

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

ZUDIVAN PETERLI

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

VITÓRIA

2015

ZUDIVAN PETERLI

**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 apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração de Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. José Joaquim C. S. Santos

VITORIA

2015

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

P478m Peterli, Zudivan, 1988-
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 / Zudivan Peterli. – 2015.
210 f. : il.

Orientador: Ricardo Franci Gonçalves.
Coorientador: José Joaquim Conceição Soares Santos.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Lodo residual – Secagem. 2. Secagem por congelamento. 3. Termodinâmica – Modelos. 4. Águas residuais – Purificação – Processo de lodo ativado. 5. Permutadores térmicos. I. Gonçalves, Ricardo Franci. II. Santos, José Joaquim Conceição Soares. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro que o presente trabalho pode ser parcialmente utilizado para os fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científico, desde que sejam garantidas as corretas referências e direitos autorais as fontes mencionadas e ao autor da pesquisa.

Vitória, _____.

ZUDIVAN PETERLI

Em memória a Rodrigo Cebim e as demais almas que continuam puras e alegres, iguais às crianças.

*Não vejo líquidos,
Não vejo ventos,
Não vejo árvores.
Vejo energia escoando e dissipando,
Vejo o fluir do calor pelas camadas,
Vejo a materialização da energia que antes era livre, agora é aprisionada.*

ZUDIVAN PETERLI

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Ricardo Franci Gonçalves, pela confiança no nosso trabalho, além da honestidade e humildade que sempre demonstrou durante as nossas conversas, mostrando as inúmeras possibilidades para a construção do futuro.

Ao meu coorientador, Dr. José Joaquim C. S. Santos, pela parceria, dedicação e disposição que sempre apresentou durante a pesquisa.

A minha orientadora de graduação, Dr.^a Raquel Machado Borges, que desde o início me mostrava à conexão entre a energia e o saneamento, descrevendo um importante caminho a ser construído.

A Universidade Federal do Espírito Santo, representada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, pela oportunidade.

Aos professores e colegas de curso pelos ensinamentos, apoio e amizade durante esse período.

Aos meus pais, Otávio Peterli e Maria Darília Gava Peterli; irmãos Zilmar e Zilma Peterli; e demais familiares pela sólida base de criação que permitiram, além da obtenção de conhecimentos, a formação do meu caráter.

A minha nova família, Silvia e Mateus Louzada, pela paciência, amor e compreensão ao longo dos últimos anos.

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

Bezerra de Menezes

RESUMO

Os secadores mecânicos de lodo são equipamentos que permitem secar e higienizar elevadas taxas de lodo biológico e produzir um bio-sólido de considerável valor agregado, mas estão atrelados a elevados consumos de energia. Diante desta condição, somada ao fato que a energia é a segunda maior despesa para as empresas de saneamento básico e a mesma vem se tornando um dos grandes desafios para a humanidade alcançar a sustentabilidade. O presente estudo tem nos seus objetivos o desenvolvimento de um Modelo Termodinâmico de Secagem de Lodo (MTSL) para avaliar a viabilidade energética da secagem do lodo produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do tipo Lodo Ativado a partir do aproveitamento da energia térmica presente no ar dos sopradores do sistema de aeração da própria estação estudada, além de contribuir para o desenvolvimento conceitual da teoria da secagem e higienização térmica de lodos em baixas temperaturas. As condições modeladas foram para a produção de 9.657 kg.d^{-1} de lodo com teor médio de Sólidos Totais (ST) de 17,7% e 3 sopradores em operação no ano de 2014, enquanto a condição de projeto previu a produção de 28.904 kg.d^{-1} de lodo úmido com 25% de ST e 4 sopradores em operação. Os resultados mostraram que é possível: secar até 90% de ST com 80°C toda a produção de lodo do ano de 2014 ou 59% da produção de projeto; secar até 90% de ST com 60°C o valor de 78% da produção de lodo de projeto; secar até 90% de ST e 40°C toda a produção de lodo de projeto. O MTSL desenvolvido se mostrou consistente para avaliar a secagem de lodo biológico a partir do aproveitamento de energia térmica de baixa temperatura, destacando-se o uso de regenerador de calor para realizar o preaquecimento do lodo que entra no sistema a partir da energia térmica presente no ar de saída, alcançando ganhos médios de $27,89^{\circ}\text{C}$, enquanto o trocador de calor que realiza o aquecimento final do ar apresentou ganhos médios de $56,95^{\circ}\text{C}$, atingindo valores finais médios de $97,76^{\circ}\text{C}$. Para a umidade do ar, o aumento da capacidade de transferência de massa, com base no ar de referência, variou de 13.010% a 13.325% na entrada e de 302% a 1.049% na saída do reator.

Palavras-Chaves: Secagem de Lodo; Secagem em Baixas Temperaturas, Modelo Termodinâmico; Lodo Ativado; Sopradores de Ar.

ABSTRACT

The sludge mechanical dryers are devices that allow dry and sanitize high biological sludge rates and produce biosolid sludge with considerable added value, but they are linked to high consumption of energy. Given this condition, and the fact that energy is the second higher spending for basic sanitation companies and the same has been becoming one of the major challenges for humanity to achieve sustainability. This study has in its objectives the development of a Thermodynamic Model of a sludge drying (TMSD) to evaluate energy viability of drying the sludge produced in station Sewage Treatment (SST) of Activated Sludge type from the use the thermal energy present in the air in the blower aeration system of its own studied station, and contribute to the conceptual development of the theory of thermal drying and cleaning sludge at low temperatures. The conditions were modeled to produce 9,657 kg.d⁻¹ of sludge with an average grade of Total Solids (TS) of 17.7% and 3 blowers in operation in 2014, while the project status predicted production of 28,904 kg.d⁻¹ wet sludge with 25% TS and 4 blowers in operation. The results showed that it is possible: to dry to 90% of TS at 80°C throughout Sludge production of 2014 or 59% of the project output; dry up 90% of TS at 60°C the 78% of the project sludge production and; Dry up to 90% of TS and 40°C throughout the project sludge production. The TMSD showed consistently developed to assess the biological sludge drying from the thermal energy use of low temperature, highlighting the use of a heat regenerator to perform the preheating sludge that enters the system from the thermal energy present in air output, reaching average earnings of 27.89°C, while the heat exchanger conducting the final heating of the air showed average gains of 56.95°C, reaching final average values of 97.76°C. For the humidity, the increase mass transfer capacity based on the reference air varied from 13,010% to 13,325% at the entrance and 302% to 1,049% in the reactor output.

Keywords: Sludge Drying; Drying at low temperatures, Thermodynamic model; Activated Sludge; Air blowers

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de ETE de Lodo Ativado com fase de tratamento de lodo.	34
Figura 2 – Esquema ilustrativo das principais unidades da ETE Araçás.	35
Figura 3 – Esquema ilustrativo da forma da aeração por ar difuso e mecânica.	37
Figura 4 – Ilustração de um soprador centrífugo (a) e de lóbulos rotativos (b).....	38
Figura 5 – Esquema ilustrativo da compressão e descarga de ar pelos lóbulos dos sopradores.....	39
Figura 6 – Diagrama da variação de temperatura dos sopradores de deslocamento positivo da fabricante OMEL.	40
Figura 7 – Rota e incorporação da matéria orgânica afluyente nos sistemas de tratamento biológico aeróbio (esquerda) e anaeróbio (direita).	41
Figura 8 – Diferenciação bioquