exatidão nos resultados.

3.4.2.2 Propriedades do ar de secagem

Para a composição do ar seco, considera-se a mesma como constante ao longo do MTSL (sistema conservativo), pois as transferências de massas só alteraram os teores de vapor d'água presentes no fluxo de secagem.

Para estimar a entalpia específica do ar de secagem, constituído por ar seco e vapor d'água, utiliza-se a equação de Lozano e Valero (1986) para a forma apresentada na Equação 24, possibilitando o cálculo para cada componente presente no ar em função da sua variação de temperatura em relação à temperatura de referência (T_{Ar0}) que apresenta a entalpia zero ($h_{Ar0}=0$). As constantes empregadas na equação acima são apresentadas na Tabela 13.

$$h_{Ar1} = \frac{4,18}{\sum_{x=1}^5 y'_x M_x} \sum_{x=1}^5 \int_{T_{Ar0}}^{T_{Ar1}} (A + BT + CT^2 + DT^3)_x dT \quad (24)$$

Sendo:

h_{Ar1} : entalpia específica do ar de secagem no estado 1, kJ.kg^{-1} ;

M_x : massa molar do componente x na mistura de ar úmido, kg.kmol^{-1} ;

T_{Ar0} : temperatura de referência do ar, K;

T_{Ar1} : temperatura do ar de secagem no estado 1, K.

A, B, C, D: constantes do componente x, $\text{cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Tabela 13: componentes, ordens e constantes empregadas na Equação 25.

| X | COMPONENTE | CONSTANTES (kcal/kmol) | | | |
|---|------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | A | B x 10 ² | C x 10 ⁵ | D x 10 ⁹ |
| 1 | N ₂ | 6,903 | -0,03753 | 0,193 | -0,6861 |
| 2 | O ₂ | 6,085 | 0,3631 | -0,1709 | 0,3133 |
| 3 | CO ₂ | 5,316 | 1,4285 | -0,8362 | 1,784 |
| 4 | Ar* | 4,964 | - | - | - |
| 5 | H ₂ O | 7,7 | 0,04594 | 0,2521 | -0,8587 |

Fontes dos dados: Henley, 1973, *apud* Lozano, Valero, 1986, 121p. *Verda, Serra, Valero, 2004.

Para o cálculo do fluxo de energia presente no ar de secagem, emprega-se a Equação 25.

$$\dot{H}_{Ar_1} = \dot{m}_{Ar_1} h_{Ar_1} \quad (25)$$

Sendo:

H_{Ar_1} : fluxo de energia no ar de secagem no estado 1, kJ.s^{-1} ;

\dot{m}_{Ar_1} : vazão mássica de ar de secagem no estado 1, kg.s^{-1} .

O método descrito para estimar a entalpia e o fluxo de energia do ar de secagem também é empregado para calcular os seus demais estados ao longo do MTSL.

3.4.2.3 Alteração das propriedades termodinâmicas do ar

O processo de compressão do ar durante a passagem pelos ventiladores e as perdas de carga decorrentes do escoamento pelos TC geram alterações nas propriedades termodinâmicas do ar. Por exemplo, nos ventiladores ocorre a variação de temperatura e, conseqüentemente, entalpia do ar pelo processo de compressão, enquanto nos trocadores de calor ocorre a redução da pressão de escoamento em virtude de perdas de carga localizadas. Portanto, a seguir se apresenta a forma utilizada para considerar essas variações dentro do MTSL.

I. Pressão de escoamento e perdas de carga no fluxo de ar

Considera-se que as pressões de descarga dos ventiladores do MTSL são suficientes para compensar as perdas de carga que ocorrem sobre o fluxo de ar durante a passagem pelos componentes do sistema (TC e secador).

Sendo o ar de secagem recirculado dentro do MTSL, é necessário definir, arbitrariamente, a pressão de trabalho para dois pontos do sistema. Por questões práticas, os pontos escolhidos são o ar de secagem no estado 2 e o ar de purga no estado 7, sendo a pressão de trabalho igual a da atmosfera local. Nesta situação, é definida a pressão de descarga do ventilador 1 a partir da Equação 26.

$$p_1 = p_0 + \Delta p_{f1,2} \quad (26)$$

Sendo:

p_1 : pressão absoluta do ar de secagem no estado 1 – saída do ventilador 1, bar;

p_0 : pressão absoluta do ar de referência – estado 0, bar;

$\Delta p_{f1,2}$: variação de pressão do ar ao passar pelo secador de lodo - entre o estado 1 e 2, bar.

A Equação 27 mostra o cálculo da perda de pressão entre o estado 1 e 2, sendo válido o mesmo equacionamento para outras variações de pressões.

$$\Delta p_{f1,2} = p_1 - p_2 = p_1 \left(\frac{f_{1,2}}{100} \right) \quad (27)$$

Sendo:

p_2 : Pressão absoluta no ar no estado 2 – saída do reator de secagem de lodo, bar;

$f_{1,2}$: Perda de carga estimada do ar entre o estado 1 e 2, %.

Para o ventilador 2, que recebe o fluxo de ar no estado 2, é utilizada a Equação 28 para calcular o aumento de pressão necessária para compensar as perdas de carga dos RC 1 e 2 e permitir a saída do ar de purga (estado 7) na pressão de referência do MTSL.

$$p_3 = p_0 + \Delta p_{f5,6} + \Delta p_{f6,7} \quad (28)$$

Sendo:

p_3 : pressão absoluta do ar de secagem no estado 3 – saída do ventilador 2, bar;

$\Delta p_{f5,6}$: variação de pressão do ar de purga entre o estado 5 e 6 no RC 1, bar;

$\Delta p_{f6,7}$: variação de pressão do ar de purga entre o estado 6 e 7 no RC 2, bar.

Para o ventilador 3, que recebe o fluxo de ar de renovação no estado 0, o mesmo é modelado para que a pressão do fluxo de ar de renovação no estado 9 seja igual a do fluxo de ar de recirculação no estado 4 (pressão de descarga do ventilador 2), mesmo após passar pelo RC 1, conforme mostra a Equação 29.

$$p_8 = p_3 + \Delta p_{f8,9} \quad (29)$$

Sendo:

p_8 : pressão absoluta do ar de renovação no estado 8 – saída do ventilador 3, bar;

$\Delta p_{f8,9}$: variação de pressão do ar de renovação entre o estado 8 e 9 no RC 2, bar.

II. Eficiência isentrópica dos ventiladores

Com a determinação da pressão de descarga dos ventiladores, a segunda etapa é determinar a temperatura de descarga dos mesmos. Portanto, é empregada a Equação 30, que considera a razão de pressões aplicada a máquinas de fluxo para estimar a temperatura isentrópica do ar na descarga do ventilador 1.

$$\frac{T_{IS1}}{T_{Ar11}} = \left(\frac{p_1}{p_{11}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (30)$$

Sendo:

T_{IS1} : temperatura isentrópica do ar de secagem na descarga do ventilador 1, °C ou K;

T_{Ar11} : temperatura do ar de secagem no estado 11, °C ou K;

p_{11} : pressão absoluta do ar de secagem no estado 1, bar.

k_{IS} : constante com base na temperatura do ar no estado 10, adimensional.

A constante k , que é a relação entre os calores específicos a pressão e volume constante, para o ar na temperatura de 300 Kelvin (26,85 °C) é de 1,400, sendo o mesmo corrigido para cada estado presente no MTSL (MORAN, SHAPIRO, 2014). Por fim, a Equação 31 permite estimar a temperatura real de descarga do ar na saída dos ventiladores, pois considera a eficiência isentrópica do processo.

$$\eta_{is} = \frac{T_{IS} - T_{Ar11}}{T_{Ar1} - T_{Ar11}} \quad (31)$$

Sendo:

η_{is} : eficiência isentrópica de ventiladores, adimensional.

Adota-se a eficiência isentrópica de 0,8 com base em Moran e Shapiro (2014), sendo que o mesmo método descrito é empregado para o ar na saída dos ventiladores 2 e 3.

3.4.2.4 Aquecimento do ar de secagem

Neste submodelo é definida a temperatura final de 150°C para o ar de secagem na saída do TC. Tal definição é decorrente da escolha do CSP do tipo cilindro parabólico para o sistema heliotérmico, conforme é justificado no subtópico 3.4.3 em função da sua temperatura mínima de operação.

Neste caso, o balanço de energia no TC é simplificado pela definição da temperatura de 150°C e é realizada pelas Equações 24 e 25, que são descritas no subtópico 3.4.2.2. Enquanto o balanço de massa para determinar a vazão de ar de secagem no estado 10 é representado pela Equação 32.

$$\dot{m}_{Ar10} = \dot{m}_{ar4} + \dot{m}_{ar9} \quad (32)$$

Sendo:

\dot{m}_{Ar10} : vazão mássica de ar de secagem no estado 10, kg.s⁻¹;

\dot{m}_{Ar4} : vazão mássica de ar de recirculação no estado 4, kg.s⁻¹;

\dot{m}_{Ar9} : vazão mássica de ar de renovação no estado 9, kg.s⁻¹.

A vazão de ar de renovação no estado 9 é calculada com base na parcela de ar seco presente no fluxo ar de purga no estado 5, conforme mostra a Equação 33.

$$\dot{m}_{Ar9} = \dot{m}_{ar5seco} + \omega_0 \cdot \dot{m}_{ar5seco} \quad (33)$$

Sendo:

$\dot{m}_{Ar5seco}$: parcela de ar seco presente no fluxo de ar de purga no estado 5, kg.s⁻¹;

ω_0 : umidade específica ou absoluta do ar de renovação no estado 0, kg_{vapor}.kg⁻¹_{ar seco};

3.4.3 Submodelo do sistema heliotérmico

Com base na revisão bibliográfica realizada sobre a energia heliotérmica, principalmente pelos trabalhos dos autores Gauché et al. (2017), Baharoon et al. (2015), Duffie e Beckman (2013); Bello et al. (2017); Kalogirou (2014), Abdulhamed et al. (2018) e Fernández-García et al. (2015), é perceptível que o CSP do tipo cilindro parabólico apresenta maior nível de confiança e maturidade em relação aos outros tipos de CSP, implicando maiores vantagens técnicas e econômicas para o acoplamento com a secagem térmica em baixa temperatura de lodo sanitário.

Também é observada grande vantagem no emprego de TES em conjunto com os CSP, tornando o sistema heliotérmico estável e com maior fator de capacidade para disponibilizar energia térmica para o processo de secagem.

Desta forma, a fonte térmica do MTSL é definida por um sistema de energia heliotérmica com CSP do tipo cilindro parabólico e acoplado a um TES, sendo adotadas as seguintes hipóteses para este submodelo:

- O TES opera com água líquida, variando entre 150 e 250°C, e apresenta uma perda térmica, com base em Kuravi *et al* (2013), de 3% sobre a sua capacidade máxima de armazenamento;
- O CSP do tipo cilindro parabólico opera com o fluido térmico formado por água pressurizada entre 150 e 250°C, respectivamente, na entrada e saída dos CSP;
- Eficiência térmica do CSP de 50% com base na mínima eficiência descrita pelos trabalhos de Bellos et al. (2019), Fernández-García et al. (2015); Wirz et al. (2014) e Abdulhamed et al. (2018);
- Demanda de água para limpeza da superfície dos CSP de 0,5L.m², tendo como base o valor médio descrito por Fernández-García *et al* (2014).

Para estimar o porte e a capacidade do sistema heliotérmico para realizar o aquecimento do fluxo de ar de secagem com a mínima área espelhada no campo solar, a modelagem é realizada para cada hora de operação do secador de lodo (DNI variável) e tem como base o balanço de energia entre os CSP (produção) e o ar de secagem entre o estado 10 e 11 (demanda), sendo o excedente ou déficit do balanço de energia encaminhado ou retirado do TES. A Figura 41 ilustra o fluxograma do submodelo do sistema heliotérmico.

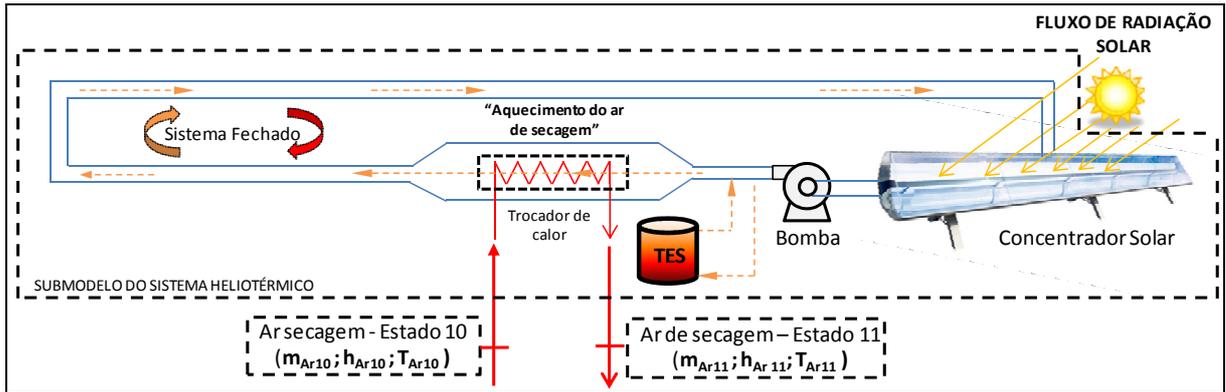


Figura 41: etapas envolvidas no submodelo do sistema heliotérmico.
Fonte: produção do próprio autor.

A modelagem se inicia na determinação da demanda térmica para o aquecimento do fluxo de ar de secagem, utilizando a Equação 34, que correlaciona à vazão mássica do ar com a sua variação de entalpia entre a entrada (estado 10) até a saída (estado 11) a 150°C do TC.

$$\Delta H_{Ar_{10,11x}} = (\dot{m}_{ar_{10,11x}} \Delta h_{Ar_{10,11x}}) \cdot 3600 \quad (34)$$

Sendo:

$\Delta H_{Ar_{10,11x}}$: demanda térmica do ar entre o estado 10 e 11 no instante x , kWh_t;

$\dot{m}_{ar_{10,11x}}$: vazão mássica de ar entre o estado 10 e 11 no instante x , kg.s⁻¹.

$\Delta h_{Ar_{10,11x}}$: variação de entalpia específica do ar entre o estado 10 e 11 no instante x , kJ.kg⁻¹.

De posse da demanda térmica para o aquecimento do fluxo de ar, determina-se a área espelhada do campo solar, utilizando a Equação 35, que correlaciona à referida demanda térmica com a energia produzida a partir da DNI horária e já considerando a eficiência térmica de 50% que é adotada como uma hipótese do modelo.

$$A_{CSP} = \left(\frac{\Delta H_{Ar_{10,11x}}}{DNI_x \cdot \varepsilon} \right) \quad (35)$$

Sendo:

A_{CSP} : área espelhada do campo solar no instante x , m²;

ε : eficiência do CSP do tipo cilindro parabólico, %;

DNI_x : irradiação solar normal horária no instante x , kWh_t.m⁻².

Para o fluxo energético de entrada e saída do TES, estimado pela Equação 36, considera-se o balanço de energia entre a produção no CSP e a demanda para o aquecimento do ar de secagem a cada instante, sendo a variação de energia removida ou adicionada ao TES.

$$\Delta H_{TES_x} = \left[(DNI_x \cdot \varepsilon \cdot A_{CSP}) - \Delta H_{Ar_{10,11x}} \right] \quad (36)$$

Sendo:

ΔH_{TES_x} : variação da energia no TES no instante x , kWh_t.

Para estimar a energia armazenada em determinado instante no TES, empregando a Equação 37, considera-se a energia já armazenada com a sua variação no instante x .

$$C_{TES_x} = C_{TES_{x-1}} + \Delta H_{TES_x} \quad (37)$$

Sendo:

C_{TES_x} : capacidade térmica do TES no instante x , kWh_t;

$C_{TES_{x-1}}$: capacidade térmica do TES no instante anterior a x , kWh_t.

Para determinar a autonomia do TES, estimada pela Equação 38, considera-se o uso da sua completa capacidade para atender a demanda térmica de aquecimento do fluxo de ar de secagem entre o estado 10 e 11. A capacidade do TES é considerada para o instante que o mesmo apresenta a máxima energia acumulada ao longo de um dia de operação.

$$A_{TES} = \frac{C_{TES_{max}}}{(\Delta H_{Ar_{10,11}})} \quad (38)$$

Sendo:

A_{TES} : autonomia do TES, horas;

$C_{TES_{max}}$: capacidade do TES ou instante de máxima energia acumulada, kWh_t.

Todas as equações descritas, no submodelo do sistema heliotérmico, fazem parte da etapa computacional que busca definir a menor área do campo solar que garanta a viabilidade termodinâmica do MTSL, conforme é descrita em detalhes no subtópico 3.5.4.

Em face do exposto, o submodelo heliotérmico apresenta um caráter simplificado em comparação ao restante do MTSL, pois o objetivo principal deste submodelo é o de definir o porte do sistema heliotérmico com base no fluxo térmico, área do campo solar e capacidade do TES.

3.4.4 Submodelo do lodo misturado

Neste submodelo são feitos os balanços de massa e energia do processo de mistura de lodo preaquecido (estado 1) com o lodo recirculado (estado 4) para produzir o lodo mesclado (estado 2), conforme é apresentado na Figura 42.

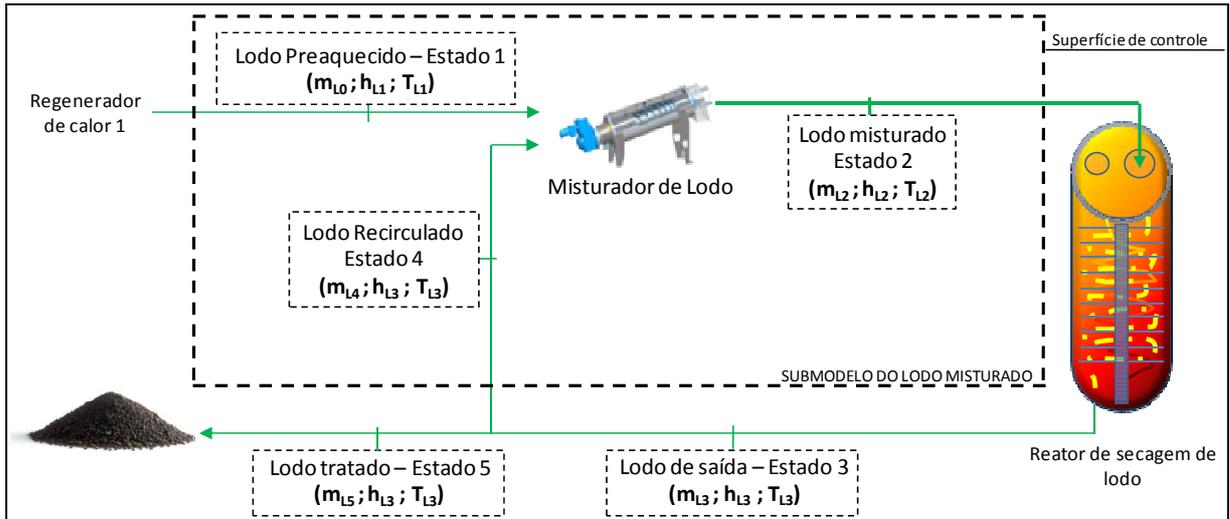


Figura 42: etapas envolvidas no submodelo do lodo misturado.

Fonte: produção do próprio autor.

Apesar do teor de umidade do lodo misturado ser reduzido com a mistura, a quantidade de água a ser vaporizada, em massa, continua igual e independente do teor de ST definido para a mistura. Igualmente ocorre com o balanço de energia do reator de secagem que, nas condições deste MTSL, não sofre variação em relação ao aumento ou redução no teor de ST do lodo misturado, desde que o valor de ST e temperatura do lodo recirculado (estado 4) sejam iguais aos valores do lodo de saída (estado 3).

3.4.4.1 Balanço de massa do lodo misturado

O balanço de massa do lodo misturado é determinado a partir da Equação 39.

$$\dot{m}_{L2} = \dot{m}_{L0} + \dot{m}_{L4} \quad (39)$$

Sendo:

\dot{m}_{L2} : vazão mássica do lodo misturado – estado 2, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

\dot{m}_{L4} : vazão mássica do lodo recirculado – estado 4, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Para o lodo preaquecido, a sua vazão mássica é igual ao lodo úmido (estado 0), pois o processo que leva o lodo do estado 0 ao 1 é conservativo em relação à massa. A vazão mássica de lodo recirculado, que deve ser misturado ao lodo preaquecido, é determinada pela Equação 40, que correlaciona o teor de ST desejado na mistura com as características dos demais lodos.

$$\dot{m}_{L4} = \frac{\dot{m}_{L0}(X_{L0} - X_{L2})}{(X_{L2} - X_{L4})} \quad (40)$$

Sendo:

X_{L2} : teor de ST desejado no lodo misturado – estado 2, %;

X_{L4} : teor de ST do lodo recirculado – estado 4, %.

O lodo recirculado tem as mesmas propriedades intensivas que o lodo de saída do reator de secagem, portanto iguais teores de ST em ambos os materiais ($X_{L4} = X_{L3}$).

Conforme detalhado a seguir, os balanços de massa e energia do lodo seco e da água que constituem o lodo misturado são realizados separadamente, pois os mesmos estão em estados distintos em comparação aos seus fluxos de formação.

A parcela que corresponde ao lodo seco é estimada com a Equação 41.

$$\dot{m}_{L2_{seco}} = \dot{m}_{L2} \left(\frac{X_{L2}}{100} \right) \quad (41)$$

Sendo:

$\dot{m}_{L2_{seco}}$: vazão mássica do lodo seco presente no lodo misturado – estado 2, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

A parcela referente à água no lodo misturado é estimada com a Equação 42.

$$\dot{m}_{L2_{\text{água}}} = \dot{m}_{L2} \left(1 - \frac{X_{L2}}{100} \right) \quad (42)$$

Sendo:

$\dot{m}_{L2_{\text{água}}}$: vazão mássica de água líquida presente no lodo misturado – estado 2, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.4.4.2 Balanço de energia do lodo misturado

O lodo misturado (estado 2) é formado por dois tipos de lodos e se considera que todos os seus componentes estão em equilíbrio térmico ao final da mistura.

Com base nas premissas adotadas para o MTSL e que são apresentadas no subtópico 3.4, o balanço de energia se resume às quantidades de calor que são trocadas entre os fluxos de lodo, conforme mostra a Equação 43, que é decorrente da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica.

$$\dot{H}_{L2} = \left(\dot{m}_{L0_{seco}} h_{L1_{seco}} + \dot{m}_{L0_{\text{água}}} h_{L1_{\text{água}}} \right) + \left(\dot{m}_{L4_{seco}} h_{L4_{seco}} + \dot{m}_{L4_{\text{água}}} h_{L4_{\text{água}}} \right) \quad (43)$$

Sendo:

\dot{H}_{L2} : fluxo de energia presente no lodo misturado no estado 2, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$;

$h_{L4_{seco}}$: entalpia específica do lodo seco no estado 4, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$h_{L4_{\text{água}}}$: entalpia específica da água presente no lodo no estado 4, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Rearranjando a Equação 43 e usando a equação polinomial de entalpia para o lodo seco, determina-se a temperatura do lodo misturado, posterior a completa homogeneização do material e alcance do equilíbrio térmico, pela Equação 44.

$$\left[\frac{T_2(1434+3,29T_2)}{10^3} \right] + h_{\text{água}_{T_{L2}}} = \left[h_{L1} \left(1 + \frac{\dot{m}_{L0}}{\dot{m}_{L4}} \right) \right] + \left[h_{L4} \left(1 + \frac{\dot{m}_{L4}}{\dot{m}_{L0}} \right) \right] + \left[\frac{(1434T_0+3,29T_0^2)}{10^3} \right] + h_{\text{água}_{T_{L0}}} \quad (44)$$

Sendo:

T_{L2} : temperatura do lodo misturado no estado 2 – saída do misturador, °C;

$h_{\text{água}_{T_{L2}}}$: entalpia específica da água não saturada presente no lodo no estado 2, kJ.kg⁻¹.

A solução da Equação 44 parte do princípio que só existe uma temperatura do lodo seco e entalpia da água líquida não saturada que satisfazem a igualdade da equação, haja vista que todos os termos descritos são conhecidos. Portanto, a temperatura do lodo misturado (estado 2) é determinada com o auxílio da ferramenta *Solver* do *Software Microsoft Excel*®.

Ressalta-se, sobre a equação 44, que as entalpias e vazões mássicas do lodo no estado 0 e no estado 4 são desmembradas nas parcelas que correspondem à massa seca e água líquida durante a modelagem computacional, não sendo realizadas neste momento devido à trivialidade do desenvolvimento.

Portanto, o lodo misturado (estado 2) e o ar de secagem (estado 1) constituem os dois fluxos de entrada do secador, sendo a sua modelagem detalhada na seguir.

3.4.5 Submodelo do reator de secagem de lodo

Os dados disponibilizados pelos submodelos anteriores são empregados para realizar o balanço de massa e energia da secagem do lodo, conforme o esquema apresentado na Figura 43 e o equacionamento descrito a seguir.

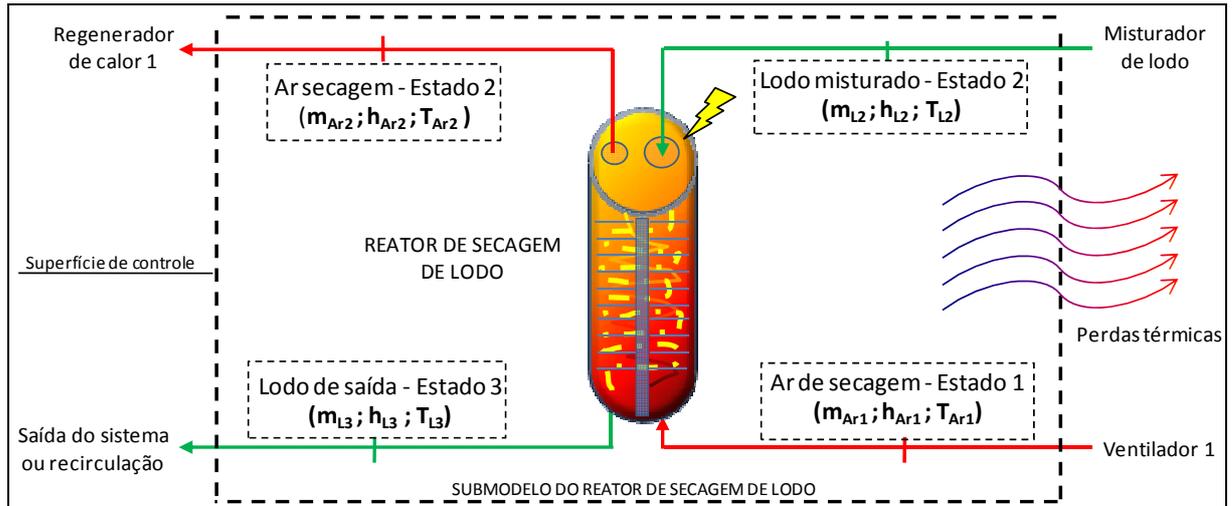


Figura 43 – etapas envolvidas no submodelo do reator de secagem.

Fonte: produção do próprio autor.

Aplicando a primeira lei da termodinâmica, é desenvolvido o balanço de energia simplificado para o reator de secagem do MTSL que resulta na Equação 45.

$$H_{L2} + H_{Ar1} = H_{L3} + H_{Ar2} + H_{W_{eva}} \quad (45)$$

Sendo:

$H_{W_{eva}}$: fluxo de energia de vaporização da água no secador, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ou kW_t .

O fluxo de energia de vaporização da água é incrementado ao balanço em função do emprego da modelagem descrita por Lozano e Valero (1986) que trata o ar como gás ideal, pois o modelo dos referidos autores não considera a entrada na mistura gasosa de massa proveniente de mudança de estado físico (vaporização), portanto, a energia necessária para a vaporização deve ser modelada separadamente.

A energia para a vaporização da água é o produto da vazão mássica de água vaporizada pelas variações de entalpia específica sofrida pela mesma entre a entrada e a saída do reator de secagem, seja essa variação no momento da vaporização ou nas mudanças de temperatura nos estados de líquido e vapor.

Entretanto, não importa a temperatura de vaporização que é escolhida (entre a temperatura do lodo misturado e o ar de secagem na saída do reator), pois a variação da entalpia específica de vaporização será compensada pelas variações da entalpia específica da água na forma líquida e de vapor.

Diante disso e para facilitar a modelagem, considera-se que toda a água líquida é vaporizada na temperatura do lodo no estado 2, conforme mostra a equação 46.

$$H_{W_{eva}} = m_{W_{eva}} \left[h_{vap_{TL2}} + (h_{v_{T_{Ar2}}} - h_{v_{TL2}}) \right] \quad (46)$$

Sendo:

$h_{vap_{TL2}}$: entalpia específica de vaporização na temperatura do lodo no estado 2, kJ.kg^{-1} ;

$h_{v_{T_{Ar2}}}$: entalpia específica do vapor d'água na temperatura do ar no estado 2, kJ.kg^{-1} ;

$h_{v_{TL2}}$: entalpia específica do vapor d'água na temperatura do lodo no estado 2, kJ.kg^{-1} .

O lodo no estado 3, saída do reator de secagem, tem a sua temperatura fixada em um valor definido durante a caracterização do lodo. Portanto, com o conhecimento prévio dos valores de entalpia e fluxo de energia do lodo misturado (estado 2) e do ar de secagem no estado 1, bem como as propriedades do lodo de saída (estado 3), pode-se rearranjar a Equação 45 e a desmembrar até resultar na Equação 47.

$$h_{Ar2} = \frac{\{H_{L2} + H_{Ar1} - W_R - (m_{L3_{seco}} h_{L3_{seco}} + m_{L3_{\text{água}}} h_{L3_{\text{água}}}) - m_{W_{eva}} [h_{eva_{TL2}} + (h_{v_{T_{Ar2}}} - h_{v_{TL2}})]\}}{m_{Ar1} + m_{W_{eva}}} \quad (47)$$

h_{Ar2} : entalpia específica do ar de secagem no estado 2, kJ.kg^{-1} .

Portanto, a única parcela não conhecida é a entalpia específica do ar na saída do reator e a vazão de ar na descarga do ventilador 1, sendo as demais parcelas estimadas, previamente, nos outros submodelos. Desta forma, a variação dos valores de vazão mássica possibilita a determinação da entalpia do ar no estado 2.

Por fim, a vazão de ar de secagem é a principal variável de controle empregada durante a etapa de modelagem computacional do MTSL (descrita no subtópico 3.5.4) e a entalpia específica do ar de secagem no estado 2 é determinada pela regressão da Equação 24, apresentada no subtópico 3.4.2.2.

3.5 ÍNDICES, INDICADORES, CENÁRIOS E CONDIÇÕES DO MTSL

A modelagem gera índices e indicadores de secagem, sendo que o primeiro é empregado para encontrar o início da viabilidade termodinâmica do modelo e o segundo é gerado para avaliar o sistema modelado e servir como valores de referência para o desenvolvimento desta tecnologia em escala real.

3.5.1 Índice térmico do secador

A temperatura do ar no estado 2 é uma importante propriedade para avaliar a capacidade de secagem de lodo, pois a referida temperatura deve ficar entre a temperatura do ar no estado 1 e do lodo no estado 2.

$$T_{L2} \leq T_{Ar2} < T_{Ar1}$$

Desta forma, é desenvolvido o índice térmico do secador (*ITS*) que é baseado na relação entre a temperatura do lodo misturado (estado 2) e o ar de secagem no estado 2, conforme é descrito na Equação 48.

$$ITS = \frac{T_{L2}}{T_{Ar2}} \quad (48)$$

Sendo:

ITS: índice térmico do secador, adimensional.

Os valores do *ITS* devem variar entre 0 e 1, valendo a seguinte interpretação para os índices extremos e superiores a unidade:

ITS \approx 0: a temperatura do ar na saída do secador é muito elevada, podendo indicar que o processo ocorre de forma superdimensionada pela entrada de elevado fluxo de energia por parte do ar de secagem ou que o tempo de exposição não é suficiente para garantir a transferência de calor adequada entre o ar e o lodo;

ITS \approx 1: significa que o processo esta no limite ou início da viabilidade termodinâmica (depende do lado pelo qual o *ITS* se aproxima da unidade), porque o lodo na entrada do reator (estado 2) e o ar na saída do reator (estado 2) estão no limiar de atingirem o equilíbrio térmico. Portanto, a partir deste ponto, qualquer incremento na demanda por energia para a secagem do lodo ou redução na temperatura do ar de secagem implicará, inevitavelmente, no não alcance da temperatura desejada para o lodo na saída do reator de secagem (estado 3).

ITS $>$ 1: significa que a máxima capacidade de secagem ou o limite termodinâmico é ultrapassado e a temperatura do lodo na saída do secador (estado 3) não atingirá o valor desejado (será inferior). Assim sendo, tal resultado indica que a secagem simulada, nas condições definidas do modelo, não é satisfatória e, por consequência, os dados gerados não são consistentes termodinamicamente.

3.5.2 Índice energético do secador

O índice energético do secador (IES) relaciona a quantidade de calor sensível que é trocado pelo ar de secagem pelo máximo calor sensível que poderia ser trocado nas condições modeladas, conforme mostra a Equação 49 ao correlacionar a variação de temperatura ocorrida no ar de secagem com a máxima variação possível caso a temperatura do ar fosse igual ao do lodo na entrada do secador.

$$IES = \frac{\bar{C}_{Ar1}(\Delta T_{Ar1,2})}{\bar{C}_{Ar1}\Delta T_{Armax}} = \frac{\bar{C}_{Ar1}(T_{Ar1}-T_{Ar2})}{\bar{C}_{Ar1}(T_{Ar1}-T_{L2})} = \frac{T_{Ar1}-T_{Ar2}}{T_{Ar1}-T_{L2}} \quad (49)$$

Sendo:

IES: índice energético do secador, adimensional;

\bar{C}_{Ar1} : Capacidade térmica do ar de secagem no estado 1, kW.°C-1;

$\Delta T_{Ar1,2}$: Variação de temperatura do ar de secagem entre o estado 1 e 2, °C;

ΔT_{Armax} : Máxima variação possível de temperatura para o ar entre o estado 1 e 2, °C.

O *IES* representa a parcela da energia que é utilizada para realizar a secagem do lodo no interior do reator em referência a quantidade de energia disponível pelo ar para a secagem, quando o secador opera na capacidade máxima. Sendo que o índice deve apresentar, semelhante ao ITS, valores variando de 0 a 1 e a avaliação de valores extremos pode ser realizada da seguinte forma:

IES \approx 0: significa que a quantidade de energia disponibilizada para realizar a secagem é muito superior a demandada pelo processo de secagem;

IES \approx 1: significa que toda a energia disponível no ar de secagem é utilizada durante o processo de secagem, indicando que o processo está no limite ou início da viabilidade termodinâmica (depende do lado pelo qual o IES se aproxima da unidade);

IES $>$ 1: significa que existe um déficit de energia para satisfazer a demanda energética da secagem do lodo, indicando que o lodo não apresentará a temperatura e/ou umidade desejada no final do processo, da mesma forma que os dados gerados não são consistentes termodinamicamente.

Portanto, esse índice permite avaliar, em conjunto com o ITS, a viabilidade termodinâmica da secagem de lodo com o uso de energia heliotérmica.

Para a modelagem deste estudo, o ITS e o IES representam um papel vital, pois esses dois índices são utilizados para limitar a modelagem para valores aceitáveis do ponto de vista termodinâmico, conforme é mais bem detalhado no subtópico 3.5.4.

3.5.3 Indicadores do MTSL

Posterior a avaliação dos índices, são gerados e avaliados os indicadores que fazem referência a quantidade de insumos necessários para o processo de secagem, sendo os mesmos apresentados e descritos a seguir.

- Demanda térmica heliotérmica (DTH): quantidade de energia térmica produzida para vaporizar uma tonelada de água, considerando as perdas globais do MTSL ($GJ_t \cdot t_v^{-1}$ ou $kWh_t \cdot t_v^{-1}$);
- Demanda térmica do secador (DTS): quantidade de energia térmica demandada para o secador vaporizar uma tonelada de água, considerando as perdas de secagem e partida do secador ($GJ_t \cdot t_v^{-1}$ ou $kWh_t \cdot t_v^{-1}$);
- Fluxo térmico de secagem (FTS): fluxo de energia demandado para a secagem térmica do lodo, considerando apenas as perdas de secagem (kW_t);
- Demanda de ventilação para a secagem (DVS): potência demandada nos ventiladores para vaporizar uma tonelada de água ($kW_e \cdot t_v^{-1}$) com referência a uma determinada temperatura de operação do reator;
- Demanda de ar para a secagem (DAS): massa de ar seco demandada para vaporizar uma tonelada de água líquida com referência a uma determinada temperatura de operação do reator ($t_{ar_{seco}} \cdot t_v^{-1}$);
- Purga de ar de secagem (PAS): massa de ar seco purgada do MTSL para vaporizar uma tonelada de água ($t_{ar_{seco}} \cdot t_v^{-1}$);
- Razão de renovação de ar (RRA): relação entre a massa de ar seco purgada do MTSL pela massa de ar seco na entrada do secador (*adimensional*);
- Área espelhada para a secagem (AES): área espelhada do campo solar que é demandada para vaporizar uma tonelada de água ($m^2 \cdot t_v^{-1}$);
- Relação água-superfície (RAS): quantidade de água condensada ao dia por metro quadrado de área espelhada do campo solar ($L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$).

Os indicadores são comparados, quando possível, com valores de literatura para verificar se a modelagem atingiu valores condizentes com a realidade.

3.5.4 Cenários modelados e condições do MTSL

São modelados dois cenários de secagem, conforme é pontuado a seguir:

- CENÁRIO 1: secagem térmica por 9 horas contínuas durante o período do dia, sendo empregado o TES apenas para a estabilização do sistema no início e final da operação;
- CENÁRIO 2: secagem térmica contínua (24 horas por dia), sendo empregado o TES para a estabilização e como fonte térmica no período noturno.

Para a partida diária do secador no cenário 1 é considerado a energia térmica demandada durante uma hora de operação do secador para realizar o aquecimento do fluxo de ar de secagem e do lodo misturado das condições de referência até a temperatura de operação de cada fluxo na entrada do secador, além da adição das perdas térmicas globais de 20% sobre essa quantidade de energia.

Para a modelagem são estipuladas condições, através da ferramenta *solver* do *Microsoft Excel*, para o modelo gerar resultados adequados no ponto de vista termodinâmico. Para isso, são estabelecidas as seguintes condições sobre dois submodelos:

- SECADOR DE LODO: busca-se a menor vazão de ar seco na entrada do secador (variável do MTSL) que satisfaça as seguintes condições: (1) ar de secagem na saída do secador na condição de saturado de vapor d'água, (2) IES e ITS tendendo a unidade, (3) variação da vazão de vapor d'água, entre o ar de purga e o ar de renovação, igual a vazão de água vaporizada no secador de lodo e, (4) vazão de ar seco de renovação igual a vazão de ar seco de purga;
- SISTEMA HELIOTÉRMICO: busca-se a menor área espelhada de CSP (variável do modelo) que satisfaça as seguintes condições: (1) produza ao longo do dia a energia necessária para atender a demandada de aquecimento do fluxo de ar de secagem e as perdas do TES, (2) forneça uma quantidade adequada de energia térmica ao TES para o secador operar nos horários de baixa DNI, (3) utilize toda a capacidade do TES, uma vez ao dia.

CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho estão divididos em duas partes para irem ao encontro dos objetivos específicos que foram propostos:

- I. Caracterização do lodo: cujos objetivos principais são de definir a melhor temperatura de secagem e o teor de ST que o lodo úmido e seco deve apresentar na entrada e saída do secador, respectivamente. Além da comparação entre as taxas de secagem de diferentes métodos;
- II. Modelagem termodinâmica: cujos objetivos são de verificar a sua viabilidade termodinâmica e disponibilizar indicadores para um sistema em escala real.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

4.1.1 Coleta e preparo das amostras

4.1.1.1 Coleta e secagem inicial de parcela do lodo centrifugado

A coleta do lodo foi realizada na ETE Mulembá I, diretamente da caçamba de lodo centrifugado e com o auxílio de pás e enxadas, sendo o material armazenado numa caçamba forrada com lona plástica. Parte do lodo centrifugado coletado (aproximadamente 500kg) foi removido para uma área rural no município de Alfredo Chaves, estado do Espírito Santo, para passar por um processo de secagem térmica e gerar lodo seco, para posteriormente ser misturado com o lodo centrifugado.

A secagem térmica ocorreu sobre chapas metálicas fabricadas com liga de zinco que foram utilizadas como o leito de secagem, sendo as mesmas aquecidas pela combustão de madeira residual no interior de uma calha parabólica que foi instalada sob as chapas, conforme ilustram as Figuras 44 e 45.

Ao longo da secagem a calha parabólica foi movimentada para garantir a homogeneidade do aquecimento, somado ao revolvimento do lodo com o auxílio de uma enxada para evitar a consolidação da capa superficial de secagem e a formação de grandes torrões ao final do processo, conforme ilustra a Figura 46, na comparação entre o lodo antes e depois da mistura manual.



Figura 44: início da secagem do lodo sobre chapa aquecida e a calha parabólica sob o leito.
Fonte: produção do próprio autor.



Figura 45: liberação de vapor d'água e fumaça durante a secagem sobre chapa aquecida.
Fonte: produção do próprio autor.



Figura 46: lodo de menor diâmetro revolvido e lodo aglomerado com maior diâmetro não revolvido.
Fonte: produção do próprio autor.

Decorrido 7 dias de secagem sobre a chapa aquecida o lodo apresentou significativa redução de volume, granulometria grosseira e ausência de água livre durante a avaliação visual e por torque com as mãos, conforme mostra a Figura 47.



Figura 47: lodo após 7 dias de secagem com a granulometria grosseira e ausência de água livre.
Fonte: produção do próprio autor.

Com o término da secagem e o resfriamento natural da chapa metálica o lodo foi armazenado em sacos plásticos e transportado, juntamente com o restante do lodo úmido centrifugado, para o LEH da UNIFEI, em Minas Gerais.

Dentro das dependências da UNIFEI foi realizada a secagem térmica a 80°C de 10kg do lodo centrifugado, que foi coletado na ETE Mulembá I, pois durante a caracterização morfológica do lodo foram comparados a granulometria dos lodos tratados por diferentes métodos. A Figura 48 mostra o lodo sendo processado na estufa elétrica instalada no LCGC do NEST-UNIFEI.



Figura 48: lodo centrifugado no início da secagem em estufa (esquerda) e ao final (direita).
Fonte: produção do próprio autor.

4.1.1.2 Destorroamento do lodo seco

No LEH da UNIFEI o lodo submetido a secagem sobre a chapa aquecida passou por um processamento de destorroamento manual com o auxílio de um cilindro metálico. O processo consistiu em rolar por 20 repetições o cilindro metálico sobre 1,3kg de lodo, distribuído dentro de um saco plástico e apoiado no piso de concreto do laboratório, para obter uma granulometria menor e com maior homogeneidade.

Deste ponto em diante o lodo produzido sobre a chapa aquecida foi denominado de lodo não destorroado e o lodo obtido após o processamento realizado no LEH foi denominado de lodo destorroado.

4.1.1.3 Mistura de lodo destorroado e úmido

Os lodos destorroado e centrifugado foram misturados em diferentes proporções para obter teores de 20 a 90% de ST com variação de 10% entre cada amostra, sendo os resultados finais apresentados na Tabela 14, enquanto os valores detalhados de cada análise estão descritos na Tabela 21 do Apêndice A.

Tabela 14: teores médios de ST e os desvios padrões das misturas de lodos.

| TEORES DE ST NOS LODOS (%) | | |
|-----------------------------------|------------|---------------|
| Desejado | Média real | Desvio Padrão |
| 90 | 89,45 | 0,80 |
| 80 | 79,93 | 0,71 |
| 70 | 69,14 | 0,57 |
| 60 | 59,46 | 1,58 |
| 50 | 50,55 | 0,63 |
| 40 | 41,44 | 1,37 |
| 30 | 31,41 | 1,64 |
| 20 | 20,15 | 0,33 |
| Cent. | 16,02 | 0,38 |

Fonte: produção do próprio autor.

Com o alcance do teor de ST desejado, as misturas foram submetidas aos ensaios de caracterização que foram descritos a seguir.

4.1.2 Caracterização morfológica dos lodos

4.1.2.1 Caracterização granulométrica

Para esta avaliação foram elaboradas as curvas de distribuição granulométrica do lodo centrifugado que foi tratado pelos seguintes métodos de secagem:

- Método do leito granular: representado pelo lodo tratado no secador experimental;

- Método convectivo: representado pelo lodo tratado em estufa, tratado sobre chapa aquecida sem destorroamento (lodo não destorroado) e tratado sobre chapa aquecida com destorroamento (lodo destorroado).

O lodo tratado no secador experimental e em estufa foram processados a 80°C. Enquanto para o lodo tratado sobre chapa aquecida a temperatura ao longo da secagem não foi controlada, chegando a valores de até 150°C.

De forma geral, os resultados da Figura 49 tem o intuito de conhecer a diferença granulométrica do lodo tratado por diferentes métodos de secagem térmica.

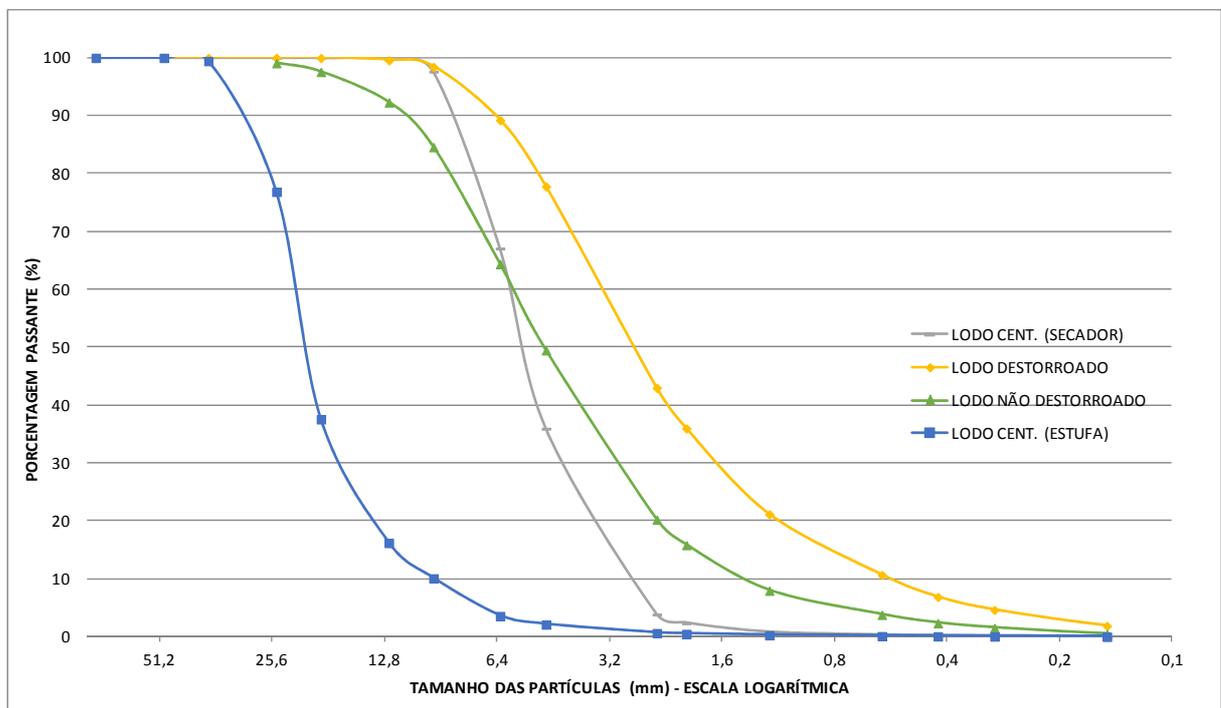


Figura 49: distribuição granulométrica do lodo centrifugado tratado por diferentes métodos.
Fonte: produção do próprio autor.

Observa-se, nitidamente, a diferenciação do lodo tratado em estufa com o lodo destorroado e lodo tratado no secador experimental. O primeiro apresenta uma distribuição granulométrica mais grossa, ficando 90% da massa retida na peneira com diâmetro de 9,5mm. Enquanto os últimos apresentam 90% da massa retida na peneira de 0,6mm e 2,4mm, respectivamente.

A diferença apresentada entre o lodo não destorroado com o lodo tratado em estufa e em menor proporção com o lodo tratado no secador experimental ocorre pelo fato que o primeiro sofreu a mistura manual (auxiliado com enxada e rastelo) durante a secagem, enquanto os demais não apresentaram nenhuma forma de movimentação manual ou mistura durante o processo de secagem.

Já a diferença entre o lodo tratado em estufa e tratado no secador experimental se deve ao fato que o primeiro foi processado com base no método de secagem convectivo (o ar fica no entorno do montante de lodo) e no segundo foi com base no método do leito granular (o ar escoia através do leito de lodo e colabora para a redução da granulométrica do material). Para melhor ilustrar a diferença de proporcionalidade entre os grãos secos, a Figura 50 faz uma comparação direta entre o lodo tratado em estufa e tratado no secador experimental a 80°C.

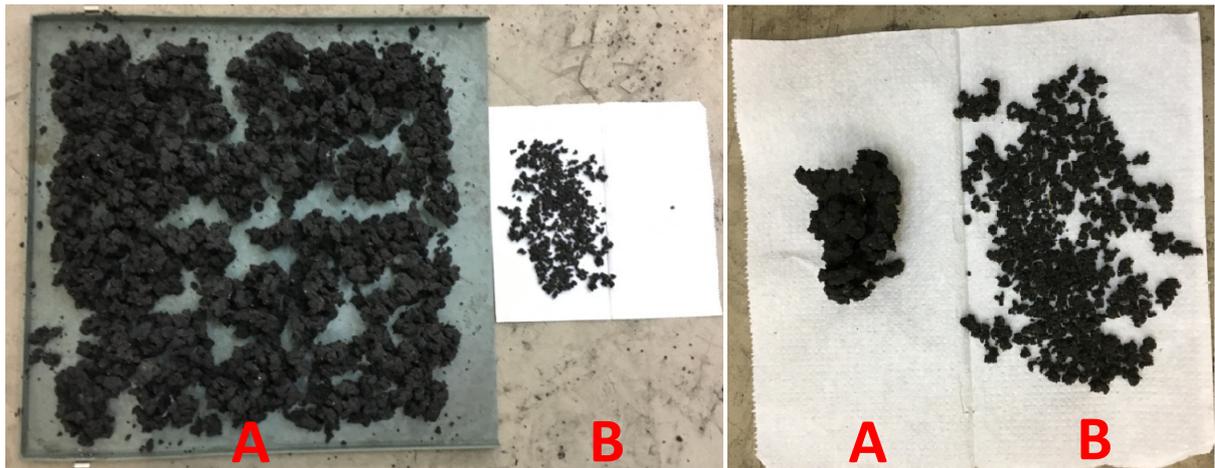


Figura 50: lodo centrifugado com secagem em estufa (A) e no secador experimental (B).

Fonte: produção do próprio autor.

Observa-se que o lodo tratado em estufa forma torrões que são constituídos por grandes grãos aglomerados, enquanto o lodo tratado no secador experimental tem o aspecto granular e grãos de pequenas dimensões.

Para a diferença na distribuição granulométrica entre o lodo destorroado e não destorroado, observa-se que as curvas são semelhantes, mas a primeira é deslocada para a direita e apresenta menor granulometria que a segunda, contexto condizente com o objetivo da etapa de destorroamento que foi realizada.

Numa segunda avaliação, foram montadas as curvas de distribuição granulométrica dos lodos tratados com diferentes teores de ST no secador experimental a 80°C, conforme mostra a Figura 51.

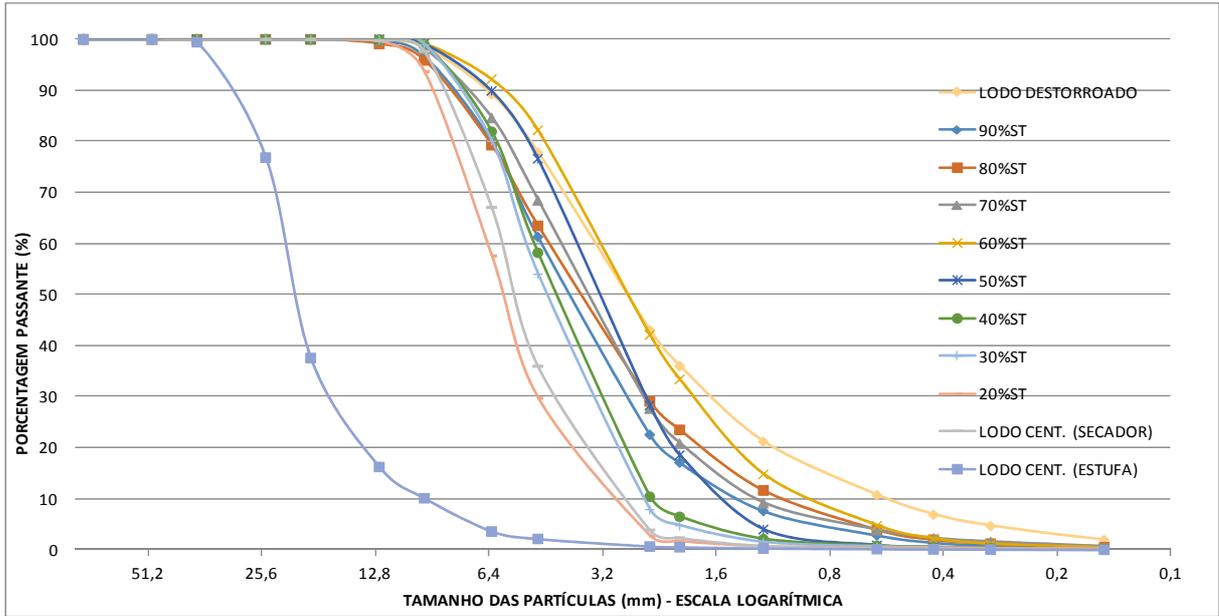


Figura 51: distribuição granulométrica de todos os lodos submetidos a secagem neste estudo. Fonte: produção do próprio autor.

Para os lodos misturados que foram tratados no secador experimental, observa-se o benefício do método pela convergência da distribuição granulométrica para uma faixa de menor dimensão que o lodo tratado em estufa (método convectivo).

Para melhor diferenciar a distribuição granulométrica entre os lodos, a Figura 52 mostra a classificação das partículas presentes nas amostras tratadas, além do módulo de finura que permite comparar a variação granulometria de diferentes materiais que apresentam a mesma origem.

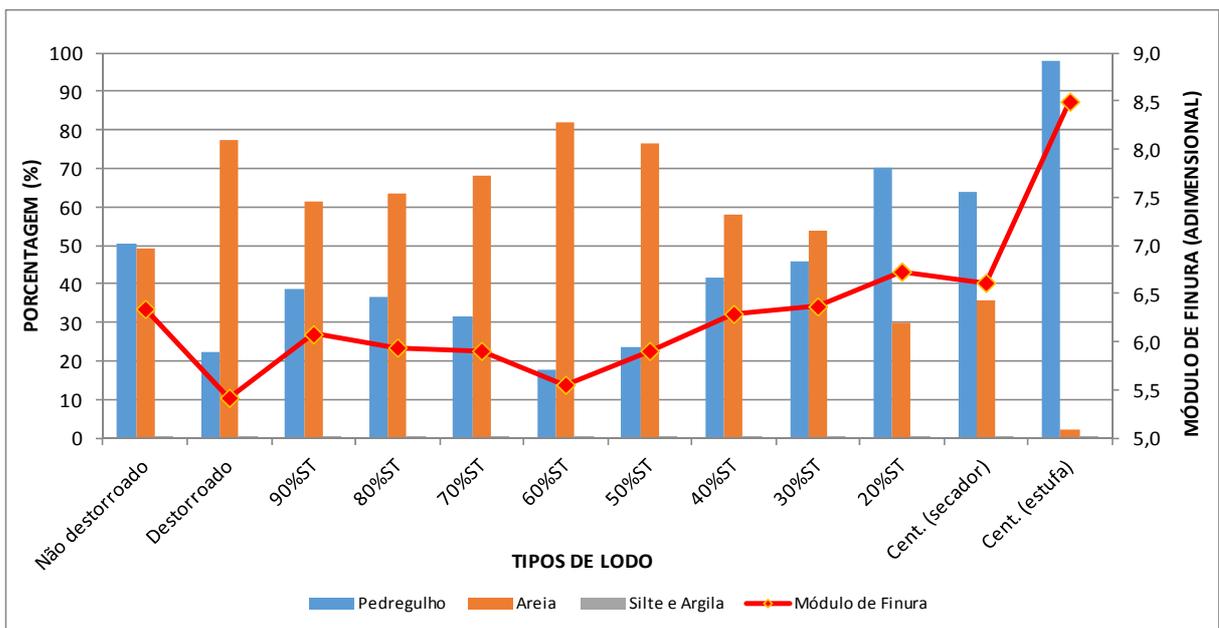


Figura 52: classificação das partículas e módulo de finura dos lodos submetidos a secagem. Fonte: produção do próprio autor.

Com a classificação das partículas, observa-se a tendência existente dos lodos com altos e baixos teores de ST de formarem grãos mais grosseiros (diâmetro equivalente a um pedregulho) e a redução da tendência a medida que os valores de ST no início do processo de secagem vão em direção aos 60% de ST.

Por fim, os resultados detalhados dos ensaios de granulometria, presentes nas Tabelas 22 a 27 do Apêndice B, indicam que o tratamento pelo método do leito granular é mais interessante que o método convectivo por gerar uma menor granulometria ao material, somado ao fato que os lodos tratados com 50 a 70% de ST geram partículas menos grosseiras e com classificação semelhante a da areia.

A formação de partículas granulares é interessante para o uso do material, pois diâmetros menores geram melhores resultados para a peletização do lodo (JIANG *et al*, 2014) e na gaseificação fluidizada a predominância de partículas granulares e com poucos finos reduz o risco de bloqueio do leito (REYES *et al*, 2014).

4.1.2.2 Caracterização estereomicroscópica

I. Lodo tratado

Para o lodo tratado que apresentava os teores iniciais de 70 a 90% de ST, observou-se grande semelhança ao lodo destorroado em relação aos grãos com grandes dimensões e menores irregularidades na superfície, conforme mostra a Figura 53.

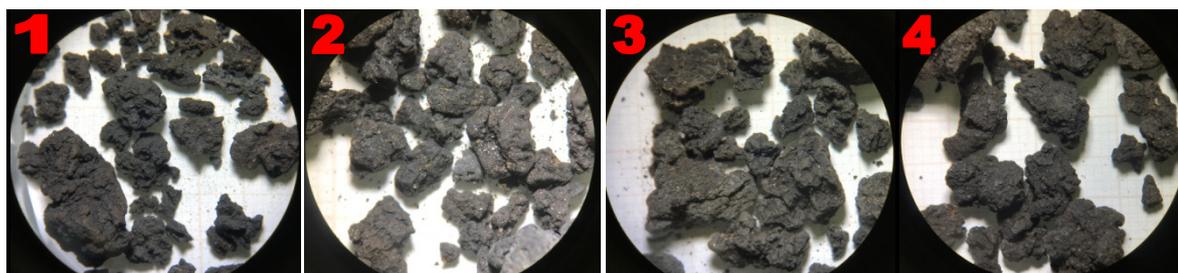


Figura 53: lodo tratado, respectivamente, destorroado (1), 70% (2), 80% (3) e 90% (4) de ST.
Fonte: produção do próprio autor.

Para os lodos com teores iguais e inferiores aos 60% de ST, observou-se grãos com morfologia longitudinal (grãos angulares e alongados), superfícies com maiores irregularidades e menores diâmetros (principalmente com 50 e 60% de ST), conforme mostram as Figuras 54, grãos do lodo tratado com 15% (1), 20% (2) e 30% (3) de ST, e Figura 55, grãos do lodo tratado com 40% (1), 50% (2) e 60% (3) de ST.

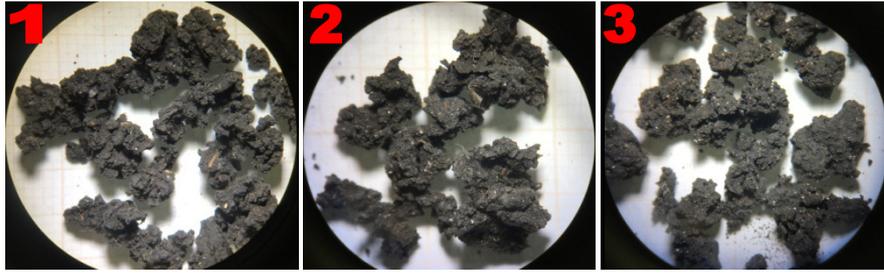


Figura 54: lodo tratado, respectivamente, centrifugado (1), 20% (2) e 30% (3) de ST.
Fonte: produção do próprio autor.



Figura 55: lodo tratado, respectivamente, 40% (1), 50% (2) e 60% (3) de ST.
Fonte: produção do próprio autor.

Os lodos com teores de 20 e 30% de ST formam grão frágeis e que são facilmente quebrados durante a movimentação. Entretanto, o perfil alongado que os mesmos apresentam é, em alguns casos, originado por ligações de caráter mecânico advindos de fios de cabelo que não foram destruídos no tratamento térmico. Na Figura 56, observa-se a presença de fio de cabelo em grão alongado e na Figura 57 a ligação mecânica entre os grãos antes (1) e após a ruptura do fio (2).



Figura 56: indicação, no lodo seco centrifugado, do fio de cabelo vindo do interior do grão.
Fonte: produção do próprio autor.

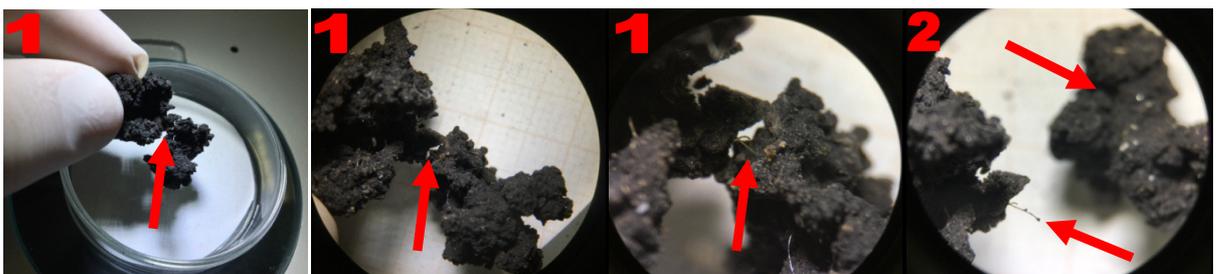


Figura 57 – indicação, no lodo destorroado, da ligação mecânica intergranular por fio de cabelo.
Fonte: produção do próprio autor.

Não foi observado na literatura da área o relato de problemas com fios de cabelo em lodos submetidos a secagem em altas temperaturas. Entretanto, na secagem em baixa temperatura a existência de fios de cabelo no lodo pode influenciar na granulometria final dos grãos e, inclusive, na movimentação do material no interior de um secador em escala real, pois a temperatura de degradação da estrutura proteica da queratina ocorre a partir dos 135°C (MUSTAFÁ *et al*, 2011).

II. Lodo úmido

Para o lodo úmido foi observada uma mudança significativa na superfície dos grãos para os teores de 50 e 60% de ST, sendo que no primeiro a superfície do grão estava completamente úmida e recoberta com o lodo centrifugado que foi misturado. Enquanto no segundo, existiam áreas sem recobrimento e com crescimento de fungos de coloração esbranquiçada, além do grão não apresentar o brilho natural de uma superfície molhada. A Figura 58 e 59 mostram as diferentes características dos grãos com teores de 50 e 60% de ST, respectivamente.

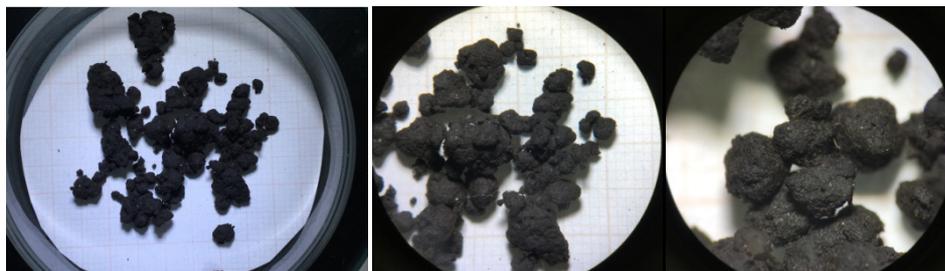


Figura 58: lodo com 50% de ST e a superfície úmida e recoberta de lodo centrifugado.
Fonte: produção do próprio autor.

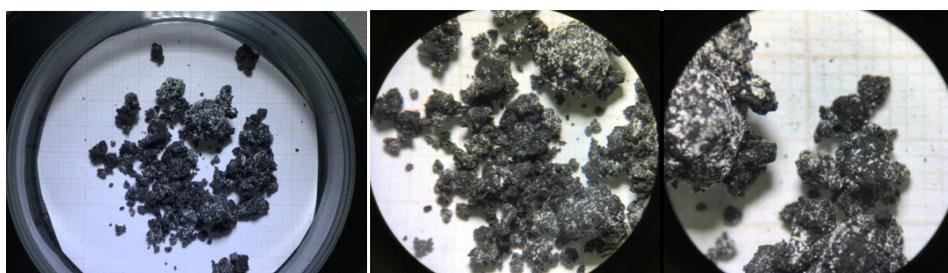


Figura 59: lodo com 60% de ST apresentando fungos e recobrimento parcial de lodo centrifugado.
Fonte: produção do próprio autor.

Nos lodos úmidos com 20 e 30% de ST, observou-se uma camada mais espessa, brilhosa e com superfície lisa em comparação ao lodo com 50% de ST, características muito semelhantes ao lodo centrifugado, conforme pode ser comparado na Figura 60, lodo com 30% (1) e 20% (2) de ST, com a Figura 61, lodo centrifugado.



Figura 60: lodos úmidos com teores de 30% (1) e 20% (2) de ST com espessa camada de recobrimento.
Fonte: produção do próprio autor.



Figura 61: indicação, no lodo centrifugado, dos pontos com fios de cabelo.
Fonte: produção do próprio autor.

A estereomicroscopia apresentada na Figura 60, juntamente com as observações realizadas em campo durante o manuseio dos lodos com 20 e 30% de ST, indicam que as referidas amostras eram o resultado de uma aglomeração de várias partículas de lodo tratado com o lodo centrifugado que funcionou como uma pasta de agregação entre os grãos, formando grandes torrões de lodo úmido.

Na Figura 61 também é possível observar a presença de fios de cabelo e duas fases distintas de lodo que são identificadas pela coloração marrom clara (lodo aeróbio) e coloração escura (lodo anaeróbio), possivelmente as diferentes colorações foram geradas por um déficit de oxigênio no reator de biodigestão.

De forma geral, entende-se que o teor de ST de 50% é o que indica a melhor condição para alcançar maiores taxas de secagem com base nos resultados deste ensaio, pois as suas características vão ao encontro do princípio que a transferência de calor e massa no processo de secagem é diretamente proporcional a área de contato lodo-ar e inversamente proporcional a espessura da camada de lodo centrifugado que envolve o grão tratado.

4.1.2.3 Caracterização das relações massa-volume

Os lodos úmidos e tratados no secador experimental foram ensaiados para determinar as massas específicas aparentes (MEA), massas específicas reais (MER) e índices de vazios (IV), sendo os resultados apresentados na Figura 62.

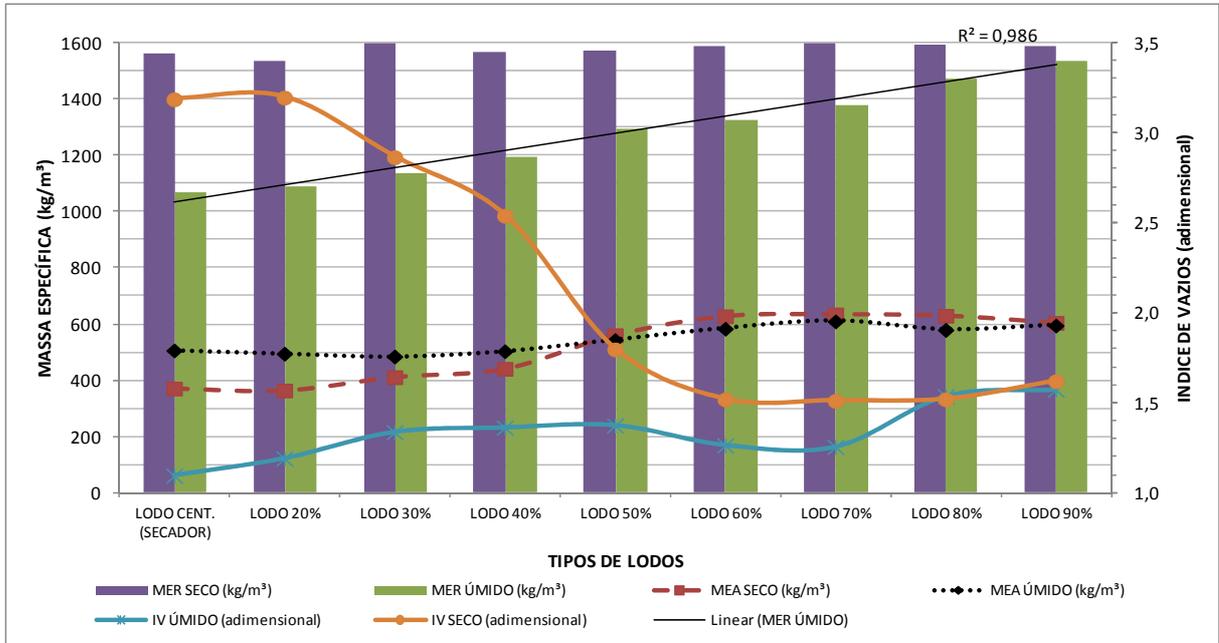


Figura 62: massas específicas e índices de vazios dos lodos submetidos a secagem experimental.
Fonte: produção do próprio autor.

Para o lodo úmido é observado uma variação linear na MER à medida que o teor de ST é alterado, conforme mostra a linha de tendência com o R-quadrado de 0,986. Tal ocorrência é justificada pela variação da quantidade de água presente na mistura, haja vista que a MER para teores baixos de ST se aproxima da MER da água pura ($997\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a 25°C e $1,013\text{Bar}$) e para altos teores de ST tende para a MER do lodo destorroado ($1.661\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Para as MEA uma considerável variação ocorreu sobre o lodo tratado entre baixos e altos teores de ST, alcançando o aumento de 70,8% no lodo com 70% de ST em comparação ao lodo centrifugado. Tal situação é compreensível ao correlacionar os resultados da MEA com os índices de vazios e os módulos de finura apresentados no subtópico 4.1.2.1, pois a regressão linear dos módulos de finura com as MEA resultam no R-quadrado de -0,918, mostrando que a granulometria do material influenciou de forma inversamente proporcional a variação da MEA do lodo tratado.

Os IV dos lodos úmidos apresentam uma tendência crescente até o teor de 50% de ST e oscilam até o teor de 90% de ST. Acredita-se que nos teores mais baixos de ST ocorre o efeito

da autocompactação do material durante o ensaio, somado ao fato que uma maior ocupação dos vazios ocorre naturalmente pela maior disponibilidade de água livre presente no lodo centrifugado. Enquanto nos teores mais elevados de ST a influencia da granulometria das partículas secas e a eliminação das características plásticas da mistura são os principais motivos que levaram a oscilação dos IV na faixa de 60 a 90% de ST.

Considerando os exposto neste subtópico e o detalhamento dos dados de massas específicas presentes nas Tabelas 28 a 31 do Apêndice C, compreende-se que 50% de ST no lodo úmido é a condição que poderia gerar a melhor taxa de secagem, pois está atrelada ao maior índice de vazios para a faixa intermediária de ST e que, por sua vez, pode estar relacionada a uma maior área de contato entre lodo-ar durante a secagem.

4.1.2.4 Permeabilidade do lodo ao ar

Os resultados do ensaio de permeabilidade, apresentados na Figura 63, mostram uma apreciável variação nesta propriedade entre as amostras de lodo úmido que foram analisadas.

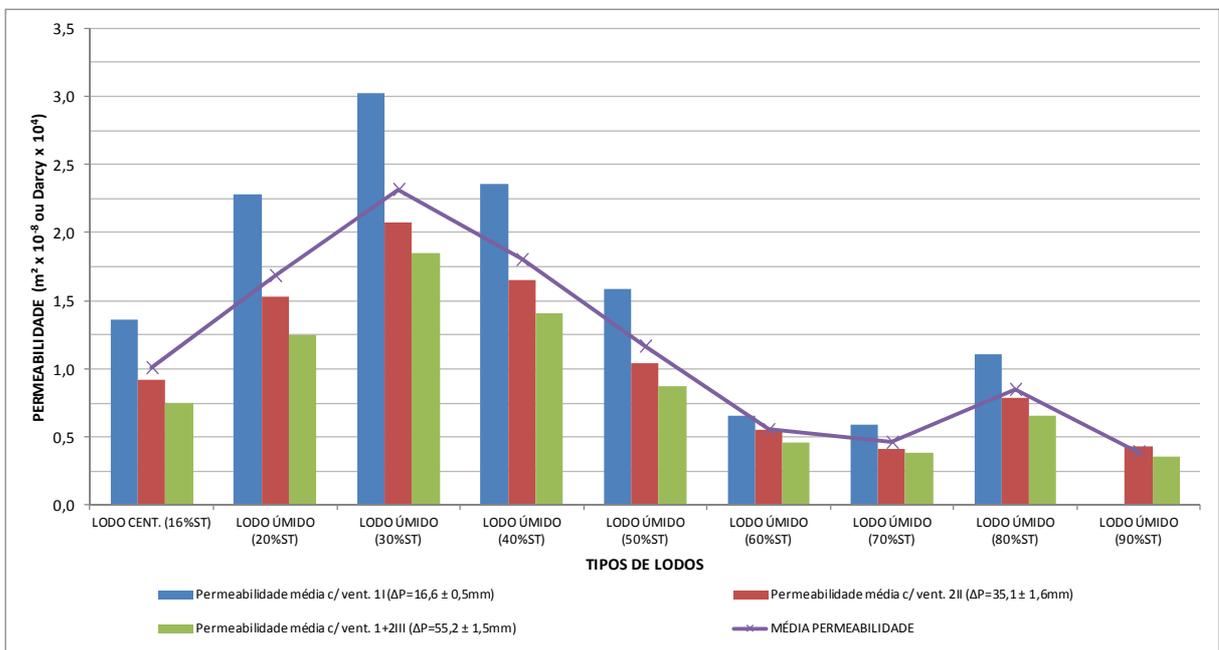


Figura 63: distribuição das permeabilidades do lodo ao ar para diferentes pressões estáticas.

Fonte: produção do próprio autor.

A permeabilidade foi calculada a partir da Lei de Darcy e os valores foram decrescentes a medida que o leito foi submetido a maiores pressões estáticas (ΔP_p médios de 16,6 até 55,2mm de coluna d'água). Possivelmente, a redução da permeabilidade é decorrente do aumento da velocidade de escoamento do ar pelo leito, gerando uma maior perda de carga.

Nota-se que o ensaio mostrou que é possível obter melhores taxas de permeabilidade com a mistura de lodo para os teores de 20 a 50% de ST em comparação ao lodo centrifugado. Entretanto, não foi observada uma correlação entre a permeabilidade e os resultados dos IV que foram apresentados no subtópico 4.1.2.3, pois o ápice da permeabilidade no lodo úmido ocorreu com 30% de ST, enquanto o maior índice de vazios ocorreu para o teor de 50% de ST.

Partindo do princípio que a distribuição dos vazios intergranulares e o diâmetro médio de cada vazio também são fatores importantes para definir a permeabilidade, acredita-se que a maior permeabilidade encontrada foi o fruto da existência de vazios de maiores diâmetros formados nos lodos com baixos teores de ST (15-40%), pois os mesmos se aglomeravam e formavam torrões de grandes dimensões, conforme descrito no ensaio de estereomicroscopia no subtópico 4.1.2.2. Enquanto os lodos com teores de ST mais elevados (50-90%) respeitavam, basicamente, os diâmetros originais das partículas de lodo tratado que foi misturado.

Para o lodo com o teor de 80% de ST, acredita-se que ocorreu alguma falha durante a mistura de lodo destorroado com o lodo úmido, pois foi perceptível na análise visual que a referida mistura apresentava uma granulométrica mais grosseira que os lodos úmidos com teores de ST de 70 e 90% de ST.

Apesar do objetivo deste ensaio estar na definição da melhor permeabilidade do leito para aumentar as taxas de secagem, os resultados não mostram com clareza se a permeabilidade no lodo com 30% de ST é sinônimo de maior superfície de contato entre ar-lodo ou foi apenas uma consequência de vazios com diâmetros maiores que os apresentados nas demais amostras, não garantindo melhores taxas de secagem como nos experimentos de ZHU et al. (2012) e Leonard et al. (2008).

Ante o exposto, seria interessante realizar um ensaio para determinar a distribuição e diâmetro médio dos vazios presentes nas misturas de lodo, podendo correlacionar com maior clareza se a permeabilidade encontrada, de fato, corresponderia a maior área de contato entre ar-lodo durante a secagem.

4.1.3 Tensão de adesão superficial

Para o ensaio da TAS foram preparadas 14 amostras distintas, sendo os resultados apresentados na Figura 64, em conjunto com a identificação dos seus estados físicos.

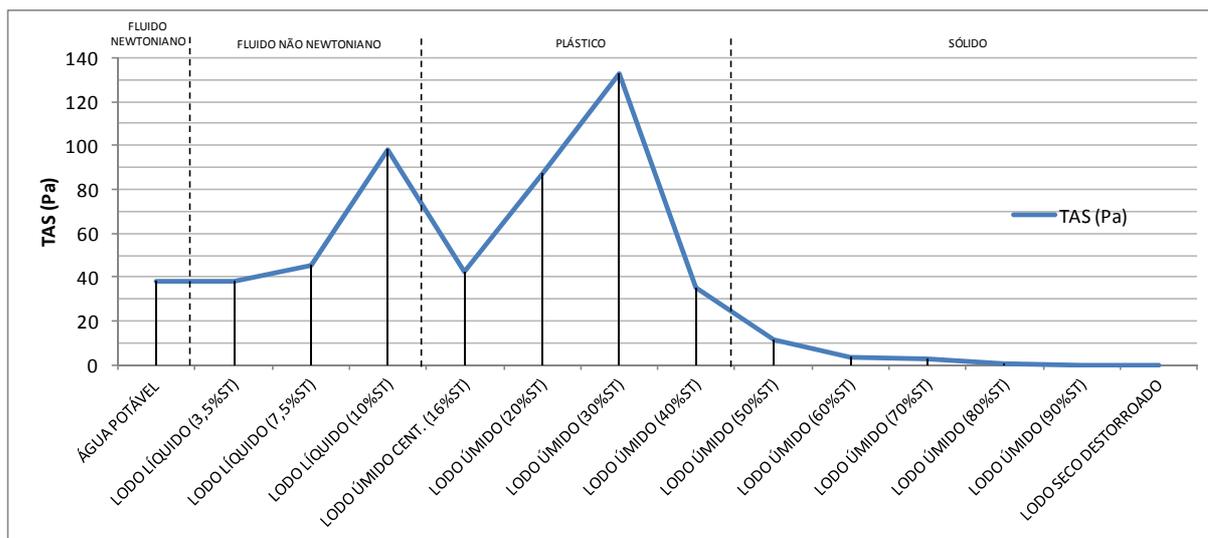


Figura 64: resultado dos testes de adesão e a indicação do estado físico de cada amostra.

Fonte: produção do próprio autor.

Foi possível observar, diante dos resultados apresentados, que os maiores valores de tensão de adesão do lodo são obtidos com os teores de 10% (lodo líquido) e 30% (lodo plástico) de ST, caracterizando que a faixa compreendida entre 7,5-40% de ST deve ser evitada para os processos de secagem térmica, pois podem gerar problemas operacionais como bloqueios de passagens, travamento de peças móveis e incrustações não desejadas, conforme citam BENNAMOUN et al., 2013 e DENG et al., 2017.

O comportamento da TAS foi semelhante aos resultados apresentados por Li et al. (2013), no entanto, os referidos autores encontraram a maior tensão de adesão no lodo centrifugado com 40% de ST, decrescendo para valores maiores e menores.

Também foi observada, numa avaliação visual e a olho desarmado sobre o lodo, uma grande mudança de características físicas a medida que os teores de ST aumentavam, conforme descrito a seguir:

- Lodo líquido até valores de 10% de ST;
- Lodo sólido e com características plásticas dos 15% a 40% de ST, reduzindo a plasticidade quanto maior o teor de ST;
- Lodo sólido na faixa de 50 a 90% de ST, aglomerando-se quando submetido a compactação manual com as mãos devido a presença de umidade na superfície dos grãos, mas os grãos não se deformavam;
- Lodo destorroado era sólido e seco, não aglomerando e nem deformando quando submetido à compactação manual com as mãos.

As características físicas descritas dos lodos são semelhantes às mencionadas por Von Sperling (2014) e Van Haandel e Lettinga (1994), mas apresentam uma ligeira diferença nas faixas pelo fato que este estudo trabalha com a mistura de lodo tratado com centrifugado, coexistindo as três formas de água na mistura (livre, adsorvida e intracelular). Enquanto para os autores citados a descrição dos estados físicos tem como base a remoção gradual da umidade, podendo predominar determinada forma de água em detrimento de outra.

De forma geral, os resultados apresentados neste subtópico indicam que o lodo úmido com o teor de 50% de ST é o mais adequado para o processo de secagem térmica defendido neste estudo, pois é o menor valor de ST que esta, simultaneamente, fora da faixa plástica e com a TAS inferior ao lodo centrifugado.

4.1.4 Umidade de equilíbrio (UE) e umidade residual do lodo (URL).

O ensaio mostrou que os lodos submetidos a secagem em temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C geram URL médias ao final do processo de, respectivamente, $2,24 \pm 0,88\%$, $1,49 \pm 0,57\%$, $0,89 \pm 0,38\%$ e $0,52 \pm 0,20\%$, conforme mostra a Figura 65, com as médias dos resultados apresentados nas Tabelas 32 e 33 do Apêndice D.

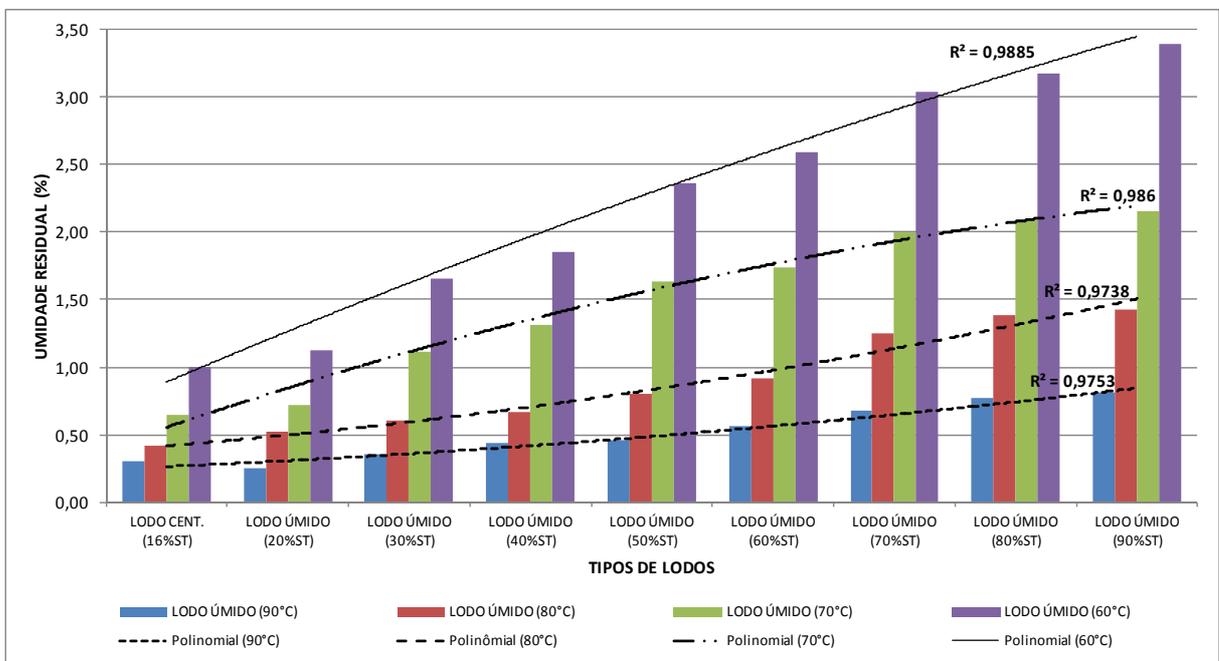


Figura 65: umidades residuais por tipo de lodo em função da temperatura de secagem.

Fonte: produção do próprio autor.

Também foi possível observar que existem dois tipos de correlações entre os teores de ST do lodo úmido com a temperatura de secagem e com a URL, conforme mostram os valores de R-quadrado, na Tabela 15, obtidos nas correlações realizadas no *software* Microsoft Excel®.

Tabela 15: correlações (R^2) entre as temperaturas com os teores de ST e com as URL.

| TEOR REAL DE ST (%) | 90°C | | 80°C | | 70°C | | 60°C | | MÉDIA | |
|---------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|------------------------------------|
| | URL (%) | R^2 |
| 16,02 | 0,30 | 0,987 (STxURL) _{90°C} | 0,42 | 0,980 (STxURL) _{80°C} | 0,65 | 0,983 (STxURL) _{70°C} | 1,00 | 0,992 (STxURL) _{60°C} | 0,59 | 0,995 (STxURL) _{MÉDIA} |
| 20,15 | 0,26 | | 0,52 | | 0,72 | | 1,13 | | 0,66 | |
| 31,41 | 0,36 | | 0,60 | | 1,11 | | 1,65 | | 0,93 | |
| 41,44 | 0,44 | | 0,66 | | 1,31 | | 1,85 | | 1,07 | |
| 50,55 | 0,46 | | 0,80 | | 1,64 | | 2,37 | | 1,32 | |
| 59,46 | 0,56 | | 0,92 | | 1,74 | | 2,59 | | 1,45 | |
| 69,14 | 0,68 | | 1,25 | | 1,99 | | 3,04 | | 1,74 | |
| 79,93 | 0,77 | | 1,38 | | 2,09 | | 3,17 | | 1,85 | |
| 89,45 | 0,81 | | 1,43 | | 2,15 | | 3,39 | | 1,95 | |
| MÉDIA | 0,52 | | 0,89 | | 1,49 | | 2,24 | | - | - |
| $-0,989 (URL \times T)_{MÉDIA}$ | | | | | | | | | | |

Fonte: produção do próprio autor.

De posse dos dados apresentados, as correlações indicam que:

- Quanto maior a temperatura de secagem, menor a URL ao final da secagem;
- Quanto maior o teor de ST presente no lodo úmido, maior será a URL ao final do processo de secagem, independente da temperatura.

A primeira correlação indicada é forte e inversamente proporcional (R -quadrado de $-0,989$), pois quanto maior a temperatura de secagem, mais fácil a remoção das parcelas de água que estão adsorvidas nas partículas sólidas e no interior das células, haja vista que elas demandam maiores níveis energéticos para a remoção (devido as ligações) em comparação a água livre.

Para a segunda correlação que é forte e diretamente proporcional (R -quadrado de $0,995$), quanto maior o teor de ST no lodo úmido, maior será a parcela de água adsorvida e intracelular que poderá ficar como URL ao final da secagem.

Em paralelo ao ensaio de URL, foram realizadas as análises de UE do lodo tratado a 80°C no secador experimental. As amostras de lodo foram acondicionadas das seguintes formas:

- Dentro de saco plástico fechado e abrigado no LES, sendo o saco aberto todos os dias, por um período curto de tempo, para a coleta de amostras;
- Sobre um saco plástico, ficando exposto ao sol e chuva de forma indireta sob a cobertura do galpão do LES.

Os resultados da UE, após o acondicionamento por 17 dias, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: resultados de UE de lodo seco armazenado em saco plástico e lodo exposto ao tempo.

| MATERIAL | AMOSTRA | LODO SECO | | |
|---------------|---------|---------------|-----------|-------------------|
| | | Resultado (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) |
| LODO ENSACADO | 1 | 2,55 | 2,53 | ±0,09 |
| | 2 | 2,57 | | |
| | 3 | 2,37 | | |
| | 4 | 2,61 | | |
| | 5 | 2,55 | | |
| LODO AO TEMPO | 1 | 7,77 | 7,52 | ±0,16 |
| | 2 | 7,51 | | |
| | 3 | 7,39 | | |
| | 4 | 7,39 | | |
| | 5 | 7,55 | | |

Fonte: produção do próprio autor.

O valor da UE do lodo deixado ao tempo foi condizente com os resultados mostrados por David (2002). Enquanto para o lodo ensacado, observa-se que um simples armazenamento em sacos plásticos tem a capacidade de conservar a umidade em valores inferiores a UE, favorecendo o uso futuro do material em relação ao transporte e poder calorífico.

De forma geral, os ensaios de URL e UE mostram que a secagem térmica em baixa temperatura permite produzir um lodo adequado para o uso em processos mais exigentes no aspecto da umidade. Por exemplo, na gaseificação, a biomassa empregada é limitada a teores de 10 a 20% de umidade (REYES et al, 2014) e na peletização de lodo, segundo os experimentos de Jiang et al. (2014), os melhores resultados são alcançados para os teores entre 10 e 15% de umidade.

Desta forma, torna-se atraente a secagem térmica do lodo com o objetivo de atingir, no máximo, o valor de 10% de umidade (90% de ST) para ampliar as possibilidades de uso futuro do material e ficar próximo a sua UE.

4.1.5 Relação tempo-temperatura de secagem

Para definir a melhor temperatura de secagem para o MTSL foram avaliados os tempos e taxas globais de secagem no TGA de amostras com $2,54g \pm 0,03$ de lodo centrifugado em diferentes temperaturas, estando os resultados detalhados na Tabela 34 do Apêndice E e as médias dos resultados na Figura 66.

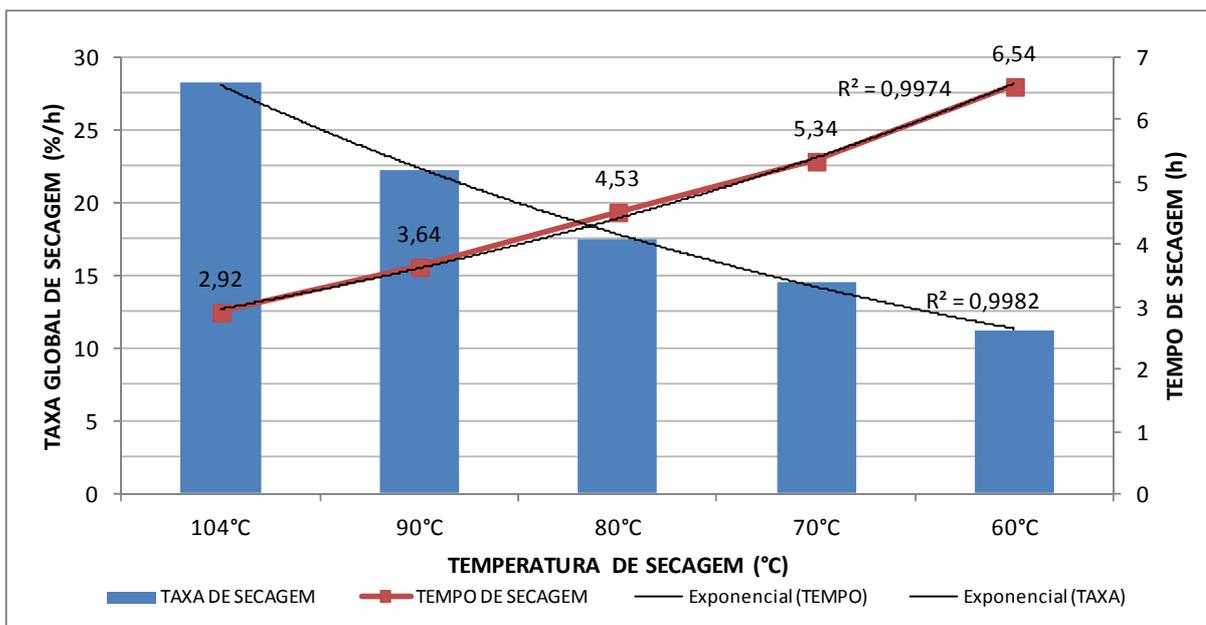


Figura 66: taxas de secagem globais do lodo centrifugado processado no TGA.
Fonte: produção do próprio autor.

Observa-se que os tempos e taxas de secagem apresentam forte correlação com a temperatura, conforme mostra o R-quadrado de, respectivamente, -0,989 e 0,996.

Apesar das fortes correlações encontradas, entre os pontos analisados, não foi observada nenhuma indicação de melhor temperatura para o processo de secagem com base no processamento do lodo centrifugado, pois quanto maior a temperatura, os benefícios sobre as taxas e tempo de secagem melhoram proporcionalmente. Os ensaios de Deng et al. (2015) também mostraram que, quanto mais elevado for a temperatura do ar, menor será o tempo para a secagem do lodo.

Em face ao exposto e considerando que o tratamento térmico de lodo também visa a higienização para o livre manuseio e uso do material tratado, considera-se que a menor e mais adequada temperatura para o processo de secagem estudado é de 80°C com base nas experiências de higienização realizadas pelos autores Barés (2010), Arce (2009) e Andreoli e Bonnet (2000).

Os ensaios de Andreoli e Bonnet (2000) resultaram em tempos de higienização na ordem de 5 minutos quando o lodo sanitário atingia a temperatura de 80°C, enquanto para temperaturas de 60 e 50°C os valores de tempo eram na ordem de 6 horas e 2 dias, respectivamente, contexto não interessante quando o objetivo é processar o lodo com alta taxa de secagem e mínima ocupação de área, pois o lodo demandaria, além do tempo de secagem, um tempo extra para a higienização.

4.1.6 Taxas de secagem

Neste subtópico foram abordados dois tipos de resultados, sendo o primeiro inerente as taxas de secagem obtidas no secador experimental e o segundo sobre uma breve comparação entre as taxas de secagem de dois diferentes métodos de secagem.

4.1.6.1 Taxas de secagem no secador experimental

A secagem ocorreu com o fluxo de ar na temperatura de $80,2 \pm 2,8^\circ\text{C}$, pressão estática na entrada do leito de $34 \pm 0,8\text{mm}$ de coluna d'água e velocidade de $0,31 \pm 0,01 \text{ m.s}^{-1}$, conforme os valores detalhados na Tabela 34 do Apêndice F.

Os resultados mostram umidades finais próximas aos 2% em intervalos de 1 a 6 horas, variando em função da umidade inicial do lodo, conforme é apresentado na Figura 67.

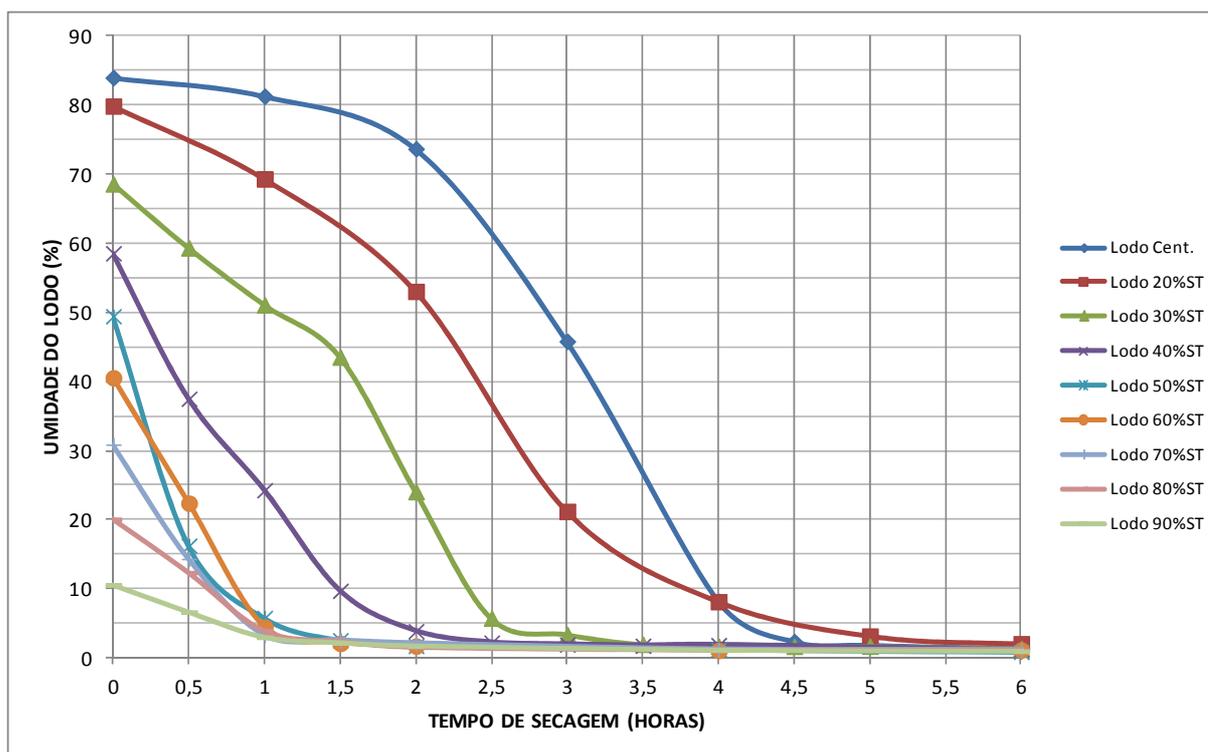


Figura 67: decaimento de umidade dos lodos tratados no secador experimental à 80°C .
Fonte: produção do próprio autor.

Para os lodos com os teores de umidade entre 10% e 50%, observa-se uma tendência de estabilização da umidade entorno dos 2% entre 1,5 e 2,0 horas de secagem (atingem umidades inferiores aos 10% em 1,0 hora), tendência não observada nos lodos mais hidratados.

Para a melhor compreensão do processo de secagem a Figura 68 apresenta as taxas que foram obtidas pela relação entre o percentual de perda de massa e o tempo de secagem.

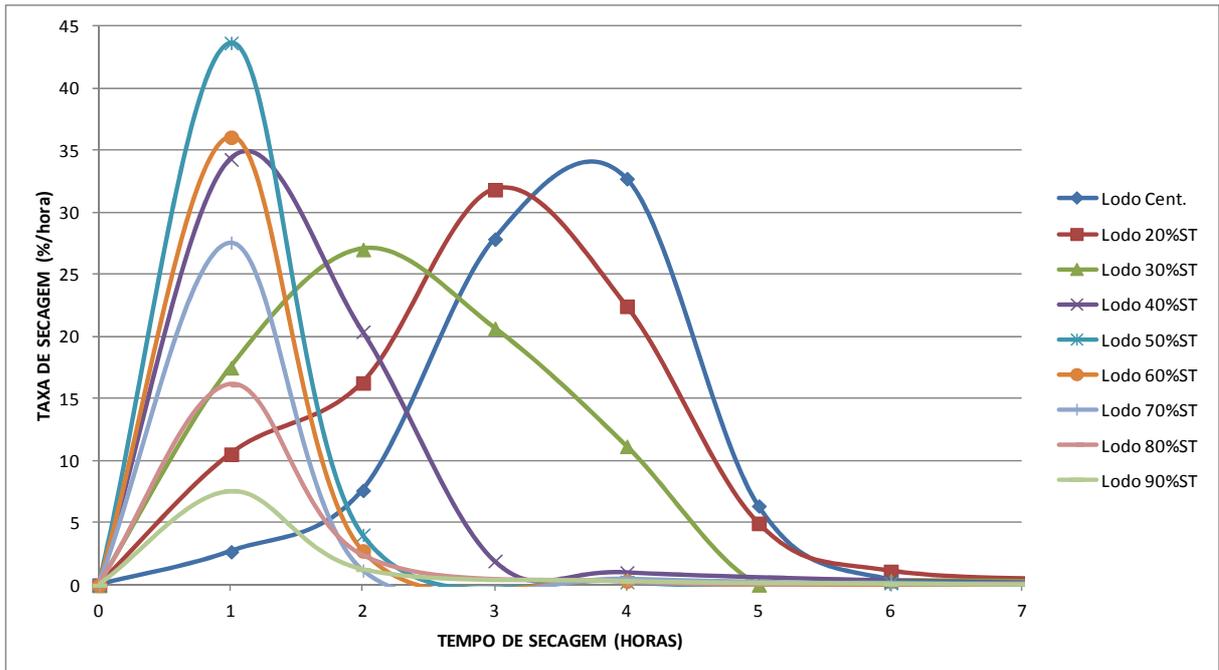


Figura 68: taxas de secagem obtidas a 80°C no secador experimental.
Fonte: produção do próprio autor.

Pelas taxas de secagem é possível visualizar que os melhores valores ocorreram na faixa de 40 a 60% de ST e na primeira hora de ensaio (taxas variando de 34,28 a 43,66%.h⁻¹), sendo o ápice encontrado no lodo com 50% de ST (43,66%.h⁻¹).

Tais resultados vão ao encontro dos ensaios experimentais de Léonard et al. (2008) que determinaram as taxas de secagem para a mistura de lodo seco e úmido, observando que quanto maior o teor de ST na mistura, maior a taxa de secagem. Entretanto, os referidos autores não avaliaram uma faixa de ST tão ampla como a realizada neste estudo.

Os lodos com menores teores de ST também apresentam boas taxas de secagem (lodo centrifugado e lodo com 20% de ST), mas essas taxas ocorrem entre a terceira e quarta hora de secagem, demonstrando que o ápice da secagem não ocorre nos teores de ST próximos aos valores iniciais, conforme pode ser observado nas Tabelas 36 a 40 do Apêndice VI, que mostram os resultados das análises de forma detalhada.

Considerando que todos os lodos apresentam os mesmos tipos de água (livre, adsorvida e intracelular), pois são constituídos pela mistura de lodo tratado com lodo centrifugado, as diferentes taxas de secagem são consequências das distintas morfologias encontradas nos materiais, principalmente em relação a granulometria e a distribuição de vazios que influenciam na área de contato entre o lodo e o ar.

Um melhor detalhamento dos lodos que apresentaram as maiores taxas de secagem é apresentado na Figura 69, mostrando as curvas de secagem e decaimento de umidade para intervalos de 30 minutos.

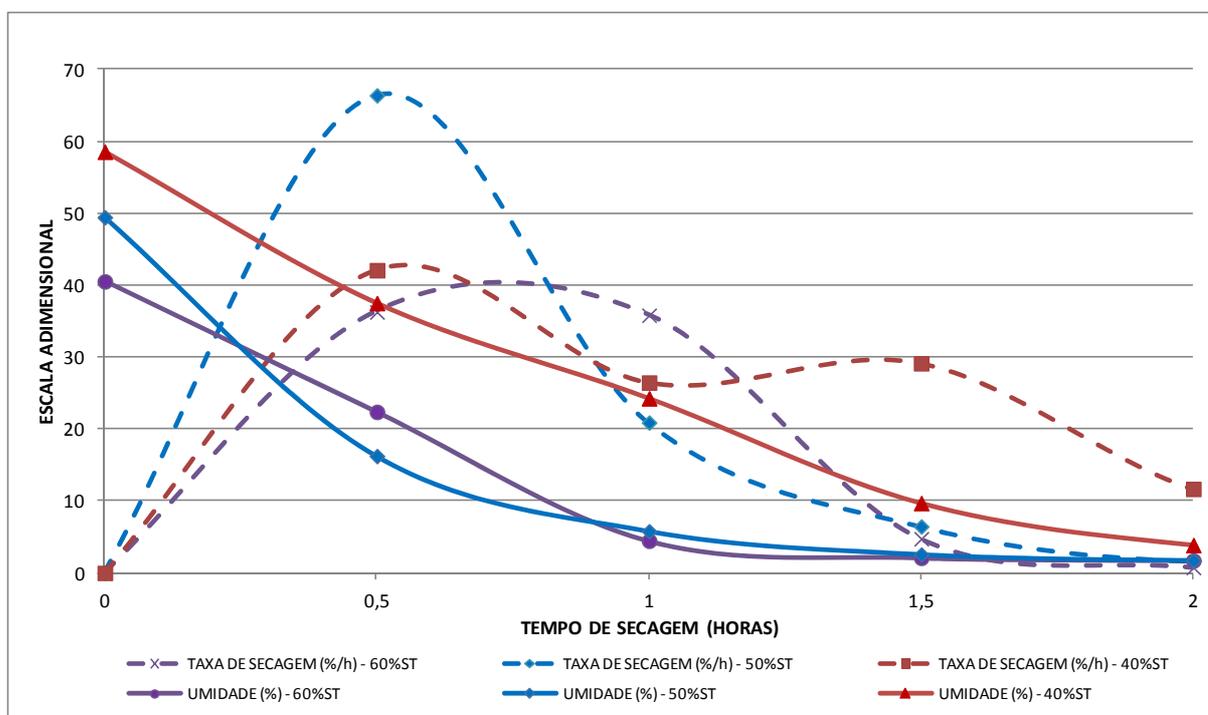


Figura 69: taxas de secagem e decaimento de umidade no secador experimental à 80°C.

Fonte: produção do próprio autor.

Diante do detalhamento apresentado, observa-se que as taxas de secagem são ainda maiores que as apresentadas com intervalos de 60 minutos para o lodo com 50% de ST. Tal diferença ocorre pelo fato que 68% da água contida no lodo foram removidas nos primeiros 30 minutos de secagem.

De posse dos resultados apresentados neste subtópico, fica nítido que o melhor teor de sólidos em relação a taxa de secagem ocorre para o lodo com 50% de ST.

4.1.6.2 Comparação entre métodos de secagem

Em paralelo a determinação das taxas de secagem no secador experimental que segue o método do leito granular, também foram determinadas as taxas de secagem no TGA que segue o método convectivo, permitindo a comparação entre estes dois distintos métodos pelas RTS que são apresentadas na Figura 70.

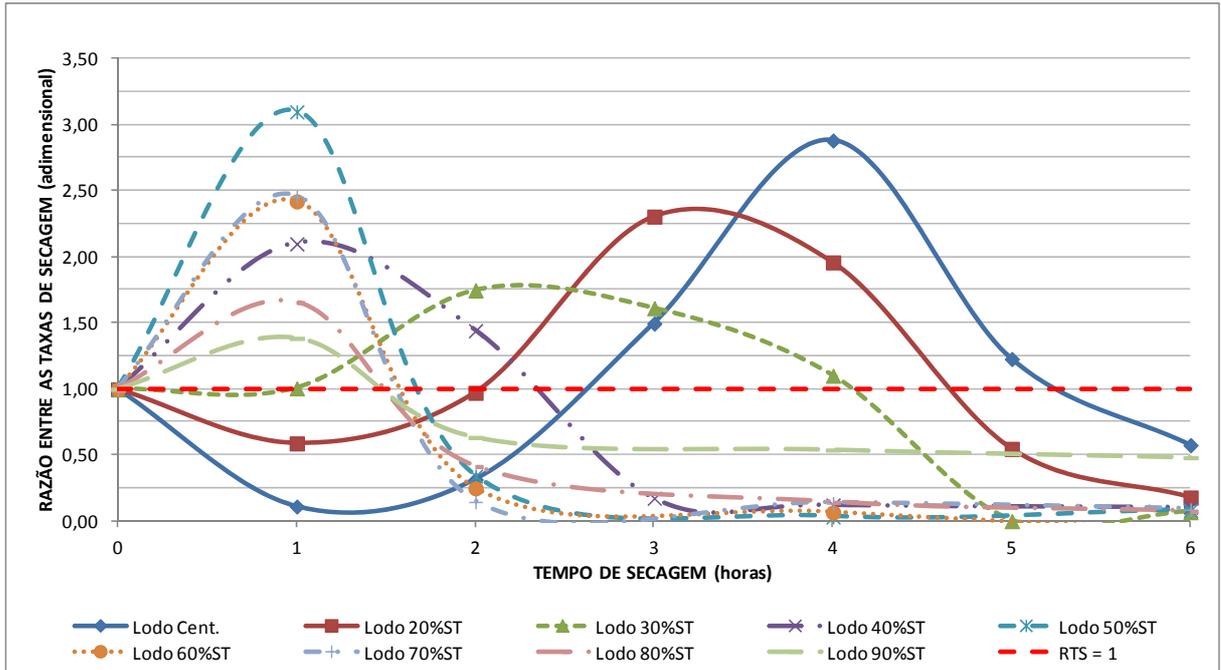


Figura 70: razão entre as taxas de secagem (RTS) obtidas a 80°C no secador experimental e TGA.
Fonte: produção do próprio autor.

De forma geral, o método de secagem do leito granular apresentou melhores resultados em comparação ao método de secagem convectivo, destacando-se o lodo com o teor de 50% de ST que apresenta a maior RTS (3,10 na primeira hora).

As únicas exceções ocorreram em relação ao lodo centrifugado e lodo com 20% de ST que apresentaram bons resultados para os dois métodos avaliados, mas em períodos de secagem distintos. Tais lodos, quando submetidos a secagem pelo método do leito granular, apresentam baixas taxas de secagem nas primeiras horas, pelo fato que o lodo está aglomerado, e aumentam a partir da terceira hora, pois é quando o lodo atinge o valor de 65% de ST e entra na fase de desaglomeração com perda de coesão devido à baixa umidade, conforme descrito por Li et al. (2013).

Para os lodos tratados no secador experimental com os teores próximos aos 50% de ST também é observado uma rápida redução das taxas de secagem devido a aproximação da UE que foram apresentadas no subtópico 4.1.4, comportamento não observado na secagem com o método convectivo, conforme mostra a Figura 71 ao detalhar as melhores taxas de secagem obtidas no secador experimental em comparação as taxas obtidas no TGA.

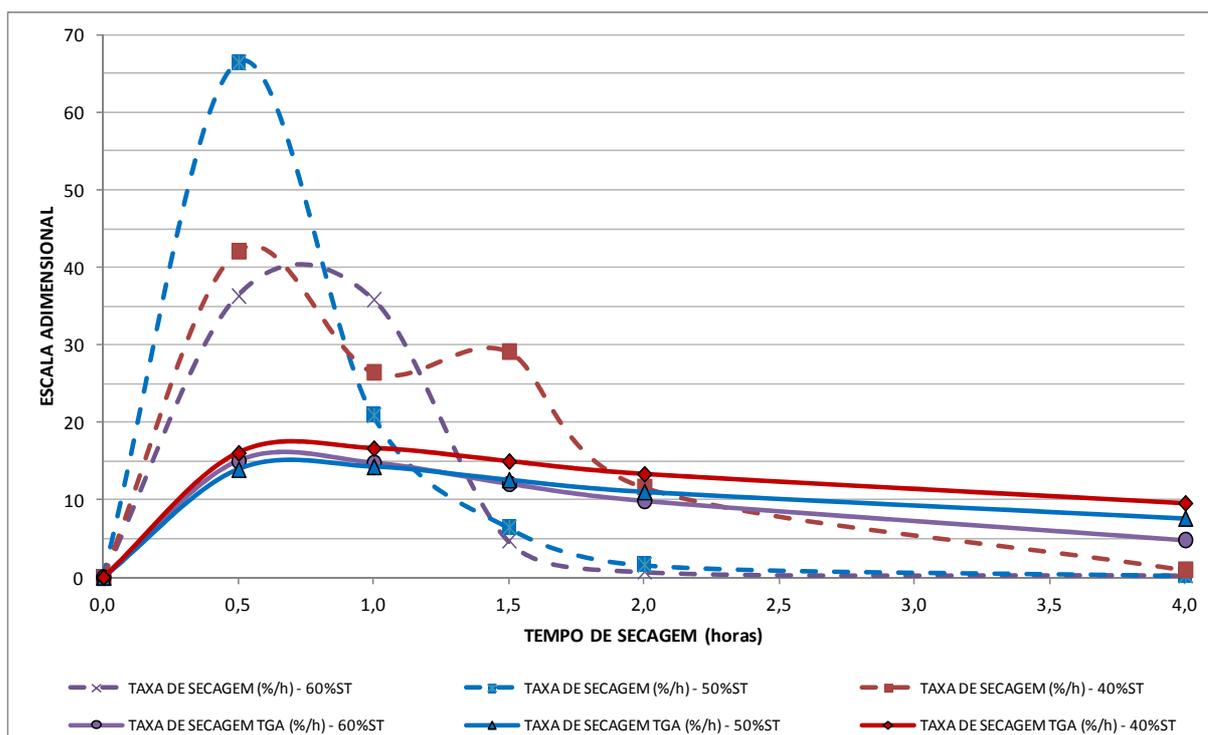


Figura 71: melhores taxas de secagem obtidas no secador experimental em comparação ao TGA.

Fonte: produção do próprio autor.

Diante disso, observa-se que a secagem no método do leito granular apresenta maior vantagem em comparação ao método convectivo nas condições ensaiadas, pois no primeiro método é possível finalizar a secagem em períodos inferiores há 1 hora para os lodos com 50 e 60% de ST e atingir os teores de 94,21 e 95,53% de ST na primeira hora, respectivamente. Enquanto no método convectivo demandaria períodos superiores a 3,0 e 4,0 horas contínuas de secagem para ultrapassar a barreira dos 90% de ST.

Para a definição do melhor teor de ST que o lodo úmido deve apresentar no início da secagem, apesar das estabilizações das taxas de secagem em períodos menores que duas horas para os lodos com 50 e 60% de ST no método do leito granular, entende-se que o primeiro permite vaporizar uma maior quantidade de água no mesmo período de tempo, tornando-se mais vantajoso o emprego desse teor de ST na entrada do reator de secagem.

4.1.7 Definição dos teores de ST e temperatura operacional

Resumidamente, o Quadro 1 apresenta as conclusões obtidas ao longo dos ensaios de caracterização do lodo em relação a definição do melhor teor de ST que o lodo úmido e tratado deve apresentar no processo, além da temperatura de secagem.

Quadro 1: conclusões isoladas a cada ensaio de caracterização do lodo.

| ENSAIO | ST NO LODO ÚMIDO | | OBSERVAÇÕES |
|---|------------------|-----------|--|
| | FAIXA | INDICAÇÃO | |
| Granulometria | 50-70% | 60% | O lodo tratado na faixa de 50-70% de ST apresenta os menores módulos de finura e percentuais de pedregulho, sendo um indicativo de boas taxas de secagem e interessantes características físicas para o uso do lodo. |
| Estereomicroscopia | 40-50% | 50% | O lodo úmido com 50% de ST apresentou os grãos sólidos totalmente recobertos por uma fina camada de lodo centrifugado, sendo um indicativo de boa taxa de secagem. |
| Relações massa-volume | 40-50% | 50% | O lodo úmido com 50% de ST apresenta o maior índice de vazios para a faixa intermediária de sólidos, sendo um indicativo de alta taxa de secagem se existir uma boa distribuição intergranular dos vazios. |
| Tensão de adesão superficial (TAS) | ≥50% | 50% | A partir do teor de 50% de ST o lodo úmido apresenta uma redução apreciável da TAS e, na avaliação visual, reduz as suas características plásticas. |
| Permeabilidade ao ar | 20-40% | 30% | O lodo úmido com o teor de 30% de ST apresentou a maior permeabilidade para as pressões estáticas trabalhadas. |
| Taxas de secagem | 40-60% | 50% | O lodo úmido com 50% de ST apresentou a maior taxa de secagem e tempo inferior a 1 hora para atingir 90% de ST. |
| Razão entre taxas de secagem (RTS) | 50-60% | 50% | A maior RTS foi de 3,10 para o lodo com 50% de ST, resultando no menor tempo de secagem (inferior a 1,0 hora) e maior taxa de vaporização de água. |
| ENSAIO | ST NO LODO SECO | | OBSERVAÇÕES |
| | FAIXA | INDICAÇÃO | |
| Umidade residual do lodo (URL) e de equilíbrio (UE) | >85% | 90% | Não foi identificado um melhor teor de ST para o lodo úmido neste ensaio, pois todos os lodos apresentam umidades residuais adequadas aos usos mais restritivos. Mas para o teor final de sólidos no lodo tratado, recomenda-se o valor de 90% para ficar adequado para os usos agrícolas e energéticos e ficar acima da UE. |
| ENSAIO | TEMP. DE SECAGEM | | OBSERVAÇÕES |
| | FAIXA | INDICAÇÃO | |
| Tempo x Temperatura | NI | 80°C | Não foi identificada uma melhor temperatura para a secagem do lodo com base nas análises realizadas. Entretanto, a literatura mostra que na temperatura de 80°C é possível higienizar o lodo na ordem de minutos. |

Notas: NI: não identificado.

Fonte: produção do próprio autor.

De forma geral, os resultados dos ensaios e da caracterização do lodo mostram que o método de secagem defendido neste trabalho é mais interessante que o método convectivo, pois permite alcançar maiores taxas de secagem e menores tempos de processamento no secador.

Para a mistura de lodo tratado e centrifugado o teor de 50% de ST na entrada do secador foi o mais indicado, pois associa a melhor taxa de secagem com uma pequena TAS e juntas representam duas importantes características para a secagem térmica. Entretanto, os valores de 40% e 60% de ST também são adequados para o processo de secagem térmica, mas não reúnem as melhores vantagens em comparação ao lodo com 50% de ST.

Assim sendo, foram definidos os seguintes dados de entrada para o MTSL:

- Lodo úmido na entrada do reator de secagem com 50% de ST;
- Lodo tratado na saída do reator de secagem com 90% de ST e;
- Temperatura de secagem do lodo úmido de 80°C.

4.2 RESULTADOS DA MODELAGEM

A definição das condições de referência e os resultados do MTSL são apresentados ao longo dos próximos subtópicos, conforme pontuado a seguir:

- Definição das condições de referência;
 - ✓ Caracterização da produção do lodo estudado;
 - ✓ Caracterização das condições climatológicas.
- Modelagem termodinâmica.

4.2.1 Caracterização e definição das condições de referência

4.2.1.1 Caracterização da produção do lodo centrifugado

O lodo estudado neste trabalho foi proveniente da ETE Mulembá I que opera com um sistema de Lodo Ativado e que apresenta a capacidade de tratamento descrita na Tabela 17.

Tabela 17: capacidades de projeto da ETE Mulembá I.

| REFERÊNCIA | VAZÃO MÉDIA DIÁRIA | | DBO ^I MÉDIA | CARGA ORGÂNICA MÉDIA |
|------------|--------------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| | L/s | m ³ /d | mg/l | kgDBO/dia |
| PROJETO | 204 | 17.626 | 296 | 5.217 |

NOTA I: demanda bioquímica de oxigênio.

Fonte: produção do próprio autor.

Em relação a produção do lodo, apresentada na Figura 72, o processo inicia com a sedimentação da biomassa nos reatores de tratamento do esgoto, seguido pelo seu bombeamento para o sistema de tratamento de sólidos que apresenta as etapas de biodigestão aeróbia, adensamento por gravidade e centrifugação, sendo que a última emprega uma emulsão polimérica de carga catiônica para aumentar a eficiência do desaguamento.

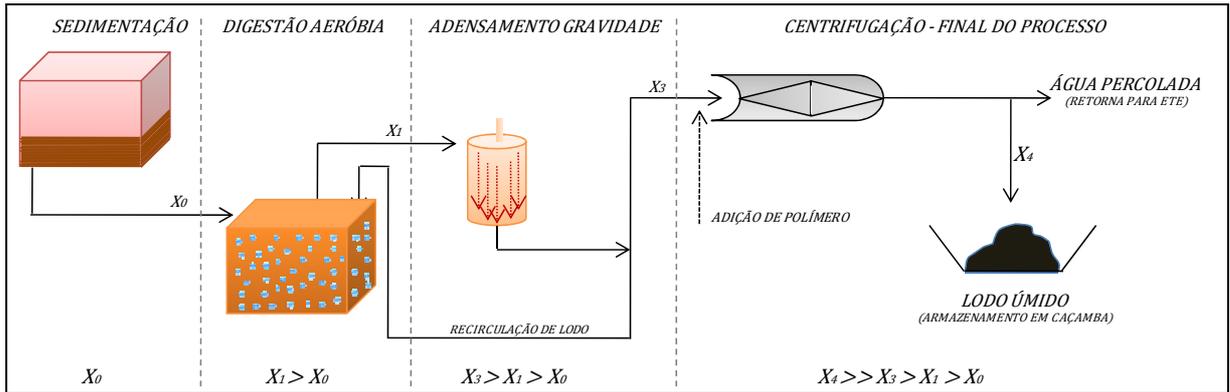


Figura 72: fluxograma das etapas de produção de lodo na ETE Mulembá I.

Fonte: produção do próprio autor.

Com base nos dados disponíveis no manual de operação da ETE Mulembá I, foram projetadas as produções de lodo na Tabela 18 para dois cenários de secagem.

Tabela 18: produção de lodo na ETE Mulembá I na condição de projeto.

| PRODUÇÃO DIÁRIA (kg/d) | TEOR ST (%) | PERÍODO DE SECAGEM (h/dia) | VAZÃO MÁSSICA (kg/s) | | |
|---------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|------------|--------|
| | | | Total | Massa Seca | Água |
| 14.768 | 25 | 9 (CENÁRIO 1) | 0,4558 | 0,1140 | 0,3419 |
| | | 24 (CENÁRIO 2) | 0,1709 | 0,0427 | 0,1282 |

Fonte: produção do próprio autor.

Portanto, o MTSL foi modelado com base na entrada de lodo com teor de 25% de ST e vazões mássicas instantâneas de $0,4558 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ para o cenário 1 (9 horas de secagem por dia) e $0,1709 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ para o cenário 2 (secagem contínua). Apesar da diferença entre as vazões instantâneas de cada cenário, a massa total de lodo tratado em cada cenário foi igual, ao longo de um dia de secagem, a produção diária da ETE Mulembá I ($14.768 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$).

4.2.1.2 Caracterização climatológica do local estudado

No município de Vitória o ar atmosférico apresenta a média diária de temperatura de $23,2 \pm 3,6^\circ\text{C}$ e UR de $82 \pm 12\%$ com base no monitoramento da estação meteorológica automática A612 que esta instalada em Vitória e pertencente ao INMET.

Os valores descritos são próximos ao estudo realizado por Correa (2011) e Marchioro (2012) que descrevem médias de $24,9^\circ\text{C}$ de temperatura e 78% de UR com base em um monitoramento de maior extensão, além de estar dentro da faixa de 22 a 24°C apresentada pela Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE, 2013).

Para o perfil de irradiação solar recebida no município de Vitória, a compilação e tabulação dos dados obtidos da estação A612, no período de 22/06/2017 a 21/06/2018, mostram o perfil de DNI apresentado na Figura 73.

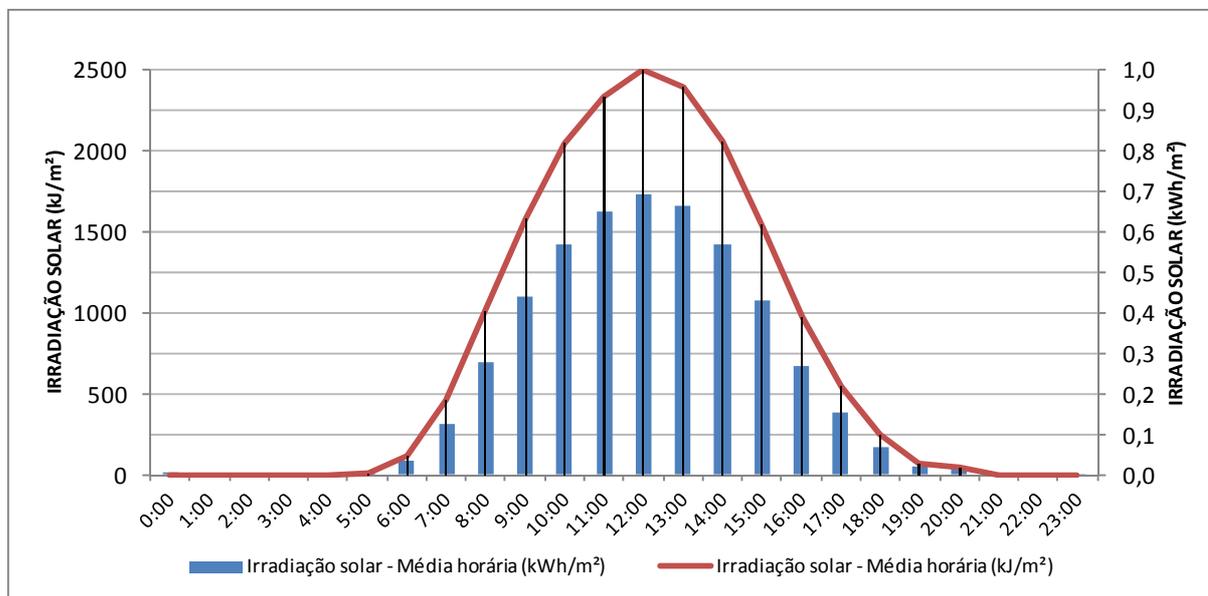


Figura 73: perfil da DNI obtido pelo monitoramento da estação meteorológica A612 do INMET.
Fonte: produção do próprio autor.

O perfil apresentado mostra uma DNI média de $4,96 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, valor próximo ao $4,74 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ do banco de dados do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (INPE, 2019) e dentro das faixas de $4,75$ a $5,00 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ do Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2017) e $4,61$ a $5,10 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ da ASPE (2013) para a Região Metropolitana da Grande Vitória.

Sendo o município de Vitória uma ilha litorânea, foi considerado que a ETE Mulembá I está ao nível do mar e foram utilizados os seguintes dados climáticos no MTSL:

- Temperatura média de $24,9^{\circ}\text{C}$;
- Umidade relativa do ar de 78% ;
- Radiação solar diária média de $4,96 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$;
- Pressão atmosférica local de $1,013 \text{ bar}$.

4.2.2 Resultados do MTSL

No cenário 1 o melhor período para a secagem foi de 08:00 às 16:00 horas e considerou o tratamento de $0,4558 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ de lodo a 25% de ST e vaporização de $0,3292 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ de água no

secador. Enquanto o cenário 2 considerou o processamento contínuo de $0,1709\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ de lodo a 25% de ST e vaporização de $0,1282\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ de água. Independente das vazões mássicas tratadas, ambos os cenários processaram a mesma quantidade de lodo seco e água por dia, mudando apenas as vazões instantâneas em função do número de horas de secagem de cada cenário.

Na Tabela 19 é apresentado o balanço térmico gerado no MTSL, com base nas condições descritas no subtópico 3.5.4, mostrando os pontos que foram alcançados para o início da viabilidade termodinâmica de ambos os cenários (quando o ITS e IES tendem a unidade).

Tabela 19: balanço térmico da produção, consumo e armazenamento de energia no MTSL.

| Local | Parâmetro | Cenário 1 | Cenário 2 | Unidade |
|-------------------|--|-----------|-----------|-----------------------|
| MTSL | ITS | 0,9997 | 0,9997 | adm ^I |
| | IES | 0,9998 | 0,9998 | adm ^I |
| SH ^{II} | Área espelhada do campo solar | 3.848 | 3.345 | m ² |
| | DNI total recebida nos CSP | 19.152 | 16.650 | kWh _t /dia |
| | Produção de energia no CSP | 9.576 | 8.325 | kWh _t /dia |
| RS ^{III} | Demanda total do secador (c/ perdas e partida secador) | 9.528 | 8.188 | kWh _t /dia |
| | Demanda de secagem (s/perdas e s/partida secador) | 6.791 | 6.810 | kWh _t /dia |
| | Perdas durante o período de secagem | 1.375 | 1.378 | kWh _t /dia |
| | Demanda na partida do secador (s/ perdas) | 1.135 | - | kWh _t /dia |
| | Perdas durante a partida do secador | 227 | - | kWh _t /dia |
| | Fluxo de energia de secagem (c/ perdas de secagem) | 907,3 | 341,2 | kW _t |
| TES | Massa de água no TES | 12.669 | 36.160 | kg |
| | Autonomia do TES | 1,8 | 13,3 | h/dia |
| | Capacidade de armazenamento (150-250°C) | 1.594 | 4.550 | kWh _t |
| | Perdas de energia no TES | 48 | 137 | kWh _t /dia |

Notas: I: adimensional; II: sistema heliotérmico; III: reator de secagem.

O cenário 1 apresenta uma demanda térmica para a partida do secador que não é observada no cenário 2 em virtude da sua operação contínua, sendo este o principal motivo para o cenário 2 apresentar um menor campo solar em comparação ao cenário 1 (13% menor, $\Delta A=503\text{m}^2$), com base no processamento da mesma quantidade de lodo ao dia ($14.768\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$), mas com vazões instantâneas diferentes.

A redução da área espelhada do campo solar 2 foi limitada pela perda térmica no TES, pois o sistema de armazenamento do cenário 1 foi dimensionado com 1,8 horas de autonomia, para realizar a partida do secador e estabilizar a sua operação durante as 9 horas de secagem. Enquanto o TES do cenário 2 foi projetado com 13,3 horas de autonomia, usando para estabilizar a operação durante o dia e ser a fonte térmica no período noturno, gerando, assim, perdas térmicas 185% maiores que no cenário 1 ($\Delta\text{Perdas}=89\text{kWh}_t\cdot\text{d}^{-1}$).

Com base em Gauché et al. (2017) e Baharoon et al. (2015), as autonomias encontradas para os TES estão dentro do esperado e o porte do sistema heliotérmico projetado já é comercial, em vários países, para a produção de energia elétrica.

Visando uma melhor compreensão do comportamento do sistema heliotérmico e do secador modelado, foram geradas nas Figuras 74 e 75 (em ordem, cenários 1 e 2) a demanda, produção e armazenamento de energia para um dia de operação.

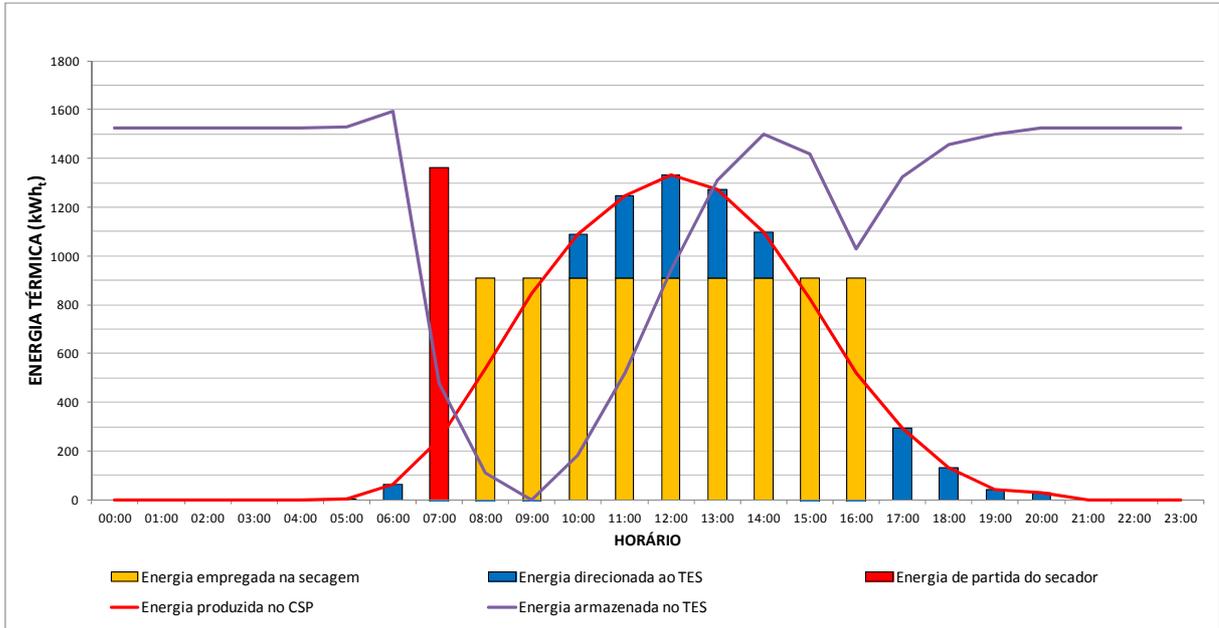


Figura 74: comportamento do sistema heliotérmico no cenário 1 (9 horas de secagem).
 Fonte: produção do próprio autor.

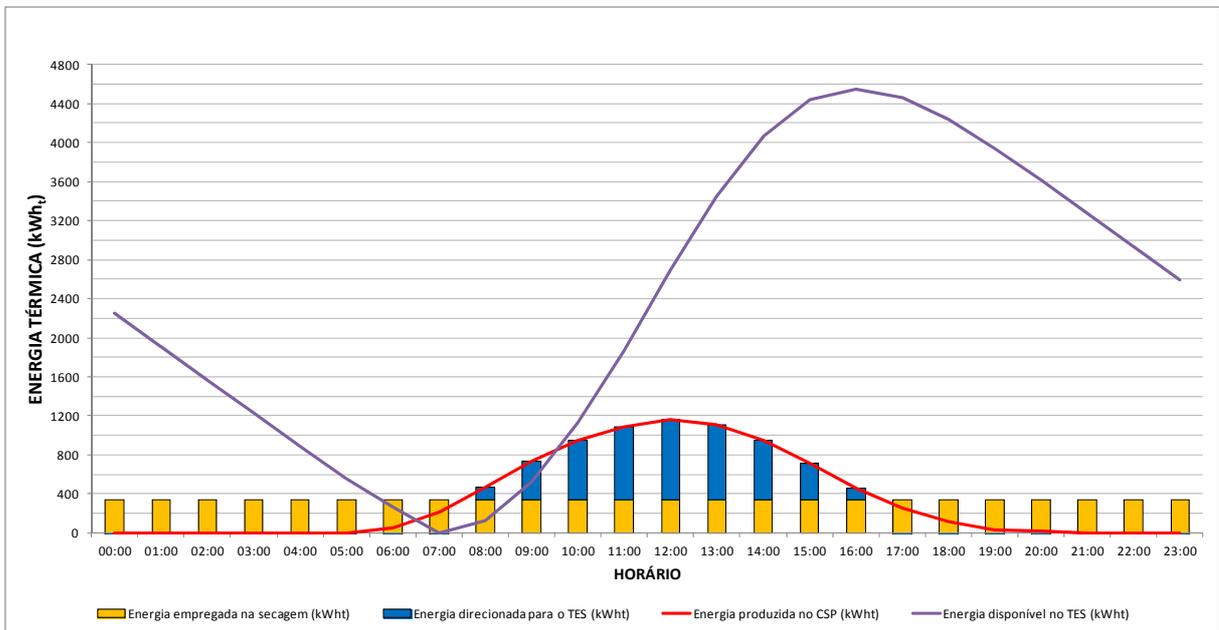


Figura 75: comportamento do sistema heliotérmico no cenário 2 (secagem contínua).
 Fonte: produção do próprio autor.

Apesar das perdas térmicas no TES, o referido sistema foi essencial para garantir a secagem em ambos os cenários e minimizar a área do campo solar, pois:

- No cenário 1 a partida do secador às 07:00 horas foi realizada, em sua maior parte, pela energia proveniente do TES, pois a partida demanda uma grande quantidade de energia e neste horário a DNI é baixa;
- No cenário 1 o fluxo de energia para a secagem foi complementado pelo TES no período de 08:00 às 09:00 e 15:00 às 16:00 horas, pois o campo solar não apresentava a capacidade de produzir a totalidade da energia térmica demandada pelo secador nos referidos horários;
- No cenário 2 a operação contínua do secador e a redução de 13% no campo solar foram garantidas pela autonomia de 13,3 horas do TES.

Diante dos dados apresentados, também é possível observar a redução de 62% da energia demandada a cada hora para o processo de secagem entre os cenários 2 e 1. Tal redução é interessante no aspecto construtivo, pois pode permitir a instalação de um sistema de secagem de menor porte para o cenário 2, conforme se observa nos indicadores do MTSL que foram apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: indicadores do MTSL.

| Indicador | Descrição | Cenário 1 | Cenário 2 | Unidade |
|-----------|--|-----------|-----------|-------------------------------------|
| DTH | Demanda térmica heliotérmica (c/ perdas globais) | 3,23 | 2,81 | GJ _t /t _v |
| DTS | Demanda térmica de secagem (c/ partida e perdas) | 3,22 | 2,76 | GJ _t /t _v |
| FTS | Fluxo térmico de secagem (c/ perdas) | 907,31 | 341,18 | kW _t |
| DVS | Demanda de ventilação p/ secagem | 5,54 | 2,08 | kW _e /t _v |
| DAS | Demanda de ar para secagem | 24,54 | 24,61 | t _{arseco} /t _v |
| PAS | Purga de ar de secagem | 6,32 | 6,34 | t _{arseco} /t _v |
| RRA | Razão de renovação de ar | 0,26 | 0,26 | Adm ¹ |
| AES | Área espelhada para secagem | 361 | 314 | m ² /t _v |
| RAS | Relação água-superfície | 0,350 | 0,403 | L/m ² .dia |

Nota I: adimensional.

Fonte: produção do próprio autor.

Observa-se que não existem benefícios sobre as relações que abrangem as demandas de ar seco (DAS, PAS, RRA) para diferentes períodos de secagem, haja vista que tais relações são mais influenciadas pela temperatura de operação do secador e quantidade de água a ser vaporização por dia do que pelas taxas de processamento de lodo. Todavia, consideráveis vantagens são observadas na redução das relações que englobam o fluxo e quantidade de energia térmica, potência elétrica dos ventiladores e área espelhada dos CSP (DTH, DTS, FTS, DVS, AES e RAS), indicando a construção de um sistema mais compacto no cenário 2 e com maiores vantagens nos aspectos operacionais que o cenário 1.

Os valores de energia que são indicados na DTH e DTS, para a vaporização de uma tonelada de água, são condizentes com as faixas descritas por Bennamoun et al. (2013) e Reyes et al. (2014) e aceitáveis quando comparados aos valores de $2,60$ e $2,74 \text{ GJ}_{t.v}^{-1}$ que foram descritos, respectivamente, por Van Haandel (2009) e Andreoli (2001), sem a consideração de perdas térmicas.

Destaca-se que as RAS indicam que a integração entre a secagem e energia heliotérmica poderia gerar uma planta autossuficiente em relação ao consumo de água, pois seria possível realizar o ciclo de limpeza adequado nos CSP apenas com a condensação natural nos regeneradores de calor (BAHAROON et al., 2015; SOLWATT, 2019) e ainda disponibilizar água para outros fins não potáveis, mitigando um dos principais impactos ambientais desta tecnologia e se tornando um sistema atrativo para regiões com escassos recursos hídricos.

4.2.2.1 Comportamento do lodo e ar de secagem no MTSL

Os regeneradores de calor (RC) geraram significativos ganhos de temperatura e entalpia para os fluxos de lodo e ar que foram modelados, conforme se observa na Figura 76 para o lodo e, posteriormente, Figura 77 e 78 para o ar.

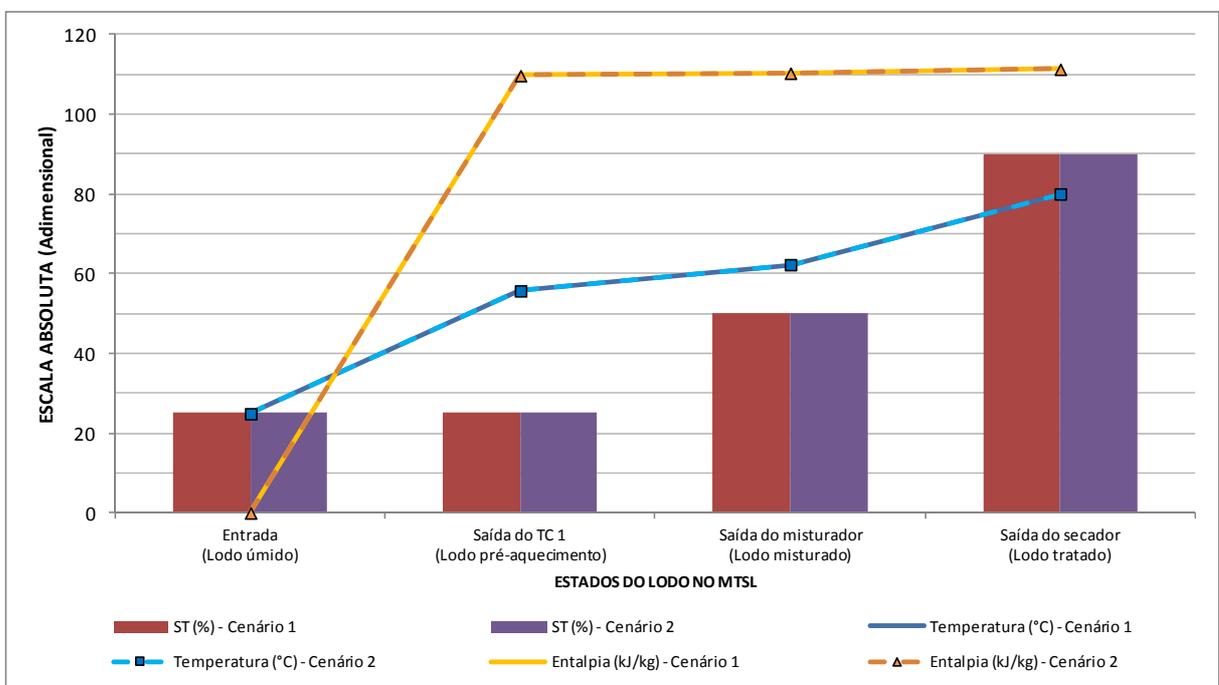


Figura 76: comportamento do lodo ao longo das etapas do MTSL.

Fonte: produção do próprio autor.

Para o comportamento do lodo, observa-se que o RC 1 foi responsável por um significativo ganho de temperatura e o salto entálpico que foi mantido até o final do processo de secagem. Enquanto a etapa de mistura de lodo gerou ligeiro aumento de temperatura, mas não modificou de forma considerável a entalpia específica do lodo devido a redução da proporção de água na mistura (componente com maior entalpia específica). De forma geral, o emprego do RC 1 e da mistura de lodos são justificados pelos benefícios descritos nas etapas que antecedem o secador.

Para o fluxo de ar de secagem, o seu comportamento é apresentado na Figura 77.

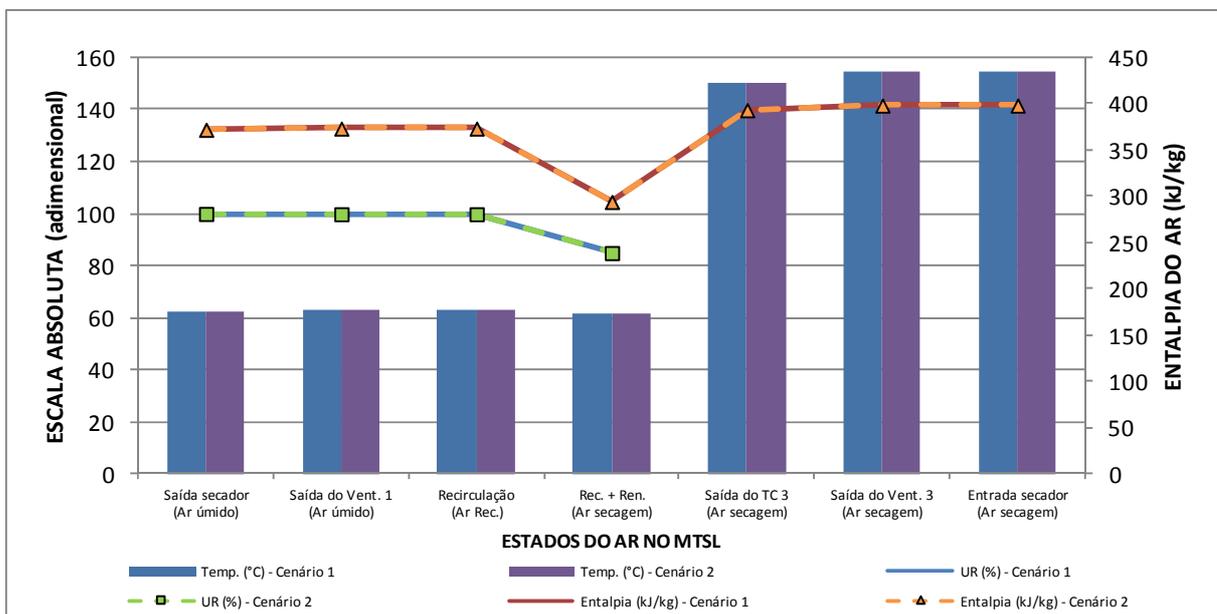


Figura 77: comportamento do ar de secagem ao longo das etapas do MTSL..

Fonte: produção do próprio autor.

O fluxo de ar de secagem foi modelado como um sistema fechado e os três principais objetivos esperados para essa técnica foram alcançados:

- Atingir a condição de saturado na saída do secador, resultando na máxima transferência de vapor com a mínima vazão de ar seco;
- Garantir a conservação da temperatura e entalpia específica do fluxo de ar de secagem entre a purga e a mistura com o ar de renovação;
- Reduzir o salto entálpico no TC em comparação a possibilidade de aquecer um novo fluxo de ar nas condições de referência.

Apesar da conservação dos valores de entalpia no fluxo de ar, ocorre uma pequena queda no momento da mistura dos fluxos de ar de recirculado e ar de renovação pelo fato do segundo apresentar uma baixa entalpia específica (30kJ.kg^{-1}) frente ao primeiro (373kJ.kg^{-1}). Tal

diferença é justificada pela ampla variação da umidade em cada fluxo (14,58% e 99,89%, respectivamente).

A UR na Figura 77, entre a saída do TC e a entrada do secador, não é apresentada pelo fato que as temperaturas do fluxo de ar de secagem são superiores a temperatura de saturação do vapor d'água na pressão de trabalho do fluxo, portanto, não é possível determinar a UR para os pontos descritos, segundo Kuehn et al. (1998).

Na Figura 77 também é observada uma ligeira queda da UR com a entrada do fluxo de ar de renovação, sendo que essa queda é equivalente a vazão d'água vaporizada durante a secagem. Tal afirmativa pode ser melhor visualizada na Figura 78 que desmembra o fluxo de ar de secagem nas parcelas de ar seco e vapor d'água.

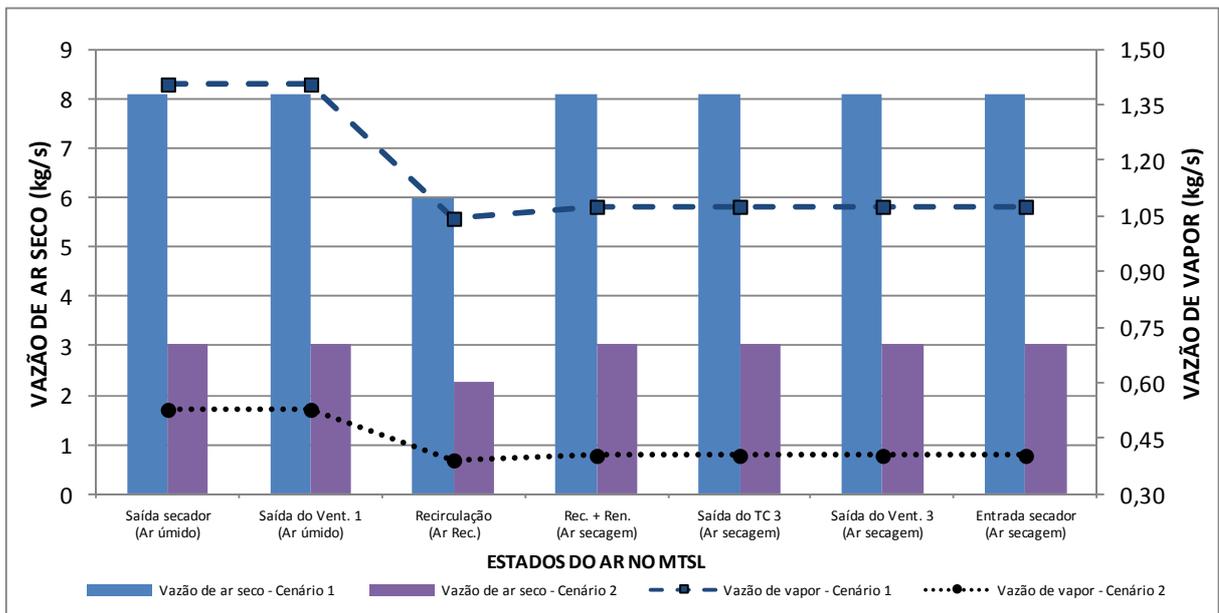


Figura 78: comportamento dos fluxos que compoem o ar de secagem nas etapas do MTSL.

Fonte: produção do próprio autor.

Uma parte do fluxo de ar de secagem que sai do secador é removido do sistema após a passagem pelo ventilador 1 e, em seguida, ar de renovação (preaquecido pelo RG 2) é admitido junto ao fluxo de ar recirculado para restabelecer a vazão de ar seco inicial do sistema, conforme pode ser observado nas variações de vazões entre a saída do ventilador 1 e a mistura de ar de recirculação e renovação.

A saída de parte do ar de secagem pela purga, com a posterior admissão do ar de renovação para a sua compensação, representa a etapa de regeneração do ar no MTSL. Por este motivo, a diferença da vazão de vapor, entre o ventilador 1 e a entrada do ar de renovação, é equivalente a vazão de água vaporizada no secador.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Conclui-se que, a integração do sistema heliotérmico com a secagem térmica de lodo é viável termodinamicamente e os indicadores mostraram que o porte dos sistemas heliotérmicos projetados, área espelhada de 3.848m² e TES com 1.594kWh_t para o cenário 1 e 3.345m² e TES com 4.550kWh_t para o cenário 2, já são oferecidos e utilizados comercialmente no mundo.

A integração dos sistemas ainda apresenta o benefício de produzir, apenas com a condensação natural nos regeneradores de calor, 1.346L.dia⁻¹ de água líquida no cenário 1 e 1.348L.d⁻¹ no cenário 2, permitindo a limpeza dos CSP com periodicidade menor do que 2 dias ou o uso do condensado para outros fins não potáveis, mitigando um dos principais impactos ambientais desta tecnologia e se tornando um atrativo para regiões com escassez hídrica. Somado a isso, ainda é possível aumentar a vazão de condensado até valores próximos a vazão de água vaporizada no secador (11.109L.d⁻¹) com a adição de uma etapa de refrigeração e desumidificação do ar de purga na saída do modelo.

Os indicadores do MTSL apontam que o cenário 2 (secagem contínua) é mais interessante no aspecto construtivo e operacional que o cenário 1 (secagem por 9 horas ao dia), pois o porte do sistema no cenário 2 seria menor quando se avalia a variação dos indicadores FTS (62%), DTS (14%), DTH (13%), DVS (62%), AES (13%) e RAS (-15%) entre cada cenário, além do campo solar ser 13% menor no cenário 2.

Compreende-se que o acoplamento da energia heliotérmica para a secagem de lodo é apenas a primeira etapa do desenvolvimento de uma tecnologia autossustentável energeticamente, pois o caminho natural para a secagem de lodo, em baixa temperatura, é o desenvolvimento de um processo híbrido, utilizando a energia heliotérmica como a fonte térmica principal e a sua hibridização com uma segunda fonte renovável (por exemplo, biogás, singás ou a própria combustão do lodo tratado termicamente) ou uma fonte que aproveite a energia térmica residual de outros processos produtivos, possibilitando, entre os potenciais benefícios, a construção de um sistema de menor porte pela redução do campo solar e do TES.

Para a mistura de lodo tratado com lodo centrifugado, foi demonstrado que ela apresenta a capacidade de modificar as características morfológicas e reológicas do lodo, sendo uma importante técnica para controlar as propriedades decorrentes dessas características. Ainda sobre a mistura de lodo que foi realizada neste trabalho, conclui-se que ela permitiu os seguintes ganhos em relação ao lodo centrifugado:

- Aumentar as taxas de secagem pelos métodos do leito granular e convectivo, principalmente para os lodos na faixa de 40 a 60% de ST;
- Reduzir o tempo de secagem de 3-4 horas no método convectivo para menos de 1 hora no método do leito granular para os lodos com 50 e 60% de ST;
- Aumentar a permeabilidade do lodo úmido ao ar na faixa de 20 a 50% de ST, mas não se correlacionando com a melhor taxa de secagem;
- Reduzir a coesão e adesão do lodo para os teores iguais ou maiores que 40% de ST, indicando melhores condições de operação ao processo de secagem;
- Reduzir a granulometria final do lodo tratado termicamente, tornando-o menos grosseiro em comparação a secagem de lodo centrifugado isoladamente.

De forma geral, também pode ser concluído que o método do leito granular apresenta nítidas vantagens em comparação ao método convectivo, principalmente em relação as maiores taxas de secagem (3,1 vezes maior na primeira hora para o lodo com 50% de ST), menor tempo de secagem (período menor do que 1,0 hora para o lodo com 50% de ST) e produção de lodo tratado com uma classificação granulométrica menos grosseira.

Em relação a escolha da secagem em baixas temperaturas, observou-se que essa condição não foi fator impeditivo para que o processo alcançasse teores elevados de ST ao final da secagem, indicando que é possível produzir um bio sólido seco, granular, possivelmente higienizado e adequado para o uso em diversos processos produtivos.

Para a definição da melhor temperatura de secagem, não foi observado nenhum benefício sobre as taxas e tempos de secagem entre as temperaturas de 60 a 90°C, sendo que as taxas crescem proporcionalmente com o incremento da temperatura, e a definição da melhor temperatura de operação deverá seguir outros fatores.

Para os regeneradores de calor que foram empregados nos MTSL, conclui-se que eles geraram grandes aportes na temperatura e entalpia nas etapas de preaquecimento do lodo úmido e ar de renovação, garantindo a conservação do fluxo de energia presente no ar de secagem ao longo do modelo.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Por fim, recomenda-se que sejam aprofundadas as investigações em relação aos seguintes pontos desta pesquisa:

- Determinar os diâmetros e distribuição de vazios para os lodos com diferentes teores de ST, permitindo uma melhor compreensão da influencia dos vazios e da permeabilidade ao ar sobre as taxas de secagem térmica para o método do leito granular;
- Investigar a influencia da granulometria do lodo tratado para a mistura com o lodo centrifugado em busca de maiores taxas de secagem e menores TAS, favorecendo a construção de secadores mais compactos pela alimentação de lodos com maiores percentuais de umidade;
- Realizar testes de sensibilidade no MTSL e, diante dos resultados, iniciar uma avaliação econômica para verificar a viabilidade do sistema proposto;
- Avaliar a cinética da higienização obtida na secagem pelo método do leito granular, em baixa temperatura, para diferentes teores de sólidos totais;
- Validar o MTSL com o uso de CSP acoplado a um secador experimental de lodo;
- Modelar um secador híbrido que utilize, além da energia heliotérmica como fonte energética principal, uma fonte complementar para o fornecimento seguro de energia durante o período noturno e nos horários de baixa DNI, visando do TES e do campo solar do sistema heliotérmico;
- Avaliar a integração do método de secagem de lodo, defendido neste trabalho, com a gaseificação do lodo tratado termicamente e a posterior geração de energia elétrica a partir do singás produzido, buscando o desenvolvimento de uma concepção de sistema que caminhe para uma estação de tratamento de esgoto autossustentável energeticamente.

APÊNDICE A – resultados dos ensaios de ST no lodo misturado

Tabela 21: teores médios e desvio padrão das misturas de lodos neste trabalho

| AMOSTRA | Teor de ST (%) | | | |
|---------|----------------|-------|-------|--------|
| | Desejado | Real | Média | Desvio |
| 1 | 90 | 90,04 | 89,45 | 0,80 |
| 2 | | 90,36 | | |
| 3 | | 88,4 | | |
| 4 | | 88,88 | | |
| 5 | | 89,08 | | |
| 6 | | 90,21 | | |
| 7 | | 89,39 | | |
| 8 | | 88,4 | | |
| 9 | | 90,25 | | |
| 1 | 80 | 80,36 | 79,93 | 0,71 |
| 2 | | 79,78 | | |
| 3 | | 81,13 | | |
| 4 | | 80,76 | | |
| 5 | | 79,43 | | |
| 6 | | 79,46 | | |
| 7 | | 79,09 | | |
| 8 | | 80,61 | | |
| 9 | | 80,61 | | |
| 10 | | 79,09 | | |
| 11 | | 79,46 | | |
| 12 | | 79,43 | | |
| 1 | 60 | 68,99 | 69,14 | 0,57 |
| 2 | | 69,79 | | |
| 3 | | 69,15 | | |
| 4 | | 68,75 | | |
| 5 | | 68,54 | | |
| 6 | | 69,88 | | |
| 7 | | 69,88 | | |
| 8 | | 68,54 | | |
| 9 | | 68,75 | | |
| 1 | 50 | 58,93 | 59,46 | 1,58 |
| 2 | | 61,32 | | |
| 3 | | 60,97 | | |
| 4 | | 61,33 | | |
| 5 | | 57,79 | | |
| 6 | | 60,71 | | |
| 7 | | 57,31 | | |
| 8 | | 59,7 | | |
| 9 | | 59,7 | | |
| 10 | | 57,31 | | |
| 11 | | 60,71 | | |
| 12 | | 57,79 | | |
| 1 | 50 | 51,41 | 50,55 | 0,63 |
| 2 | | 50,85 | | |
| 3 | | 50,73 | | |
| 4 | | 49,52 | | |
| 5 | | 50,69 | | |
| 6 | | 50,69 | | |
| 7 | | 49,52 | | |
| 8 | | 50,73 | | |
| 9 | | 50,85 | | |

Continuidade da Tabela 21.

| | | | | |
|----|------------|-------|-------|------|
| 1 | | 41,14 | | |
| 2 | | 42,17 | | |
| 3 | | 42,65 | | |
| 4 | 40 | 41,36 | 41,44 | 1,37 |
| 5 | | 42,41 | | |
| 6 | | 38,92 | | |
| 1 | | 29,52 | | |
| 2 | 30 | 32,43 | 31,41 | 1,64 |
| 3 | | 32,29 | | |
| 1 | | 19,91 | | |
| 2 | 20 | 20,38 | 20,15 | 0,33 |
| 1 | | 15,41 | | |
| 2 | | 15,63 | | |
| 3 | | 16,16 | | |
| 4 | | 16,15 | | |
| 5 | | 16,34 | | |
| 6 | LODO CENT. | 16,14 | 16,02 | 0,38 |
| 7 | | 16,23 | | |
| 8 | | 16,68 | | |
| 9 | | 15,66 | | |
| 10 | | 15,81 | | |

Fonte: produção do próprio autor.

APÊNDICE B – resultados dos ensaios de distribuição granulométrica

Tabela 22: distribuição granulométrica dos lodos destorroado e não destorroado.

| Peneira (mm) | LODO DESTORROADO | | | LODO NÃO DESTORROADO | | |
|--------------|------------------|---------------|-----------|----------------------|---------------|-----------|
| | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) |
| 25,0 | 0,05 | 0,00 | 100,00 | 9,23 | 0,92 | 99,08 |
| 19,0 | 0,14 | 0,01 | 99,98 | 15,19 | 1,52 | 97,56 |
| 12,5 | 4,22 | 0,42 | 99,56 | 52,53 | 5,25 | 92,31 |
| 9,5 | 11,23 | 1,12 | 98,44 | 77,19 | 7,72 | 84,59 |
| 6,3 | 92,21 | 9,21 | 89,23 | 202,11 | 20,20 | 64,39 |
| 4,8 | 114,55 | 11,44 | 77,79 | 149,07 | 14,90 | 49,48 |
| 2,4 | 348,08 | 34,76 | 43,02 | 292,47 | 29,24 | 20,24 |
| 2,0 | 70,35 | 7,03 | 36,00 | 43,90 | 4,39 | 15,86 |
| 1,2 | 148,45 | 14,83 | 21,17 | 78,60 | 7,86 | 8,00 |
| 0,6 | 104,70 | 10,46 | 10,72 | 41,80 | 4,18 | 3,82 |
| 0,4 | 38,15 | 3,81 | 6,91 | 14,50 | 1,45 | 2,37 |
| 0,3 | 22,39 | 2,24 | 4,67 | 8,44 | 0,84 | 1,53 |
| 0,2 | 27,56 | 2,75 | 1,92 | 10,51 | 1,05 | 0,48 |
| 0,1 | 14,64 | 1,46 | 0,46 | 3,32 | 0,33 | 0,14 |
| 0,0 | 4,56 | 0,46 | 0,00 | 1,44 | 0,14 | 0,00 |
| SOMA | 1001,28 | 100,00 | - | 1000,3 | 100,00 | - |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 23: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 90 e 80% de ST.

| Peneira (mm) | LODO COM 90%ST | | | LODO COM 80%ST | | |
|--------------|----------------|---------------|-----------|----------------|---------------|-----------|
| | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) |
| 25,0 | 0,04 | 0,00 | 100,00 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 19,0 | 0,04 | 0,00 | 99,99 | 0,04 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 2,69 | 0,27 | 99,72 | 9,01 | 0,90 | 99,10 |
| 9,5 | 30,38 | 3,03 | 96,69 | 32,25 | 3,22 | 95,87 |
| 6,3 | 167,78 | 16,76 | 79,93 | 166,06 | 16,59 | 79,28 |
| 4,8 | 186,67 | 18,65 | 61,28 | 158,14 | 15,80 | 63,48 |
| 2,4 | 387,8 | 38,74 | 22,55 | 344,22 | 34,39 | 29,09 |
| 2,0 | 54,76 | 5,47 | 17,08 | 55,73 | 5,57 | 23,52 |
| 1,2 | 94,76 | 9,47 | 7,62 | 118,92 | 11,88 | 11,64 |
| 0,6 | 47,83 | 4,78 | 2,84 | 76,96 | 7,69 | 3,95 |
| 0,4 | 14,15 | 1,41 | 1,42 | 19,53 | 1,95 | 2,00 |
| 0,3 | 5,75 | 0,57 | 0,85 | 7,49 | 0,75 | 1,25 |
| 0,2 | 5,49 | 0,55 | 0,30 | 7,33 | 0,73 | 0,52 |
| 0,1 | 2,18 | 0,22 | 0,08 | 3,45 | 0,34 | 0,17 |
| 0,0 | 0,84 | 0,08 | 0,00 | 1,72 | 0,17 | 0,00 |
| SOMA | 1001,16 | 100,00 | - | 1000,85 | 100,00 | - |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 24: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 70 e 60% de ST.

| Peneira (mm) | LODO COM 70%ST | | | LODO COM 60%ST | | |
|--------------|----------------|---------------|-----------|----------------|---------------|-----------|
| | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) |
| 25,0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 19,0 | 0,05 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 1,53 | 0,15 | 99,84 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 9,5 | 17,89 | 1,79 | 98,06 | 7,94 | 0,79 | 99,21 |
| 6,3 | 134,78 | 13,46 | 84,60 | 70,53 | 7,05 | 92,15 |
| 4,8 | 161,66 | 16,14 | 68,45 | 99,70 | 9,97 | 82,19 |
| 2,4 | 408,50 | 40,80 | 27,66 | 401,02 | 40,09 | 42,10 |
| 2,0 | 68,42 | 6,83 | 20,82 | 87,24 | 8,72 | 33,37 |
| 1,2 | 116,80 | 11,66 | 9,16 | 185,82 | 18,58 | 14,80 |
| 0,6 | 53,25 | 5,32 | 3,84 | 100,71 | 10,07 | 4,73 |
| 0,4 | 16,16 | 1,61 | 2,23 | 25,91 | 2,59 | 2,14 |
| 0,3 | 7,13 | 0,71 | 1,51 | 10,32 | 1,03 | 1,11 |
| 0,2 | 9,05 | 0,90 | 0,61 | 7,47 | 0,75 | 0,36 |
| 0,1 | 4,67 | 0,47 | 0,14 | 2,50 | 0,25 | 0,11 |
| 0,0 | 1,45 | 0,14 | 0,00 | 1,09 | 0,11 | 0,00 |
| SOMA | 1001,34 | 100,00 | - | 1000,25 | 100,00 | - |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 25: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 50 e 40% de ST.

| Peneira (mm) | LODO COM 50%ST | | | LODO COM 40%ST | | |
|--------------|----------------|---------------|-----------|----------------|---------------|-----------|
| | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) |
| 25,0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 19,0 | 0,06 | 0,01 | 99,99 | 0,04 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,03 | 0,00 | 99,99 | 0,03 | 0,00 | 99,99 |
| 9,5 | 8,55 | 0,85 | 99,14 | 10,20 | 1,02 | 98,97 |
| 6,3 | 92,44 | 9,24 | 89,90 | 170,70 | 17,06 | 81,91 |
| 4,8 | 132,88 | 13,28 | 76,62 | 237,27 | 23,71 | 58,20 |
| 2,4 | 483,36 | 48,30 | 28,32 | 478,10 | 47,78 | 10,42 |
| 2,0 | 97,66 | 9,76 | 18,56 | 39,40 | 3,94 | 6,49 |
| 1,2 | 145,85 | 14,57 | 3,99 | 43,97 | 4,39 | 2,09 |
| 0,600 | 31,13 | 3,11 | 0,88 | 13,13 | 1,31 | 0,78 |
| 0,425 | 3,86 | 0,39 | 0,49 | 2,95 | 0,29 | 0,49 |
| 0,300 | 1,49 | 0,15 | 0,34 | 1,51 | 0,15 | 0,33 |
| 0,150 | 1,84 | 0,18 | 0,16 | 1,87 | 0,19 | 0,15 |
| 0,075 | 1,00 | 0,10 | 0,06 | 0,92 | 0,09 | 0,06 |
| 0,000 | 0,59 | 0,06 | 0,00 | 0,56 | 0,06 | 0,00 |
| SOMA | 1000,74 | 100,00 | - | 1000,65 | 100,00 | - |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 26: distribuição granulométrica dos lodos tratados com 30 e 20% de ST.

| Peneira (mm) | LODO COM 30%ST | | | LODO COM 20%ST | | |
|--------------|----------------|---------------|-----------|----------------|---------------|-----------|
| | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) |
| 25,0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 19,0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,63 | 0,06 | 99,94 | 3,08 | 0,31 | 99,69 |
| 9,5 | 10,07 | 1,01 | 98,93 | 60,03 | 6,00 | 93,69 |
| 6,3 | 189,26 | 18,90 | 80,04 | 361,05 | 36,11 | 57,58 |
| 4,8 | 260,82 | 26,04 | 54,00 | 278,58 | 27,86 | 29,72 |
| 2,4 | 461,90 | 46,11 | 7,88 | 270,46 | 27,05 | 2,68 |
| 2,0 | 31,40 | 3,13 | 4,75 | 11,14 | 1,11 | 1,56 |
| 1,2 | 33,01 | 3,30 | 1,45 | 10,08 | 1,01 | 0,55 |
| 0,6 | 8,72 | 0,87 | 0,58 | 3,02 | 0,30 | 0,25 |
| 0,4 | 2,16 | 0,22 | 0,37 | 0,75 | 0,08 | 0,18 |
| 0,3 | 1,05 | 0,10 | 0,26 | 0,43 | 0,04 | 0,13 |
| 0,2 | 1,44 | 0,14 | 0,12 | 0,61 | 0,06 | 0,07 |
| 0,1 | 0,75 | 0,07 | 0,04 | 0,45 | 0,05 | 0,03 |
| 0,0 | 0,42 | 0,04 | 0,00 | 0,28 | 0,03 | 0,00 |
| SOMA | 1001,63 | 100,00 | - | 999,96 | 100,00 | - |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 27: distribuição granulométrica do lodo centrifugado tratado.

| Peneira (mm) | LODO CENT. (SECADOR) | | | LODO CENT. (ESTUFA) | | |
|--------------|----------------------|---------------|-----------|---------------------|---------------|-----------|
| | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) | Massa (g) | Retido (%) | Passa (%) |
| 25,0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 178,02 | 22,59 | 76,85 |
| 19,0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 309,33 | 39,25 | 37,60 |
| 12,5 | 2,10 | 0,26 | 99,74 | 168,30 | 21,36 | 16,24 |
| 9,5 | 17,18 | 2,13 | 97,61 | 48,26 | 6,12 | 10,12 |
| 6,3 | 246,78 | 30,53 | 67,08 | 51,14 | 6,49 | 3,63 |
| 4,8 | 251,49 | 31,12 | 35,96 | 11,69 | 1,48 | 2,14 |
| 2,4 | 259,29 | 32,08 | 3,88 | 11,63 | 1,48 | 0,67 |
| 2,0 | 12,25 | 1,52 | 2,37 | 1,19 | 0,15 | 0,52 |
| 1,2 | 12,82 | 1,59 | 0,78 | 1,81 | 0,23 | 0,29 |
| 0,6 | 3,97 | 0,49 | 0,29 | 1,06 | 0,13 | 0,15 |
| 0,4 | 0,86 | 0,11 | 0,18 | 0,39 | 0,05 | 0,10 |
| 0,3 | 0,47 | 0,06 | 0,12 | 0,27 | 0,03 | 0,07 |
| 0,2 | 0,61 | 0,08 | 0,05 | 0,32 | 0,04 | 0,03 |
| 0,1 | 0,28 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,03 |
| 0,0 | 0,12 | 0,01 | 0,00 | 0,22 | 0,03 | 0,00 |
| SOMA | 808,22 | 100,00 | - | 788,04 | 100,00 | - |

Fonte: produção do próprio autor.

APÊNDICE C – resultados dos ensaios de massas específicas

Tabela 28: massa específica aparente (MEA) dos lodos úmidos.

| Material | Amostra | Massa | Volume | Resultado | Média (kg/m ³) | Desv Pad |
|-------------------------|---------|--------|---------|-----------|-------------------------------|----------|
| | | (g) | (mL) | | | |
| Lodo cent. | 1 | 549,99 | 1086,46 | 506 | 508 | 2 |
| | 2 | 551,42 | 1086,46 | 508 | | |
| | 3 | 553,27 | 1086,46 | 509 | | |
| Lodo úmido com 20%ST | 1 | 544,82 | 1086,46 | 501 | 496 | 15 |
| | 2 | 535,23 | 1086,46 | 493 | | |
| | 3 | 512,18 | 1086,46 | 471 | | |
| | 4 | 544,34 | 1086,46 | 501 | | |
| | 5 | 563,39 | 1086,46 | 519 | | |
| | 6 | 534,28 | 1086,46 | 492 | | |
| Lodo úmido com 30%ST | 1 | 530,78 | 1086,46 | 489 | 486 | 9 |
| | 2 | 516,98 | 1086,46 | 476 | | |
| | 3 | 517,90 | 1086,46 | 477 | | |
| | 4 | 527,40 | 1086,46 | 485 | | |
| | 5 | 539,06 | 1086,46 | 496 | | |
| | 6 | 536,62 | 1086,46 | 494 | | |
| Lodo úmido com 40%ST | 1 | 540,20 | 1086,46 | 497 | 505 | 6 |
| | 2 | 552,45 | 1086,46 | 508 | | |
| | 3 | 552,12 | 1086,46 | 508 | | |
| | 4 | 545,62 | 1086,46 | 502 | | |
| | 5 | 557,28 | 1086,46 | 513 | | |
| | 6 | 543,44 | 1086,46 | 500 | | |
| Lodo úmido com 50%ST | 1 | 597,25 | 1086,46 | 550 | 545 | 6 |
| | 2 | 580,19 | 1086,46 | 534 | | |
| | 3 | 597,47 | 1086,46 | 550 | | |
| | 4 | 593,08 | 1086,46 | 546 | | |
| | 5 | 593,56 | 1086,46 | 546 | | |
| | 6 | 589,62 | 1086,46 | 543 | | |
| Lodo úmido com 60%ST | 1 | 636,75 | 1086,46 | 586 | 585 | 5 |
| | 2 | 630,72 | 1086,46 | 581 | | |
| | 3 | 641,17 | 1086,46 | 590 | | |
| | 4 | 634,59 | 1086,46 | 584 | | |
| | 5 | 628,35 | 1086,46 | 578 | | |
| | 6 | 641,55 | 1086,46 | 590 | | |
| Lodo úmido com 70%ST | 1 | 668,06 | 1086,46 | 615 | 611 | 8 |
| | 2 | 650,64 | 1086,46 | 599 | | |
| | 3 | 659,51 | 1086,46 | 607 | | |
| | 4 | 667,75 | 1086,46 | 615 | | |
| | 5 | 675,79 | 1086,46 | 622 | | |
| | 6 | 659,86 | 1086,46 | 607 | | |
| Lodo úmido com 80%ST | 1 | 634,99 | 1086,46 | 584 | 581 | 13 |
| | 2 | 649,41 | 1086,46 | 598 | | |
| | 3 | 648,76 | 1086,46 | 597 | | |
| | 4 | 635,88 | 1086,46 | 585 | | |
| | 5 | 629,36 | 1086,46 | 579 | | |
| | 6 | 614,46 | 1086,46 | 566 | | |
| | 7 | 639,07 | 1086,46 | 588 | | |
| | 8 | 630,20 | 1086,46 | 580 | | |
| | 9 | 620,17 | 1086,46 | 571 | | |
| | 10 | 606,30 | 1086,46 | 558 | | |
| Lodo úmido com 90%ST | 1 | 648,74 | 1086,46 | 597 | 596 | 19 |
| | 2 | 661,91 | 1086,46 | 609 | | |
| | 3 | 670,77 | 1086,46 | 617 | | |

Continuidade da Tabela 28.

| | | | |
|---|--------|---------|-----|
| 4 | 682,47 | 1086,46 | 628 |
| 5 | 649,03 | 1086,46 | 597 |
| 6 | 636,61 | 1086,46 | 586 |
| 7 | 628,87 | 1086,46 | 579 |
| 8 | 629,71 | 1086,46 | 580 |
| 9 | 621,78 | 1086,46 | 572 |

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 29: massa específica real (MER) dos lodos úmidos.

| Material | Amostra | Massa (g) | Volume (mL) | Resultado | Média kg/m ³ | Desv Pad |
|---------------------|---------|--------------|----------------|-----------|----------------------------|----------|
| Lodo Cent. | 1 | 70,12 | 65,83 | 1065 | 1065 | - |
| | 1 | 70,74 | 65,34 | 1083 | | |
| Lodo úmido c/ 20%ST | 2 | 74,41 | 68,19 | 1091 | 1087 | 4 |
| | 3 | 70,41 | 64,70 | 1088 | | |
| Lodo úmido c/ 30%ST | 1 | 70,01 | 61,58 | 1137 | 1137 | - |
| | 1 | 71,65 | 59,90 | 1196 | | |
| Lodo úmido c/ 40%ST | 2 | 70,06 | 59,50 | 1178 | 1194 | 15 |
| | 3 | 70,00 | 57,97 | 1207 | | |
| Lodo úmido c/ 50%ST | 1 | 70,03 | 54,93 | 1275 | 1295 | 28 |
| | 2 | 70,32 | 53,20 | 1322 | | |
| | 3 | 70,06 | 53,26 | 1315 | | |
| | 4 | 70,06 | 55,27 | 1268 | | |
| Lodo úmido c/ 60%ST | 1 | 70,06 | 52,97 | 1323 | 1326 | 3 |
| | 2 | 70,03 | 52,70 | 1329 | | |
| | 3 | 70,10 | 52,90 | 1325 | | |
| Lodo úmido c/ 70%ST | 1 | 70,19 | 50,85 | 1380 | 1379 | 5 |
| | 2 | 70,04 | 50,62 | 1384 | | |
| | 3 | 71,28 | 51,65 | 1380 | | |
| | 4 | 71,30 | 51,98 | 1372 | | |
| Lodo úmido c/ 80%ST | 1 | 70,01 | 47,47 | 1475 | 1474 | 6 |
| | 2 | 70,05 | 47,36 | 1479 | | |
| | 3 | 70,09 | 47,78 | 1467 | | |
| Lodo úmido c/ 90%ST | 1 | 70,18 | 46,45 | 1511 | 1534 | 21 |
| | 2 | 70,33 | 45,62 | 1542 | | |
| | 3 | 70,06 | 45,18 | 1551 | | |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 30: massa específica aparente (MEA) dos lodos secos no secador experimental.

| Material | Amostra | Massa (g) | Volume (mL) | Resultado | Média kg/m ³ | Desv Pad |
|----------------------|---------|--------------|----------------|-----------|----------------------------|----------|
| Lodo cent. tratado | 1 | 409,79 | 1086,46 | 377 | 372 | 7 |
| | 2 | 396,26 | 1086,46 | 365 | | |
| | 3 | 407,06 | 1086,46 | 375 | | |
| Lodo tratado (20%ST) | 1 | 403,36 | 1086,46 | 371 | 365 | 5 |
| | 2 | 394,91 | 1086,46 | 363 | | |
| | 3 | 392,61 | 1086,46 | 361 | | |
| Lodo tratado (30%ST) | 1 | 454,16 | 1086,46 | 418 | 413 | 9 |
| | 2 | 453,84 | 1086,46 | 418 | | |
| | 3 | 437,16 | 1086,46 | 402 | | |
| Lodo tratado (40%ST) | 1 | 498,33 | 1086,46 | 459 | 443 | 13 |
| | 2 | 486,73 | 1086,46 | 448 | | |
| | 3 | 469,61 | 1086,46 | 432 | | |
| | 4 | 468,69 | 1086,46 | 431 | | |

Continuidade da Tabela 30

| | | | | | | |
|----------------------|---|--------|---------|-----|-----|----|
| Lodo tratado (50%ST) | 1 | 630,39 | 1086,46 | 580 | 562 | 18 |
| | 2 | 622,89 | 1086,46 | 573 | | |
| | 3 | 600,92 | 1086,46 | 553 | | |
| | 4 | 588,12 | 1086,46 | 541 | | |
| Lodo tratado (60%ST) | 1 | 705,86 | 1086,46 | 650 | 629 | 21 |
| | 2 | 690,59 | 1086,46 | 636 | | |
| | 3 | 686,92 | 1086,46 | 632 | | |
| | 4 | 651,31 | 1086,46 | 599 | | |
| Lodo tratado (70%ST) | 1 | 709,58 | 1086,46 | 653 | 636 | 12 |
| | 2 | 695,97 | 1086,46 | 641 | | |
| | 3 | 691,44 | 1086,46 | 636 | | |
| | 4 | 679,54 | 1086,46 | 625 | | |
| | 5 | 677,31 | 1086,46 | 623 | | |
| Lodo tratado (80%ST) | 1 | 706,67 | 1086,46 | 650 | 631 | 15 |
| | 2 | 690,44 | 1086,46 | 635 | | |
| | 3 | 679,26 | 1086,46 | 625 | | |
| | 4 | 695,64 | 1086,46 | 640 | | |
| | 5 | 681,18 | 1086,46 | 627 | | |
| | 6 | 659,63 | 1086,46 | 607 | | |
| Lodo tratado (90%ST) | 1 | 659,10 | 1086,46 | 607 | 606 | 18 |
| | 2 | 650,79 | 1086,46 | 599 | | |
| | 3 | 692,44 | 1086,46 | 637 | | |
| | 4 | 670,43 | 1086,46 | 617 | | |
| | 5 | 655,41 | 1086,46 | 603 | | |
| | 6 | 631,72 | 1086,46 | 581 | | |
| | 7 | 647,40 | 1086,46 | 596 | | |

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 31: massa específica real (MER) dos lodos secos no secador experimental.

| Material | Amostra | Massa | Volume | Resultado | Média | Desv Pad |
|-------------------|---------|--------|--------|-----------|-------------------|----------|
| | | (g) | (mL) | | kg/m ³ | |
| Lodo seco (cent.) | 1 | 71,08 | 44,93 | 1582 | 1558 | 23 |
| | 2 | 70,08 | 45,65 | 1535 | | |
| | 3 | 70,11 | 44,99 | 1558 | | |
| Lodo seco (20%ST) | 1 | 70,24 | 45,34 | 1549 | 1533 | 18 |
| | 2 | 70,03 | 46,25 | 1514 | | |
| | 3 | 81,56 | 53,06 | 1537 | | |
| Lodo seco (30%ST) | 1 | 82,72 | 51,81 | 1597 | 1595 | 8 |
| | 2 | 70,01 | 44,13 | 1587 | | |
| | 3 | 72,88 | 45,49 | 1602 | | |
| Lodo seco (40%ST) | 1 | 70,05 | 44,15 | 1587 | 1567 | 43 |
| | 2 | 70,64 | 46,54 | 1518 | | |
| | 3 | 70,09 | 43,91 | 1596 | | |
| Lodo seco (50%ST) | 1 | 70,01 | 45,09 | 1553 | 1573 | 49 |
| | 2 | 77,62 | 47,68 | 1628 | | |
| | 3 | 70,55 | 45,89 | 1537 | | |
| Lodo seco (60%ST) | 1 | 70,38 | 43,91 | 1603 | 1585 | 22 |
| | 2 | 70,26 | 45,02 | 1561 | | |
| | 3 | 70,00 | 43,95 | 1593 | | |
| Lodo seco (70%ST) | 1 | 77,80 | 48,16 | 1615 | 1598 | 30 |
| | 2 | 70,01 | 43,35 | 1615 | | |
| | 3 | 70,62 | 45,18 | 1563 | | |
| Lodo seco (80%ST) | 1 | 81,48 | 51,72 | 1575 | 1590 | 13 |
| | 2 | 104,68 | 65,45 | 1599 | | |
| | 3 | 70,05 | 43,88 | 1596 | | |
| Lodo seco (90%ST) | 1 | 76,64 | 48,11 | 1593 | 1588 | 16 |
| | 2 | 106,54 | 66,59 | 1600 | | |
| | 3 | 95,18 | 60,63 | 1570 | | |

Fonte: Produção do próprio autor.

APÊNDICE D – resultados dos ensaios de umidade residual e de equilíbrio

Tabela 32: resultados dos ensaios de URL que foram realizados a 90 e 80°C.

| Lodo | Amostra | UMIDADE RESIDUAL DO LODO A 90°C (%) | | | | | UMIDADE RESIDUAL DO LODO A 80°C (%) | | | | |
|-------------------------------------|---------|--|-------|----------|-------|----------|--|-------|----------|-------|----------|
| | | Inicial | Final | Residual | Média | Desv Pad | Inicial | Final | Residual | Média | Desv Pad |
| LODO CENT. LODO ÚMIDO (16%ST) | 1 | 79,88 | 80,16 | 0,28 | 0,30 | 0,02 | 84,09 | 84,46 | 0,37 | 0,42 | 0,04 |
| | 2 | 79,09 | 79,41 | 0,32 | | | 84,14 | 84,61 | 0,47 | | |
| | 3 | 78,28 | 78,59 | 0,31 | | | 84,16 | 84,56 | 0,40 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 84,19 | 84,63 | 0,44 | | |
| | 5 | - | - | - | | | 83,64 | 84,07 | 0,43 | | |
| LODO ÚMIDO (20%ST) | 1 | 81,76 | 82,02 | 0,26 | 0,26 | 0,04 | 77,26 | 77,86 | 0,60 | 0,52 | 0,06 |
| | 2 | 81,69 | 81,98 | 0,29 | | | 78,79 | 79,29 | 0,50 | | |
| | 3 | 81,36 | 81,58 | 0,22 | | | 79,15 | 79,67 | 0,52 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 79,44 | 79,91 | 0,47 | | |
| LODO ÚMIDO (30%ST) | 1 | 70,32 | 70,68 | 0,36 | 0,36 | 0,01 | 71,86 | 72,44 | 0,58 | 0,60 | 0,02 |
| | 2 | 66,58 | 66,94 | 0,36 | | | 69,41 | 70,02 | 0,61 | | |
| | 3 | 68,69 | 69,04 | 0,35 | | | 69,52 | 70,13 | 0,61 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 71,33 | 71,94 | 0,61 | | |
| LODO ÚMIDO (40%ST) | 1 | 61,53 | 61,98 | 0,45 | 0,44 | 0,01 | 57,02 | 57,71 | 0,69 | 0,66 | 0,03 |
| | 2 | 61,60 | 62,04 | 0,44 | | | 57,16 | 57,79 | 0,63 | | |
| | 3 | 57,86 | 58,30 | 0,44 | | | 58,44 | 59,11 | 0,67 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 55,42 | 56,06 | 0,64 | | |
| | 5 | - | - | - | | | 59,34 | 60,00 | 0,66 | | |
| | 6 | - | - | - | | | 56,34 | 57,03 | 0,69 | | |
| LODO ÚMIDO (50%ST) | 1 | 50,70 | 51,17 | 0,47 | 0,46 | 0,01 | 45,86 | 46,66 | 0,80 | 0,80 | 0,01 |
| | 2 | 52,23 | 52,68 | 0,45 | | | 46,15 | 46,94 | 0,79 | | |
| | 3 | 52,83 | 53,29 | 0,46 | | | 46,30 | 47,09 | 0,79 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 44,19 | 44,99 | 0,80 | | |
| | 5 | - | - | - | | | 45,46 | 46,28 | 0,82 | | |
| | 6 | - | - | - | | | 46,24 | 47,04 | 0,80 | | |
| LODO ÚMIDO (60%ST) | 1 | 38,54 | 39,10 | 0,56 | 0,56 | 0,01 | 37,40 | 38,29 | 0,89 | 0,92 | 0,02 |
| | 2 | 38,88 | 39,43 | 0,55 | | | 36,43 | 37,36 | 0,93 | | |
| | 3 | 39,07 | 39,64 | 0,57 | | | 38,12 | 39,01 | 0,89 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 36,83 | 37,78 | 0,95 | | |
| | 5 | - | - | - | | | 34,49 | 35,41 | 0,92 | | |
| | 6 | - | - | - | | | 37,61 | 38,54 | 0,93 | | |
| LODO ÚMIDO (70%ST) | 1 | 27,97 | 28,62 | 0,65 | 0,68 | 0,03 | 26,54 | 27,83 | 1,29 | 1,25 | 0,03 |
| | 2 | 27,56 | 28,23 | 0,67 | | | 26,69 | 27,93 | 1,24 | | |
| | 3 | 29,17 | 29,88 | 0,71 | | | 25,43 | 26,64 | 1,21 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 28,12 | 29,38 | 1,26 | | |
| LODO ÚMIDO (80%ST) | 1 | 17,87 | 18,64 | 0,77 | 0,77 | 0,01 | 19,08 | 20,49 | 1,41 | 1,38 | 0,04 |
| | 2 | 18,31 | 19,08 | 0,77 | | | 19,87 | 21,28 | 1,41 | | |
| | 3 | 17,75 | 18,53 | 0,78 | | | 18,76 | 20,14 | 1,38 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 17,57 | 18,89 | 1,32 | | |
| LODO ÚMIDO (90%ST) | 1 | 9,46 | 10,28 | 0,82 | 0,81 | 0,01 | 8,16 | 9,54 | 1,38 | 1,43 | 0,05 |
| | 2 | 10,06 | 10,88 | 0,82 | | | 8,67 | 10,17 | 1,50 | | |
| | 3 | 9,73 | 10,53 | 0,80 | | | 8,46 | 9,88 | 1,42 | | |
| | 4 | - | - | - | | | 8,63 | 10,04 | 1,41 | | |

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 33: resultados dos ensaios de URL que foram realizados a 90 e 80°C.

| Lodo | Amostra | UMIDADE RESIDUAL DO LODO A | | | | | UMIDADE RESIDUAL DO LODO A | | | | |
|--------------------|---------|----------------------------|-------|----------|-------|----------|----------------------------|-------|----------|-------|----------|
| | | 70°C (%) | | | | | 60°C (%) | | | | |
| | | Inicial | Final | Residual | Média | Desv Pad | Inicial | Final | Residual | Média | Desv Pad |
| LODO CENT. (16%ST) | 1 | 79,56 | 80,19 | 0,63 | 0,65 | 0,03 | 79,84 | 80,89 | 1,05 | 1,00 | 0,05 |
| | 2 | 79,80 | 80,43 | 0,63 | | | 79,97 | 80,92 | 0,95 | | |
| | 3 | 79,36 | 80,05 | 0,69 | | | 79,53 | 80,53 | 1,00 | | |
| LODO ÚMIDO (20%ST) | 1 | 80,31 | 80,99 | 0,68 | 0,72 | 0,05 | 80,61 | 81,73 | 1,12 | 1,13 | 0,09 |
| | 2 | 78,43 | 79,15 | 0,72 | | | 78,89 | 79,94 | 1,05 | | |
| | 3 | 78,34 | 79,11 | 0,77 | | | 78,91 | 80,13 | 1,22 | | |
| LODO ÚMIDO (30%ST) | 1 | 66,70 | 67,82 | 1,12 | 1,11 | 0,01 | 67,57 | 69,30 | 1,73 | 1,65 | 0,07 |
| | 2 | 64,90 | 66,00 | 1,10 | | | 70,01 | 71,63 | 1,62 | | |
| | 3 | 69,87 | 70,98 | 1,11 | | | 68,05 | 69,65 | 1,60 | | |
| LODO ÚMIDO (40%ST) | 1 | 57,6 | 58,93 | 1,33 | 1,31 | 0,04 | 55,95 | 57,8 | 1,85 | 1,85 | 0,01 |
| | 2 | 59,94 | 61,20 | 1,26 | | | 55,87 | 57,73 | 1,86 | | |
| | 3 | 59,17 | 60,51 | 1,34 | | | 58,10 | 59,94 | 1,84 | | |
| LODO ÚMIDO (50%ST) | 1 | 49,14 | 50,80 | 1,66 | 1,64 | 0,03 | 48,37 | 50,79 | 2,42 | 2,34 | 0,07 |
| | 2 | 48,52 | 50,17 | 1,65 | | | 50,31 | 52,62 | 2,31 | | |
| | 3 | 49,98 | 51,58 | 1,60 | | | 50,07 | 52,37 | 2,30 | | |
| LODO ÚMIDO (60%ST) | 1 | 39,74 | 41,54 | 1,80 | 1,74 | 0,06 | 39,42 | 42,00 | 2,58 | 2,59 | 0,03 |
| | 2 | 41,29 | 42,95 | 1,66 | | | 38,92 | 41,48 | 2,56 | | |
| | 3 | 40,07 | 41,82 | 1,75 | | | 38,72 | 41,30 | 2,58 | | |
| | 4 | 38,91 | 40,66 | 1,75 | | | 37,62 | 40,24 | 2,62 | | |
| LODO ÚMIDO (70%ST) | 1 | 25,91 | 27,88 | 1,97 | 1,99 | 0,02 | 26,17 | 29,16 | 2,99 | 3,04 | 0,06 |
| | 2 | 28,96 | 30,96 | 2,00 | | | 25,73 | 28,74 | 3,01 | | |
| | 3 | 27,74 | 29,73 | 1,99 | | | 25,78 | 28,8 | 3,02 | | |
| | 4 | 27,37 | 29,38 | 2,01 | | | 24,96 | 28,08 | 3,12 | | |
| LODO ÚMIDO (80%ST) | 1 | 16,76 | 18,91 | 2,15 | 2,09 | 0,06 | 16,92 | 20,04 | 3,12 | 3,17 | 0,08 |
| | 2 | 17,28 | 19,4 | 2,12 | | | 16,77 | 19,94 | 3,17 | | |
| | 3 | 18,62 | 20,66 | 2,04 | | | 16,39 | 19,67 | 3,28 | | |
| | 4 | 15,82 | 17,86 | 2,04 | | | 15,20 | 18,30 | 3,10 | | |
| LODO ÚMIDO (90%ST) | 1 | 7,37 | 9,55 | 2,18 | 2,15 | 0,12 | 7,18 | 10,68 | 3,50 | 3,39 | 0,11 |
| | 2 | 8,02 | 10,32 | 2,30 | | | 6,77 | 10,14 | 3,37 | | |
| | 3 | 7,42 | 9,54 | 2,12 | | | 6,99 | 10,28 | 3,29 | | |
| | 4 | 7,88 | 9,89 | 2,01 | | | - | - | - | | |

Fonte: produção do próprio autor.

APÊNDICE E – resultados dos ensaios de tempo-temperatura

Tabela 34: resultados de umidade e tempo de secagem do lodo centrifugado no TGA.

| Temp. | Amostra | Massa Inicial (g) | Umidade (%) | TEMPO (h) | | | TAXA GLOBAL (%/h) | |
|-------|---------|-------------------|-------------|-----------|-------|----------|-------------------|----------|
| | | | | Total | Média | σ | Média | σ |
| 104°C | 1 | 2,5453 | 81,2388 | 2,89 | 2,92 | 0,07 | 28,15 | 0,72 |
| | 2 | 2,5834 | 81,5480 | 2,89 | | | 28,23 | 0,73 |
| | 3 | 2,5153 | 82,1787 | 3,08 | | | 26,72 | 0,67 |
| | 4 | 2,5519 | 82,8739 | 2,90 | | | 28,62 | 0,73 |
| | 5 | 2,5130 | 82,8866 | 2,90 | | | 28,58 | 0,72 |
| | 6 | 2,5143 | 82,6878 | 2,89 | | | 28,66 | 0,72 |
| | 7 | 2,5038 | 82,7919 | 2,89 | | | 28,66 | 0,72 |
| | 8 | 2,5889 | 82,6026 | 2,95 | | | 27,97 | 0,72 |
| | 9 | 2,5941 | 82,4442 | 2,84 | | | 29,07 | 0,75 |
| | 10 | 2,5502 | 82,4006 | 2,96 | | | 27,84 | 0,71 |
| 90°C | 1 | 2,5516 | 80,8664 | 3,54 | 3,64 | 0,12 | 22,83 | 0,58 |
| | 2 | 2,5523 | 81,1893 | 3,55 | | | 22,90 | 0,58 |
| | 3 | 2,5688 | 81,5289 | 3,61 | | | 22,59 | 0,58 |
| | 4 | 2,5494 | 81,3713 | 3,49 | | | 23,32 | 0,59 |
| | 5 | 2,5288 | 81,0349 | 3,49 | | | 23,20 | 0,59 |
| | 6 | 2,5803 | 81,1764 | 3,74 | | | 21,69 | 0,56 |
| | 7 | 2,5224 | 81,2522 | 3,69 | | | 22,05 | 0,56 |
| | 8 | 2,5036 | 80,7587 | 3,75 | | | 21,53 | 0,54 |
| | 9 | 2,5180 | 80,9470 | 3,82 | | | 21,21 | 0,53 |
| | 10 | 2,5788 | 81,1841 | 3,76 | | | 21,60 | 0,56 |
| 80°C | 1 | 2,5479 | 79,7086 | 4,76 | 4,53 | 0,18 | 16,73 | 0,43 |
| | 2 | 2,5035 | 78,1846 | 4,27 | | | 18,31 | 0,46 |
| | 3 | 2,5293 | 78,7540 | 4,46 | | | 17,66 | 0,45 |
| | 4 | 2,5092 | 78,5969 | 4,40 | | | 17,86 | 0,45 |
| | 5 | 2,5353 | 81,1307 | 4,84 | | | 16,76 | 0,43 |
| | 6 | 2,5893 | 79,4515 | 4,60 | | | 17,29 | 0,45 |
| | 7 | 2,5016 | 80,4270 | 4,60 | | | 17,49 | 0,44 |
| | 8 | 2,5131 | 78,4458 | 4,29 | | | 18,28 | 0,46 |
| | 9 | 2,5812 | 78,6473 | 4,55 | | | 17,30 | 0,45 |
| | 10 | 2,5140 | 77,9281 | 4,49 | | | 17,37 | 0,44 |
| 70°C | 1 | 2,5876 | 77,7190 | 5,05 | 5,34 | 0,32 | 15,40 | 0,40 |
| | 2 | 2,5044 | 82,6791 | 6,18 | | | 13,38 | 0,34 |
| | 3 | 2,5266 | 79,0794 | 5,37 | | | 14,74 | 0,37 |
| | 4 | 2,5839 | 78,4111 | 5,31 | | | 14,77 | 0,38 |
| | 5 | 2,5113 | 77,0513 | 5,19 | | | 14,86 | 0,37 |
| | 6 | 2,5674 | 75,5150 | 5,25 | | | 14,38 | 0,37 |
| | 7 | 2,5733 | 76,6590 | 5,38 | | | 14,25 | 0,37 |
| | 8 | 2,5197 | 74,9127 | 5,01 | | | 14,95 | 0,38 |
| | 9 | 2,5748 | 76,6774 | 5,33 | | | 14,40 | 0,37 |
| | 10 | 2,5137 | 76,1843 | 5,33 | | | 14,30 | 0,36 |
| 60°C | 1 | 2,5017 | 74,7492 | 6,36 | 6,54 | 0,16 | 11,76 | 0,29 |
| | 2 | 2,5521 | 73,0805 | 6,49 | | | 11,27 | 0,29 |
| | 3 | 2,5672 | 75,0572 | 6,74 | | | 11,13 | 0,29 |
| | 4 | 2,5271 | 74,8674 | 6,56 | | | 11,42 | 0,29 |
| | 5 | 2,5684 | 74,4794 | 6,81 | | | 10,93 | 0,28 |
| | 6 | 2,5472 | 73,4969 | 6,56 | | | 11,20 | 0,29 |
| | 7 | 2,5549 | 73,1156 | 6,57 | | | 11,13 | 0,28 |
| | 8 | 2,5838 | 73,3468 | 6,32 | | | 11,61 | 0,30 |
| | 9 | 2,5514 | 72,0017 | 6,38 | | | 11,28 | 0,29 |
| | 10 | 2,5210 | 72,3084 | 6,58 | | | 10,99 | 0,28 |

Fonte: produção do próprio autor.

APÊNDICE F – resultados dos ensaios no secador experimental

Tabela 35: resultados de umidade e tempo de secagem do lodo centrifugado no TGA.

| Rodada análise | Lodo no leito | Tempo (h) | Medição de pressão estática no leito | | | | Temperatura (°C) | | | | |
|----------------|-----------------|-----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|------------------|----------|----|----|----|
| | | | $p_{1,2}^*$ | $\Delta p_{1,2}^{**}$ | $p_{3,2}^*$ | $\Delta p_{3,4}^{**}$ | Ar de secagem* | Leito*** | | | |
| PRIMEIRA | Leito vazio | 0 | 33 | 1 | 34 | 1 | 30 | - | - | - | |
| | Não destorroado | 0 | 33 | 2 | 35 | 3 | 80 | - | - | - | |
| | Destorroado | 0 | 34 | 4 | 36 | 6 | 80 | - | - | - | |
| | | 0 | 33 | 3 | 34 | 3 | 80 | - | - | - | |
| | 50% | 2 | 33 | 2 | 34 | 1 | 86 | 82 | 82 | 80 | |
| | | 4 | 33 | 3 | 34 | 2 | 79 | 76 | 77 | 75 | |
| | | 6 | 33 | 3 | 33 | 2 | 83 | 80 | 80 | 79 | |
| | | 8 | 33 | 3 | 33 | 3 | 82 | 79 | 80 | 79 | |
| | | 10 | 34 | 3 | 35 | 3 | 80 | 76 | 77 | 77 | |
| | | 12 | 33 | 3 | 34 | 2 | 80 | 75 | 76 | 76 | |
| | | 40% | 0 | 33 | 1 | 34 | 1 | 79 | - | - | - |
| | 2 | | 33 | 1 | 34 | 0 | 70 | 70 | 70 | 68 | |
| | 4 | | 32 | 2 | 33 | 0 | 82 | 82 | 82 | 80 | |
| | 6 | | 33 | 2 | 34 | 2 | 78 | 78 | 77 | 77 | |
| | 8 | | 34 | 2 | 34 | 1 | 80 | 79 | 80 | 79 | |
| | 10 | | 34 | 2 | 34 | 2 | 75 | 75 | 73 | 73 | |
| | 12 | | 34 | 2 | 34 | 1 | 78 | 79 | 78 | 76 | |
| | 30% | 0 | 34 | 1 | 34 | 1 | 80 | - | - | - | |
| | | 2 | 35 | 1 | 35 | 1 | 75 | 49 | 54 | 38 | |
| | | 4 | 35 | 1 | 35 | 1 | 78 | 77 | 76 | 72 | |
| | | 6 | 35 | 2 | 35 | 1 | 79 | 77 | 77 | 74 | |
| | | 8 | 34 | 1 | 34 | 1 | 83 | 82 | 82 | 82 | |
| | | 10 | 34 | 1 | 34 | 2 | 82 | 81 | 82 | 80 | |
| | | 12 | 34 | 1 | 34 | 1 | 83 | 82 | 82 | 80 | |
| | 20% | 0 | 33 | 2 | 34 | 2 | 79 | - | - | - | |
| | | 2 | 33 | 1 | 34 | 0 | 81 | 37 | 39 | 39 | |
| | | 4 | 33 | 1 | 34 | 0 | 81 | 78 | 74 | 69 | |
| | | 6 | 34 | 2 | 34 | 1 | 78 | 77 | 77 | 74 | |
| | | 8 | 34 | 1 | 34 | 1 | 80 | 79 | 78 | 75 | |
| | | 10 | 34 | 1 | 34 | 1 | 80 | 78 | 78 | 76 | |
| | | 12 | 34 | 1 | 34 | 1 | 79 | 77 | 77 | 74 | |
| | Cent. (16%) | 0 | 33 | 3 | 34 | 2 | 81 | - | - | - | |
| | | 1 | - | - | - | - | 83 | 36 | 35 | 36 | |
| | | 2 | 33 | 1 | 33 | 2 | 81 | 37 | 37 | 36 | |
| | | 3 | - | - | - | - | 81 | 49 | 38 | 40 | |
| | | 4 | 33 | 2 | 33 | 2 | 80 | 77 | 77 | 78 | |
| | | 6 | 33 | 2 | 33 | 0 | 82 | 82 | 81 | 80 | |
| | | 8 | 34 | 1 | 34 | 0 | 78 | 77 | - | - | |
| | | 10 | 32 | 1 | 34 | 0 | 76 | 75 | 75 | 75 | |
| | | 12 | 34 | 2 | 34 | 1 | 73 | 71 | - | - | |
| | | SEGUNDA | 1 | - | - | - | - | 80 | 35 | 34 | 36 |
| | | | 2 | - | - | - | - | 79 | 43 | 37 | 48 |
| 3 | | | - | - | - | - | 81 | 71 | 72 | 70 | |
| 4 | - | | - | - | - | 81 | 74 | 75 | 75 | | |
| 5 | - | | - | - | - | 80 | 76 | 77 | 76 | | |
| 6 | - | | - | - | - | 82 | 77 | 78 | 78 | | |
| 50% | 1 | | - | - | - | - | 84 | 79 | 81 | 80 | |
| | 2 | | - | - | - | - | 81 | 77 | 78 | 78 | |
| 80% | 0 | | 33 | 5 | 34 | 5 | 80 | - | - | - | |
| | 2 | | 33 | 4 | 34,5 | 5 | 80 | 65 | 66 | 68 | |
| | 4 | | 33 | 3 | 36 | 4 | 79 | 76 | 75 | 72 | |
| | 6 | | 33 | 4 | 34 | 5 | 80 | 74 | 78 | 78 | |

| | | Continuidade da Tabela 35 | | | | | | | | |
|--|-------------|---------------------------|----|---|----|---|----|----|----|----|
| | | 8 | 33 | 5 | 34 | 6 | 80 | 76 | 79 | 77 |
| | | 10 | 34 | 5 | 34 | 6 | 84 | 77 | 81 | 82 |
| | | 12 | 34 | 5 | 36 | 5 | 82 | 79 | 79 | 81 |
| | | 2 | 33 | 5 | 34 | 5 | 79 | 77 | 77 | 78 |
| | | 4 | 32 | 5 | 34 | 5 | 82 | 81 | 82 | 82 |
| | | 6 | 32 | 5 | 34 | 5 | 83 | 80 | 82 | 82 |
| | 90% | 8 | 32 | 5 | 33 | 5 | 82 | 81 | 81 | 81 |
| | | 10 | 34 | 5 | 34 | 5 | 78 | 76 | 78 | 78 |
| | | 12 | 33 | 5 | 36 | 5 | 83 | 81 | 80 | 79 |
| | | 0 | 34 | 6 | 34 | 6 | 80 | - | - | - |
| | | 2 | 34 | 5 | 35 | 4 | 79 | 74 | 76 | 76 |
| | | 4 | 34 | 5 | 34 | 5 | 82 | 78 | 79 | 80 |
| | 70% | 6 | 35 | 5 | 34 | 6 | 77 | 73 | 74 | 73 |
| | | 8 | 34 | 5 | 34 | 5 | 82 | 77 | 78 | - |
| | | 10 | 34 | 5 | 34 | 5 | 64 | 61 | 62 | 62 |
| | | 12 | 33 | 5 | 34 | 5 | 81 | 78 | 77 | |
| | | 0 | 33 | 6 | 33 | 6 | 80 | - | - | - |
| | | 2 | 33 | 4 | 33 | 3 | 83 | 78 | 79 | 78 |
| | | 4 | 34 | 5 | 34 | 5 | 84 | 81 | 82 | 81 |
| | 60% | 6 | 34 | 5 | 36 | 5 | 76 | 73 | 73 | 71 |
| | | 8 | 34 | 5 | 34 | 5 | 83 | 78 | 79 | 78 |
| | | 10 | 34 | 5 | 34 | 5 | 79 | 75 | 75 | 74 |
| | | 12 | 34 | 5 | 34 | 4 | 77 | 72 | 72 | 72 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 83 | 73 | 43 | 57 |
| | 60% | 1 | - | - | - | - | 81 | 73 | 76 | 75 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 80 | 75 | 76 | 78 |
| | | 2 | - | - | - | - | 81 | 77 | 80 | 81 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 81 | 73 | 70 | 72 |
| | 70% | 1 | - | - | - | - | 79 | 73 | 74 | 73 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 80 | 73 | 74 | 73 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 81 | 74 | 72 | 73 |
| | 80% | 1 | - | - | - | - | 80 | 76 | 77 | 77 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 79 | 76 | 77 | 78 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 79 | 76 | 49 | 65 |
| | 90% | 1 | - | - | - | - | 80 | 75 | 76 | 76 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 80 | 75 | 78 | 76 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 80 | 73 | 72 | 71 |
| | 50% | 1 | - | - | - | - | 81 | 76 | 76 | 76 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 81 | 76 | 77 | 77 |
| | | 2 | - | - | - | - | 82 | 76 | 77 | 77 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 81 | 36 | 36 | 35 |
| | | 1 | - | - | - | - | 82 | 44 | 37 | 54 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 82 | 64 | 41 | 66 |
| | | 2 | - | - | - | - | 82 | 80 | 68 | 77 |
| | 30% | 2,5 | - | - | - | - | 82 | 79 | 79 | 81 |
| | | 3 | - | - | - | - | 82 | 81 | 81 | 81 |
| | | 3,5 | - | - | - | - | 83 | 81 | 82 | 80 |
| | | 4 | - | - | - | - | 82 | 80 | 81 | 80 |
| | | 4,5 | - | - | - | - | 82 | 79 | 80 | 80 |
| | | 5 | - | - | - | - | 80 | 76 | 77 | 77 |
| | | 4 | - | - | - | - | 82 | 79 | 79 | 78 |
| | CENT. (16%) | 4,5 | - | - | - | - | 82 | 80 | 79 | 78 |
| | | 5 | - | - | - | - | 83 | 77 | 77 | 77 |
| | | 0,5 | - | - | - | - | 84 | 47 | 47 | 54 |
| | 40% | 1 | - | - | - | - | 80 | 69 | 72 | 75 |
| | | 1,5 | - | - | - | - | 80 | 78 | 79 | 78 |
| | | 2 | - | - | - | - | 79 | 78 | 78 | 78 |

TERCEIRA

Continuidade da Tabela 35.

| | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|----|----|----|----|
| 2,5 | - | - | - | - | 79 | 78 | 79 | 79 |
| 3 | - | - | - | - | 80 | 78 | 78 | 77 |
| 3,5 | - | - | - | - | 78 | 76 | 77 | 76 |
| 4 | - | - | - | - | 81 | 76 | 77 | 77 |

NOTAS: * : a montante do leite; ** : pressão diferencial do leite; *** : temperatura no momento da coleta do lodo.

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 36: resultados de umidade no momento de 0,5 e 1,0 horas no secador experimental.

| ST do lodo | Parâmetros | Tempo decorrido de secagem | | | | | | | |
|------------|-------------------|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| | | 0,5 horas | | | | 1,0 horas | | | |
| | | A1 | A2 | A3 | A4 | A1 | A2 | A3 | A4 |
| CENT. | Massa inicial (g) | - | - | - | - | 6,9694 | 6,9528 | 6,8392 | - |
| | Umidade (%) | - | - | - | - | 78,8100 | 81,4700 | 83,6500 | - |
| | Umidade média (%) | 81,30 | | | | | | | |
| 16%ST | Massa inicial (g) | - | - | - | - | 6,7551 | 6,6083 | 6,8964 | - |
| | Umidade (%) | - | - | - | - | 70,9300 | 65,7500 | 71,1500 | - |
| | Umidade média (%) | 69,32 | | | | | | | |
| 20%ST | Massa inicial (g) | 6,7680 | 6,9297 | 6,9859 | 6,993 | 6,9705 | 6,8579 | 6,8385 | 6,0806 |
| | Umidade (%) | 57,1200 | 57,0600 | 57,8600 | 65,1700 | 49,2800 | 51,3200 | 51,3000 | 52,6400 |
| | Umidade média (%) | 59,33 | | | | | | | |
| 30%ST | Massa inicial (g) | 6,9887 | 6,9309 | 6,0879 | 3,6198 | 6,6947 | 6,7309 | 4,3534 | 2,7577 |
| | Umidade (%) | 40,7300 | 32,4200 | 34,3300 | 46,4000 | 23,0500 | 24,2700 | 24,6500 | 26,6800 |
| | Umidade média (%) | 37,51 | | | | | | | |
| 40%ST | Massa inicial (g) | 6,9219 | 6,6666 | 6,1887 | - | 6,6101 | 5,8935 | 5,2967 | - |
| | Umidade (%) | 20,1400 | 13,1700 | 15,1900 | - | 4,7200 | 6,3300 | 6,5200 | - |
| | Umidade média (%) | 16,24 | | | | | | | |
| 50%ST | Massa inicial (g) | 6,5744 | 6,9247 | 6,9899 | - | 6,2347 | 6,4729 | 5,9767 | - |
| | Umidade (%) | 20,9900 | 18,0400 | 28,0100 | - | 6,2347 | 3,2900 | 3,9100 | - |
| | Umidade média (%) | 22,39 | | | | | | | |
| 60%ST | Massa inicial (g) | 6,9352 | 6,9881 | 6,5584 | - | 6,9531 | 6,7385 | 6,612 | - |
| | Umidade (%) | 10,7100 | 15,5600 | 16,7800 | - | 3,0100 | 3,3500 | 3,4800 | - |
| | Umidade média (%) | 14,31 | | | | | | | |
| 70%ST | Massa inicial (g) | 6,9699 | 6,946 | 6,9706 | - | 6,9514 | 6,9624 | 6,6376 | - |
| | Umidade (%) | 11,5900 | 11,5100 | 13,9200 | - | 3,9200 | 3,8600 | 4,0800 | - |
| | Umidade média (%) | 12,34 | | | | | | | |
| 80%ST | Massa inicial (g) | 6,9874 | 6,993 | 6,9647 | - | 6,9935 | 6,9981 | 2,1804 | - |
| | Umidade (%) | 6,5000 | 5,9200 | 7,4700 | - | 2,8500 | 2,8100 | 3,9100 | - |
| | Umidade média (%) | 6,63 | | | | | | | |
| 90%ST | Massa inicial (g) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 2,98 | | | | | | | |

Nota: A: amostra

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 37: resultados de umidade no momento de 1,5 e 2,0 horas no secador experimental.

| ST no lodo | Parâmetros | Tempo decorrido de secagem | | | | | | | |
|----------------|-------------------|----------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| | | 1,5 horas | | | | 2,0 horas | | | |
| | | A1 | A2 | A3 | A4 | A1 | A2 | A3 | A4 |
| CENT. 16%ST | Massa inicial (g) | - | - | - | - | 6,3767 | 6,4221 | 6,8001 | - |
| | Umidade (%) | - | - | - | - | 74,7100 | 69,2200 | 76,9100 | - |
| | Umidade média (%) | - | | | | 73,67 | | | |
| 20%ST | Massa inicial (g) | - | - | - | - | 6,6562 | 6,981 | 5,0504 | - |
| | Umidade (%) | - | - | - | - | 49,2900 | 49,9200 | 62,3000 | - |
| | Umidade média (%) | - | | | | 53,04 | | | |
| 30%ST | Massa inicial (g) | 6,9193 | 6,9709 | 5,4038 | 3,3606 | 6,9998 | 6,9502 | 3,7596 | 2,2515 |
| | Umidade (%) | 42,5200 | 44,6900 | 46,0200 | 39,2700 | 20,4600 | 18,1800 | 35,8100 | 33,7600 |
| | Umidade média (%) | 43,54 | | | | 24,06 | | | |
| 40%ST | Massa inicial (g) | 6,9501 | 6,0693 | 3,7849 | 2,2304 | 6,2786 | 5,8775 | 4,8301 | - |
| | Umidade (%) | 8,1500 | 9,2200 | 9,5700 | 16,1000 | 4,4300 | 3,3600 | 3,7600 | - |
| | Umidade média (%) | 9,71 | | | | 3,87 | | | |
| 50%ST | Massa inicial (g) | 6,7716 | 5,6425 | 5,8521 | | 5,6902 | 5,8346 | 6,0291 | - |
| | Umidade (%) | 3,0400 | 2,3400 | 2,2100 | | 1,7400 | 1,6500 | 1,8300 | - |
| | Umidade média (%) | 2,56 | | | | 1,74 | | | |
| 60%ST | Massa inicial (g) | 6,9763 | 6,8712 | 6,7615 | | 6,5784 | 6,2707 | 6,9713 | - |
| | Umidade (%) | 1,9800 | 2,2300 | 2,0800 | | 1,6600 | 1,7300 | 1,7600 | - |
| | Umidade média (%) | 2,10 | | | | 1,72 | | | |
| 70%ST | Massa inicial (g) | 6,801 | 6,7056 | 6,4421 | | 5,9298 | 5,8092 | 6,572 | - |
| | Umidade (%) | 2,6800 | 2,4500 | 2,4800 | | 2,0100 | 2,2800 | 2,0300 | - |
| | Umidade média (%) | 2,54 | | | | 2,10 | | | |
| 80%ST | Massa inicial (g) | 6,9776 | 6,9351 | 6,9561 | | 5,4921 | 5,5595 | 5,517 | - |
| | Umidade (%) | 2,6100 | 2,3500 | 2,2600 | | 1,5600 | 1,5400 | 1,6800 | - |
| | Umidade média (%) | 2,41 | | | | 1,59 | | | |
| 90%ST | Massa inicial (g) | 6,9784 | 6,6701 | 6,9804 | | 5,9307 | 5,6491 | 5,8868 | - |
| | Umidade (%) | 2,5100 | 1,7700 | 2,2500 | | 1,7500 | 1,7300 | 1,6700 | - |
| | Umidade média (%) | 2,18 | | | | 1,72 | | | |

Nota: A: amostra

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 38: resultados de umidade no momento de 2,5 a 3,5 horas no secador experimental.

| ST no lodo | Parâmetros | Tempo decorrido de secagem | | | | | | | | | |
|------------|-------------------|----------------------------|--------|--------|-----------|---------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| | | 2,5 horas | | | 3,0 horas | | | 3,5 horas | | | |
| | | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | |
| CENT. | Massa inicial (g) | - | - | - | 6,7308 | 6,8529 | 6,9877 | - | - | - | |
| | 16%S | Umidade (%) | - | - | - | 43,5600 | 43,9400 | 49,8200 | - | - | - |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | 45,81 | - | - | - | |
| 20%S | Massa inicial (g) | - | - | - | 6,2754 | 4,6887 | 2,4854 | - | - | - | |
| | T | Umidade (%) | - | - | - | 22,2200 | 25,1000 | 11,2600 | - | - | - |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | 21,20 | - | - | - | |
| 30%S | Massa inicial (g) | 6,6028 | 5,7283 | 4,139 | 6,9467 | 5,3348 | 4,5027 | 6,9819 | 5,3202 | 4,3647 | |
| | T | Umidade (%) | 6,3300 | 5,6200 | 5,0700 | 3,2700 | 3,0400 | 3,9900 | 1,9800 | 1,8000 | 2,1400 |
| | T | Umidade média (%) | - | 5,77 | - | - | 3,39 | - | 1,96 | - | - |
| 40%S | Massa inicial (g) | 6,597 | 5,6145 | 5,2867 | 6,0846 | 5,1062 | 4,792 | 6,1365 | 5,1583 | 5,2217 | |
| | T | Umidade (%) | 2,1800 | 2,2600 | 2,2000 | 1,9400 | 1,8400 | 2,0000 | 1,7600 | 1,6900 | 1,8300 |
| | T | Umidade média (%) | - | 2,21 | - | - | 1,93 | - | 1,76 | - | - |
| 50%S | Massa inicial (g) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 60%S | Massa inicial (g) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 70%S | Massa inicial (g) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 80%S | Massa inicial (g) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 90%S | Massa inicial (g) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| | T | Umidade média (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | |

Nota: A: amostra

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 39: resultados de umidade no momento de 4,0 a 5,0 horas no secador experimental.

| ST no lodo | Parâmetros | Tempo decorrido de secagem | | | | | | | | |
|----------------|-------------------|----------------------------|---------|--------|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| | | 4,0 horas | | | 4,5 horas | | | 5,0 horas | | |
| | | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 |
| CENT. 16%ST | Massa inicial (g) | 6,2585 | 4,5645 | 2,9192 | 3,7491 | 3,0734 | 3,5542 | 3,6317 | 3,7981 | 3,4872 |
| | Umidade (%) | 9,2900 | 7,7300 | 6,6900 | 2,5300 | 2,2600 | 2,3100 | 1,9500 | 1,7400 | 1,8600 |
| | Umidade média (%) | 8,22 | | | 2,37 | | | 1,85 | | |
| 20%ST | Massa inicial (g) | 3,9037 | 4,276 | 3,2075 | - | - | - | 5,3397 | 4,3419 | 3,5039 |
| | Umidade (%) | 4,6800 | 10,7200 | 8,9100 | - | - | - | 3,5700 | 2,9400 | 2,8500 |
| | Umidade média (%) | 8,14 | | | - | | | 3,17 | | |
| 30%ST | Massa inicial (g) | 6,2437 | 5,2982 | 4,2082 | 6,5995 | 5,2287 | 4,7364 | 5,101 | 4,486 | 4,2618 |
| | Umidade (%) | 1,8500 | 1,5600 | 1,7100 | 1,6800 | 1,6500 | 1,6500 | 1,8100 | 1,5400 | 1,7400 |
| | Umidade média (%) | 1,72 | | | 1,66 | | | 1,70 | | |
| 40%ST | Massa inicial (g) | 3,6598 | 3,4566 | 5,0483 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | 1,8800 | 1,9700 | 1,7500 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 1,85 | | | - | | | - | | |
| 50%ST | Massa inicial (g) | 6,5869 | 5,4716 | 5,5713 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | 1,3000 | 1,2200 | 1,1500 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 1,23 | | | - | | | - | | |
| 60%ST | Massa inicial (g) | 6,2993 | 5,7642 | 6,085 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | 1,1800 | 0,9600 | 1,0400 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 1,06 | | | - | | | - | | |
| 70%ST | Massa inicial (g) | 6,2803 | 6,8304 | 6,5669 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | 1,2500 | 1,2300 | 1,1700 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 1,22 | | | - | | | - | | |
| 80%ST | Massa inicial (g) | 4,8716 | 5,5178 | 5,8131 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | 1,2700 | 1,0600 | 1,1900 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 1,17 | | | - | | | - | | |
| 90%ST | Massa inicial (g) | 5,4482 | 4,7409 | 4,739 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade (%) | 1,1900 | 1,0600 | 1,0900 | - | - | - | - | - | - |
| | Umidade média (%) | 1,12 | | | - | | | - | | |

Nota: A: amostra

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 40: resultados de umidade no momento de 6,0 a 12,0 horas no secador experimental.

| ST no lodo | Parâmetros | Tempo decorrido de secagem | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 6,0 horas | | | 8,0 horas | | | 10,0 horas | | | 12,0 horas | | |
| | | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 |
| CENT 16%ST | Massa inicial (g) | 4,53 06 | 3,60 27 | 3,97 47 | 3,92 97 | 4,20 18 | 4,07 66 | 4,01 84 | 3,75 17 | 4,10 75 | 4,35 52 | 3,20 16 | 4,09 75 |
| | Umidade (%) | 1,58 00 | 1,30 00 | 1,40 00 | 1,30 00 | 1,28 00 | 1,28 00 | 1,44 00 | 1,42 00 | 1,43 00 | 1,76 00 | 1,42 00 | 1,37 00 |
| | Umidade média (%) | 1,44 | | | 1,29 | | | 1,43 | | | 1,53 | | |
| 20%ST | Massa inicial (g) | 4,58 27 | 4,78 85 | 4,19 84 | 5,71 16 | 4,93 45 | 4,60 48 | 6,07 06 | 5,33 93 | 4,73 94 | 4,46 35 | 4,71 6 | 4,37 91 |
| | Umidade (%) | 2,20 00 | 1,98 00 | 2,00 00 | 1,33 00 | 1,45 00 | 1,41 00 | 1,38 00 | 1,24 00 | 1,51 00 | 1,48 00 | 1,31 00 | 1,18 00 |
| | Umidade média (%) | 2,06 | | | 1,39 | | | 1,37 | | | 1,32 | | |
| 30%ST | Massa inicial (g) | 5,83 49 | 5,36 38 | 4,89 19 | 5,84 93 | 5,68 19 | 5,44 57 | 5,26 7 | 5,53 21 | 5,28 35 | 5,89 85 | 5,96 2 | 5,57 27 |
| | Umidade (%) | 1,39 00 | 1,28 00 | 1,40 00 | 1,11 00 | 0,99 00 | 0,99 00 | 0,95 00 | 0,93 00 | 0,97 00 | 0,89 00 | 0,79 00 | 0,84 00 |
| | Umidade média (%) | 1,36 | | | 1,03 | | | 0,95 | | | 0,84 | | |
| 40%ST | Massa inicial (g) | 5,74 4 | 5,94 62 | 5,41 81 | 6,04 51 | 5,35 74 | 5,20 33 | 6,55 64 | 5,87 15 | 5,72 53 | 5,08 31 | 5,22 09 | 5,53 52 |
| | Umidade (%) | 1,19 00 | 1,07 00 | 1,14 00 | 0,93 00 | 0,92 00 | 0,89 00 | 0,97 00 | 1,00 00 | 1,00 00 | 0,91 00 | 0,82 00 | 0,92 00 |
| | Umidade média (%) | 1,13 | | | 0,91 | | | 0,99 | | | 0,88 | | |
| 50%ST | Massa inicial (g) | 6,39 33 | 6,43 91 | 5,69 86 | 6,53 21 | 6,41 82 | 5,96 19 | 6,75 46 | 6,80 85 | 6,79 44 | 6,50 13 | 6,53 14 | 6,16 93 |
| | Umidade (%) | 0,93 00 | 0,85 00 | 0,87 00 | 0,87 00 | 0,83 00 | 0,85 00 | 0,94 00 | 0,81 00 | 0,86 00 | 0,91 00 | 0,92 00 | 1,02 00 |
| | Umidade média (%) | 0,88 | | | 0,85 | | | 0,87 | | | 0,95 | | |
| 60%ST | Massa inicial (g) | 6,98 26 | 6,23 54 | 6,48 47 | 6,48 63 | 6,35 55 | 5,85 68 | 6,77 45 | 6,80 58 | 5,84 | 6,72 07 | 6,48 41 | 6,16 44 |
| | Umidade (%) | 1,20 00 | 1,12 00 | 1,09 00 | 0,85 00 | 0,92 00 | 0,91 00 | 0,97 00 | 0,90 00 | 0,94 00 | 0,99 00 | 0,89 00 | 0,90 00 |
| | Umidade média (%) | 1,14 | | | 0,89 | | | 0,94 | | | 0,93 | | |
| 70%ST | Massa inicial (g) | 6,13 1 | 6,16 7 | 6,33 7 | 6,59 24 | 6,51 3 | 6,45 33 | 6,94 38 | 6,92 78 | 6,92 93 | 6,63 89 | 4,71 04 | 6,37 8 |
| | Umidade (%) | 1,21 00 | 1,08 00 | 1,08 00 | 0,96 00 | 0,90 00 | 0,97 00 | 1,30 00 | 1,24 00 | 1,29 00 | 0,94 00 | 1,01 00 | 0,81 00 |
| | Umidade média (%) | 1,12 | | | 0,94 | | | 1,28 | | | 0,91 | | |
| 80%ST | Massa inicial (g) | 5,04 92 | 5,91 45 | 6,20 77 | 6,31 43 | 5,50 87 | 6,10 88 | 5,84 13 | 4,82 47 | 5,82 89 | 5,51 75 | 6,44 93 | 5,77 78 |
| | Umidade (%) | 1,24 00 | 1,00 00 | 1,14 00 | 1,08 00 | 0,98 00 | 1,13 00 | 1,12 00 | 1,05 00 | 1,08 00 | 1,12 00 | 0,96 00 | 1,09 00 |
| | Umidade média (%) | 1,12 | | | 1,07 | | | 1,09 | | | 1,05 | | |
| 90%ST | Massa inicial (g) | 5,51 17 | 6,02 99 | 6,50 3 | 5,71 33 | 5,16 24 | 5,64 7 | 6,65 13 | 6,84 02 | 6,23 49 | 6,78 24 | 6,04 09 | 6,11 82 |
| | Umidade (%) | 1,03 00 | 0,87 00 | 0,94 00 | 0,98 00 | 1,04 00 | 0,91 00 | 0,91 00 | 0,85 00 | 0,76 00 | 0,78 00 | 0,74 00 | 0,71 00 |
| | Umidade média (%) | 0,94 | | | 0,97 | | | 0,84 | | | 0,74 | | |

Nota: A: amostra

Fonte: produção do próprio autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULHAMED, A. J., et al. 2018. **Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 822-831.

AL-DAWERY, S. 2016 **Effects of suspended solid and polyelectrolyte on settling and rheological properties of municipal activated sludge.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4 (4), 4731-4743. doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.009

ALMEIDA, I.A. 2007. **Demandas tecnológicas em meio ambiente e de empresas de saneamento.** Inovatec, São Paulo, 2007.

ANDREOLI, C. V. **Biossólidos: Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: Ed. ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), 2006. 398 p.

ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P. **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto.** Curitiba: SANEPAR, 2000, p.80.

ANDREOLI, C.V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Projeto PROSAB 2. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p.

APHA – American Public Health Association. **Standart Methods for the Examination of Water and WasteWater.** 22 th Edition, Washington, 2012.

ARCE, E. B. M. **Pretratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica de lodos residuales para la producción de biosólidos clase A.** Tesis (Maestría en Ingeniería Ambiental) – Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009. 64 p.

ARLABOSSE, P; CHAVEZ, S; PREVOT C. **Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer.** *Brazilian Journal of Chemical Engineering* – vol.22 n° 2, São Paulo - Apr/June 2005.

ARORA, S.; KAZMI, A. **The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment.** *Water Research*, 74, (2015) p. 88-99.

ASPE – Agência de serviços públicos de energia do estado do Espírito Santo. **A energia solar no Espírito Santo.** Vitória, Espírito Santo. 2013, 120 p. Acessado em 25 de abril de 2017. Disponível em: <arsp.es.gov.br/Media/arsi/Energia/Estudos%20Energ%C3%A9ticos/2013/EnergiaSolarES.pdf>.

BAHAROON, D.A.. RAHMAN, A.; OMAR, W.Z.W.; FADHL, S.O. 2015. **Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 996-1027. doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.008

BARES, M. E. **Digestão e Higienização de Lodo de Estação de Tratamento de Esgotos Através de Processo Bifásico com Pré-Tratamento Térmico.** Universidade Federal do Paraná. Dissertação. Curitiba, Paraná. 2010. 134 p.

BELLO, E., TZIVANIDIS, C., TSIMPOUKIS, D. 2017. **Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned absorbers.** *Applied Energy*, 205, 540-561.

- BENAMOUN, L. 2012. **Solar drying of wastewater sludge: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (1), 1061-1073. doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.005
- BENAMOUN, L., ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. **Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge,** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, 2013, p. 29-43.
- BIANCHINI, A.; BONFIGLIOLI, L.; PELLEGRINI, M.; SACCANI, C. 2015. **Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant.** *Waste Management*, 42, 159-165. doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.020
- BORGES, Fabricio. SELLIN, Noeli. MEDEIROS, Sandra Helena Westrupp. **CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES SANITÁRIO E INDUSTRIAL COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA.** *Ciência & Engenharia*, v. 17, n. 1/2, p. 27 – 32, jan–dez, 2008. ISSN 0103-944X.
- BRAJA, M, D. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** Tradução da 7ª ed. Americana, São Paulo. 2011, 606p.
- BRASIL. 2017. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Base de dados do comércio exterior brasileiro.** Acessado em: 05 de novembro de 2017. Disponível em: <HTFp://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/base-de-dados-do-comercio-exterior-brasileiro-arquivos-para-download>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA no 375. **Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 ago 2006.
- BUX, M.; BAUMANN, R.; QUADT, S.; PINNEKAMP, J.; MUHLBAUER, W.; **VOLUME REDUCTION AND BIOLOGICAL STABILIZATION OF SLUDGE IN SMALL SEWAGE PLANTS BY SOLAR DRYING,** *DRYING TECHNOLOGY*, vol. 20 (4&5), 2002, p 829– 837.
- CAPIZZI-BANAS, S.; DELOGE, M.; REMY, M.; SCHWARTZBROD, J. **Liming as an advanced treatment for sludge sanitisation: helminth eggs elimination – Ascaris eggs as model.** *Water Research*, v.38, n.14-15, p.3251-3258, 2004.
- ÇENGEL, Y.A. 2012. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática.** 4ª edição, Editora AMGH, Porto Alegre, 904p.
- CERQUEIRA, Sérgio Augusto Araújo da Gama. **Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas.** Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 1999. 137 p.
- CESAN – COMPANHIA ESPÍRITO SANTENSE DE SANEAMENTO BÁSICO. **Relatórios de Monitoramento e Desempenho:** Monitoramento físico-químico e microbiológico do sistema Araçás. Vitória: CESAN, 2015. CD-ROM.
- CHERNICHARO, C. A. L; BORGES, E. S. M; GODINHO, V. M; BEJAR, D. O. **Tratamento Térmico de Lodo Anaeróbico com Utilização do Biogás gerado em Reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo.** *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*: v.14, n.3, jul/set 2009. p. 337 - 346.
- COLLARD, M.; TEYCHENÉ, B.; LEMÉE, L. 2017. **Comparison of three different sewage sludges and their respective drying processes: Solar, thermal and reed beds - Impact on**

the characteristics of organic matter. *Journal of Environmental Management*, 203, 2, 760-767. doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.070

CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, A.J. **Biosolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content** - *Sci. agric.* (Piracicaba, Braz.) vol.62 no.3 Piracicaba May/June 2005 - *On-line version* ISSN 1678-992X

CORREA, W. S. C. **Comportamento dos elementos climáticos, temperatura e precipitação, no município de Vitória (ES) no período de 1978 a 2007.** Monografia (Graduação do Curso de Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011.

COSCIONE, A. R.; CEOLATO, L. C. **Resíduos de origem orgânica: o lodo de esgoto doméstico.** In: ANDRADE, J. C.; de ABREU, M. F. (editores), *Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais*, Editora IAC, Campinas, 2006, pp. 33-45.

COTA-ESPERICUETA, A. D; PONCE-CORRAL, C. **Eliminación de Bacterias Patógenas em Lodos Residuales Durante El Secado Solar.** *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24, 2008. p. 161-170.

DANISH, M., JING, H.; PIN, Z.; ZIYANG, L.; PANSHENG, Q. 2016. **A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of CaO and NaClO.** *Applied Thermal Engineering*, 106, 141-152. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.191

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 2002, 151 p.

DAVID, A.C.; TSUTIYA, M.T. **SECAGEM TÉRMICA DE BIODSÓLIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, Paraíba. 2001. 7 p.

DENG, S.; et al., **Experimental and modeling study of the long cylindrical oily sludge drying process,** *Applied Thermal Engineering*, vol. 91, 2015, p. 354-362. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.054

DENG, W.Y. et al. 2017. **Effect of calcium oxide (CaO) and sawdust on adhesion and cohesion characteristics of sewage sludge under agitated and non-agitated drying conditions.** *Water Research*, 110, 150-160. doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.001

DIENER, S. et al. 2014. **A value proposition: Resource recovery from faecal sludge—Can it be the driver for improved sanitation?.** *Resources, Conservation and Recycling*, 88, 32-38. doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.04.005

DINCER, I.; SAHIN, A.Z., **A new model for thermodynamic analysis of a drying process,** *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47 (4), 2004, p. 645–52.

DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. 2013, **Solar Engineering of Thermal Process**, 4th.Ed., Wiley. 910p.

EIA – Energy Information Administration. 2011. **Concentrating solar power technologies offer utility-scale power production.** Acessado em: 03 de abril de 2017. Disponível em: <HTFps://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=530>.

EPA – U.S. Environmental Protection Agency. **Environmental Regulations and Technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge(including Domestic Septage) under 40 CFR part 503.** revised in 2003, 186p.

- ESPARGILLIERE, H. et al. 2017. **Applicability of CSP solar fields to the dry cooling of related thermodynamic cycles.** *Applied Thermal Engineering*, 127, 319-329. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.028
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. et al. 2015. **A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat.** *Journal of Cleaner Production*, 89, 272-285.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. et al. 2014. **Study of different cleaning methods for solar reflectors used in CSP plants.** *Energy Procedia*, 49, 80-89.
- 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.** 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais. Joinville, set., 2003.
- GAUCHÉ, P. et al. 2017. **System value and progress of CSP.** *Solar Energy*, 152, 106-139. doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.072
- GILL, R.S.; SINGH, S.; PAL SINGH, P., **Solar Dryer for Powder Drying,** *Drying Technology*, vol. 30, 2012, p. 1666–1673.
- GOLMAN, B.; JULKLANG, W., **Simulation of exhaust gas heat recovery from a spray dryer,** *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, 2014, p. 899-913.
- GOMES, H.P. **Eficiência Hidráulica e Energética no Saneamento: Análise econômica de projetos.** Editora UFPB, João Pessoa, 2009. 141p.
- HAMMER, M.J. **Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotos.** LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 1979. 563 p.
- HARALAMBOPOULOS, D.A.; BISKOS, G.; HALVADAKIS, C., LEKKAS, T.D., **Dewatering of wastewater sludge through a solar still,** *Renewable Energy*, vol. 26, 2002, p. 247–256.
- HUANG, Y.W., CHEN, M.Q., JIA, L. **Assessment on thermal behavior of municipal sewage sludge thin-layer during hot air forced convective drying,** *Applied Thermal Engineering*, 2015.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação.** Acessado em: 01 de novembro de 2017. Disponível em: <HTFps://ww2.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>.
- IEA – International Energy Agency. 2014. **Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity.** 52p. Acessado em: 03 de abril de 2017. Disponível em: <HTFps://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmapsolarthermalelectricity_2014edition.pdf>.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** Editora LTC, 7ª edição, 2015, 672p.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro da energia solar.** 2ed. Acessado em 19 de setembro de 2018. Disponível em: <HTFp://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Laboratório, Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia.** Acessado em 27 de abril de 2019. Disponível em: <HTFp://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_ES.html#mod>.

- JIANG, L. et al. 2014. **Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet.** *Bioresource Technology*, 166, 435-443.
- JIMÉNEZ, B. **Helminth ova control in sludge: a review.** *Water Science and Technology*, v.56, n.9, p.147-155, 2007.
- JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** Rio de Janeiro: ABES, 1995. 3ª Edição. 683 p.
- JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** Rio de Janeiro: ABES, 2011. 6ª Edição. 969 p.
- JU, X. et al. 2017. **A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161, 305-327. doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.004
- KALOGIROU, S.A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems.** 2ª Edition. Oxford, Elsevier, 2014. 819p.
- KOKALJ, F., ARBITER, B. and SAMEC, N., 2017. **Sewage sludge gasification as an alternative energy storage model.** *Energy Conversion and Management*, Vol. 149 (1), p. 738-747.
- KUEHN, T. H.; RAMSEY, J. W.; THRELKELD, J. L. **Thermal Environmental Engineering.** 3 Edition, Pearson, New Jersey, 1998. 752 p.
- KURAVI, S. et al. 2013. **Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants.** *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, p.285-319. dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001
- PRAJITNO, F.; ARBITER, B.; SAMEC, N. 2017. **Sewage sludge gasification as an alternative energy storage model.** *Energy Conversion and Management*, 149, 738-747. doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.076
- LEE, E.S.H.; SANTOS, F.J.. **CARACTERIZAÇÃO DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) E ESTUDO SOBRE SEU POTENCIAL ENERGÉTICO** – Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011.
- LEE, S.; WILCOX, J. 2017. **Behavior of mercury emitted from the combustion of coal and dried sewage sludge: The effect of unburned carbon, Cl, Cu and Fe.** *Fuel*, 203, 749-756. doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.104
- LÉONARD, A. et al. 2008. **Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed.** *Water Research*. 42, (10-11), 2671-2677. doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.020
- LI, H.; et al., **Characteristics and model of sludge adhesion during thermal drying,** *Environmental Technology*, vol. 13, 2013, p. 807–812.
- LIANG, C., DAS, K.C., MCCLENDON, R.W., **The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend,** *Bioresource Technology*, vol. 86, 2003 p. 131–137.
- LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.** Universidade Federal de Minas Gerais, Tese. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011. 184 p.

- LONGO, S. et al. 2016. **Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement.** *Applied Energy*, 179, 1251-1268. doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043
- LOZANO, M.A., VALERO, A. 1986. **Determinacion de la exergia para sustancias de interes industrial.** *Ingenieria Química*, 119-128.
- LUBOSCHIK, U., **SOLAR SLUDGE DRYING - BASED ON THE IST PROCESS**, *Renewable Energy*, vol. 16, 1999, p. 785-788.
- MACHADO, L. L. N. **Aspectos Técnicos Relacionados à Geração de Energia Elétrica a Partir do Lodo de Esgoto.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação. Rio de Janeiro, 2011. 107 p.
- MALDONADO, A. C. D.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R.. **SECAGEM DE LODO DE REATOR ANAERÓBIO EM SECADOR ROTATIVO COM RECHEIO DE INERTES – FAZU** em Revista, Uberaba, n. 6, p. 53-82, 2009. Engenharia de Alimentos/Food Engineering.
- MAWIOO. P.M. et al. 2017. **A pilot-scale microwave technology for sludge sanitization and drying.** *Science of The Total Environment*, 601-602, 1437-1448. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.004
- METCALF, T.; EDDY, G. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5ª Edição, New York: McGraw Hill, 2016. 2008p.
- METCALF, EDDY. **Wastewater engineering: Treatment and Reuse.** 4ª ed. Metcalf & Eddy Inc. New York: Mcgraw-Hill, 2003. 1819 p.
- MORAN, Michael. J; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 819 p.
- MÜLLER, C.; RAU, C.; SCHRÜFER, J. **CSP in non-electrical application.** *Projeto Energia Heliotérmica*, 2014, Brasília, 28p.
- MURTHY, M.V., **A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, 2009, p. 835–844.
- MUSTAFÁ, Larissa. et al. **Influência da temperatura da chapinha na fibra capilar.** 63ª Reunião Anual da SBPC, Goiânia, Goiás. 2011. Acessado em: fevereiro de 2019. Disponível em: <HTFp://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/resumos/resumos/5609.htm>.
- NREL - National Renewable Energy Laboratory. 2001. **Concentrating Solar Power: Energy from Mirrors.** Acessado em: 03 de abril de 2017. Disponível em: <HTFps://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28751.pdf>.
- NUVOLARI, Ariovaldo. **Esgoto Sanitário: Coleta, Transporte, Tratamento e Reuso Agrícola.** 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2011. 565 p.
- OLIVEIRA, M.T.R.; BERBERT, P.A.; MARTINAZZO, A.P. **Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip.** *Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu*, v.15, n.1, p.1-12, 2013.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. 2016a. **Assembleia Geral da ONU reconhece saneamento como direito humano distinto do direito à água potável.** Acessado em: 17 de agosto de 2017. Disponível em:<HTFps://nacoesunidas.org/assembleia-geral-da-onu-reconhece-saneamento-como-direito-humano-distinto-do-direito-a-agua-potavel/>.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. 2016b. **Privatização do saneamento já se mostrou inadequada em muitos países, diz relator da ONU**. Acessado em: 17 de agosto de 2017. Disponível em: <HTFps://nacoesunidas.org/privatizacao-do-saneamento-ja-se-mostrou-inadequada-em-muitos-paises-diz-relator-da-onu/>.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. 2017. **ONU: 4,5 bilhões de pessoas não dispõem de saneamento seguro no mundo**. Acessado em: 17 de agosto de 2017. Disponível em <HTFps://nacoesunidas.org/onu-45-bilhoes-de-pessoas-nao-dispoem-de-saneamento-seguro-no-mundo/>.

ORTEGA-DELGADO, B.; GÁRCIA-RODRIGUES, L.; ALARCÓN-PADILHA, D.C. 2016. **Thermoeconomic comparison of integrating seawater desalination processes in a concentrating solar power plant of 5 MW_e**. *Desalination*, 392, 102-117. doi.org/10.1016/j.desal.2016.03.016

OUTWATER, A.B. **Reuse of sludge and minor wastewater residuals**. Florida, EUA. Editora Boca Raton, 1994. 179 p.

PASSAMANI, F.R.F.; KELLER, R.; GONÇALVES, R.F. **Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso**. In: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud. México, D.F., FEMISCA, 2002, p.1-6.

PECSON, B.M., et al., **The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of Ascaris eggs in sewage sludge**, *Water Research*, vol. 41, 2007, p. 2893 – 2902.

PEETERS, B., **Mechanical dewatering and thermal drying of sludge in a Single Device**, *Drying Technology*, vol. 28, 2010, p. 454–459.

PETERLI, Z. 2015. **MODELAGEM TERMODINÂMICA DA SECAGEM DE LODO COM APROVEITAMENTO DA ENERGIA TÉRMICA DE BAIXA TEMPERATURA DOS SOPRADORES DE AR DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO DO TIPO LODO ATIVADO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2015. 210 p.

PETROLLESE, M.; COCCO, D.; CAU, G.; COGLIANI, E. 2017. **Comparison of three different approaches for the optimization of the CSP plant scheduling**. *Solar Energy*, 150, 463-476. doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.060

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H.. **Manual de Engenharia Química**. 5ª ed. UFRJ, editora Guanabara Dois, 1980.

PROCEL – PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de resultados do Procel 2005 - ano base 2004**. Rio de Janeiro, 2011b.

PROCEL SANEAR – **PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO AMBIENTAL**. Disponível em: <HTFp://www.eletronbras.com/ELB/main.asp?TeamID=%7B17B0348E-BC5F-44B2-8FB4-6A9BEEF33020%7D#>. Acesso em: 11 out. 2014.

REYES, A.M.M.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. Adecuación y transformación de la biomasa como combustible. Capítulo 3. **Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad**. MARTINEZ, J.M.R.; LORA; E.E.S. (Editores), 2014, *La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía*, Bogotá, 332p.

ROSA, André Pereira. et al. **Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira)**. Eng Sanit Ambient, v.21, n.2. abr/jun, 2016. p.315-328. Acessado em maio de 2017. Disponível em: <HTFp://www.scielo.br/pdf/esa/v21n2/1809-4457-esa-S1413_41522016123321.pdf>.

SALIHOGU, N.K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. 2006. **Solar drying in sludge management in Turkey**. Renewable Energy, 32, 1661-1675.

SAVSANI, M., MOTWANI, K., PATEL, J. 2017. **MEDIUM TEMPERATURE APPLICATION OF PARABOLIC TROUGH COLLECTOR FOR INDUSTRIAL PROCESS HEATING – REVIEW**. 6th International Conference on Recent Trends in Engineering, Science&Management, v. 5, Punjab. p.1171-1181.

SEGHES KÉPPEL, **Manual de Operação e Manutenção o Sistema UNITANK**. Vitória, 2003. 1298 p.

SERENOTTI, Fernando. **A avaliação da secagem para redução de volume e inativação de microrganismos em lodo de etc**. Campinas, São Paulo. 203 p. [s.n.], 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

SHARMA, A., CHEN, C.R., LAN, N.V., **Solar-energy drying systems: a review**, Renewable Sustainable Energy Rev. vol. 13 (6e7), 2009, p. 1185e1210.

SHARMA, A. K. et al. 2017. **Solar industrial process heating: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 124-137. doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.079

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. 2009. **Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente**. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1535-1545.

SIMÕES MOREIRA, J. R. **Fundamentos e aplicações da Psicrometria**. Ed. RPA, São Paulo, 194p.

SIMONETI, Marilza de Fátima. **Inativação térmica de ovos de Helmintos em água e em biossólidos: cinética em reator batelada e modelagem matemática em reator tubular**. São Paulo, 2006. 251 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

SOARES, Milton; SOUZA, Samuel N. M., HALMEMAN, Maria C. R., FRACARO, Guilherme DE P. M. - **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO DE TROCADOR DE CALOR PARA CLIMATIZAÇÃO DE CONSTRUÇÕES AGROINDUSTRIAIS** – Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.3, p.411-417, maio/jun. 2011.

SOLAR THERMAL ENERGY, Industry Report. 2017. **Technical Challenges**. 5-6. Acessado em: 10 de maio de 2017. Disponível em: <: HTFp://www.solar-thermal.com/solar-thermal.pdf>.

SOLWATT. Acessado em: 15 de fevereiro de 2019. Disponível em: < HTFps://solwatt.eu/project-ambitions/>.

STASTA, P., et al., **Thermal processing of sewage sludge**, Applied Thermal Engineering, vol. 26, 2006, p.1420–1426.

STICKLAND, A.D. 2015. **Compressional rheology: A tool for understanding compressibility effects in sludge dewatering**. *Water Research*, 82, 37-46. doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.004

- TAŃCZUK, M.; KOSTOWSKI, W.; KARAŚ, M. 2016. **Applying waste heat recovery system in a sewage sludge dryer – A technical and economic optimization.** *Energy Conversion and Management*, 125, 121-132. doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.064
- TUNCAL, T., USLU, O., **A Review of Dehydration of Various Industrial Sludges**, *Drying Technology*, vol. 32, 2014, p. 1642-1654.
- VALENZUELA, C.; MATA-TORRES, C.; CARDEMIL, J.M.; ESCOBAR, R.A. 2017. **CSP + PV hybrid solar plants for cogeneration of energy and water in northern Chile.** *Solar Energy*, 157, 713-726. doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.081
- VAN HAANDEL, Adrianus. **POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LODO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO.** REVISTA AIDIS, de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. Vol. 2, No. 1, 125-142, 2009. ISSN 0718-378X.
- VAN HAANDEL. A. C; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regioes de clima quente.** Campina Grande, 1994.
- VAN HAANDEL, Adrianus; MARAIS, Gerrit. **O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado: Teoria e Aplicação para Projetos e Operação.** Campina Grande: [s.n.], 1999. 488 p.
- VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica.** Editora Edgard Blucher, 6ª Edição, Michigan, 2003, 577p.
- VERDA, V., SERRA, L. VALERO, A., **The Effects of the Control System on the Thermo-economic Diagnosis of a Power Plant.** *Energy* Vol. 29, 2004, p. 331- 359.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2014. 470p.
- VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions.** IWA Publishing, London, 2005. 1452 p.
- WANG, L.; LI, A.; CHANG, Y. 2017. **Relationship between enhanced dewaterability and structural properties of hydrothermal sludge after hydrothermal treatment of excess sludge.** *Water Research*, 112, 72-82. doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.034
- WENG, H. DAI, Z.; JI, Z.; GAO, C.; LIU, C. 2015. **Release and control of hydrogen sulfide during sludge thermal drying.** *Journal of Hazardous Materials*, 296, 61-67. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.037
- WERLE, S., WILK, R.K., **A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective**, *Renewable Energy*, vol. 35, 2010, p.1914–1919.
- ZHANG, X.Y.; CHEN, M.Q.; HUANG, Y.W.; XUE, F. 2016. **Isothermal hot air drying behavior of municipal sewage sludge briquettes coupled with lignite additive.** *Fuel*, 171 (1), 108-115. doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.052
- ZHAO, F.; CHENG, D. 2017. **Changes in pore size distribution inside sludge under various ultrasonic conditions.** *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 390-401. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.025
- ZHENXING, J.D.E.C. 2017. **PLG Series Continuous Disc Plate Dryer.** Acessado em: 03 de abril de 2017. Disponível em: <HTFp://www.drying-equipment.cn/discplatedryer/15>.
- ZHU, F.; ZHANG, Z.; JIANG, H.; ZHAO, L. 2012. **The study of the thermal drying efficiency of sewage sludge.** *Procedia Environmental Sciences*, 16, 363-367. doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.052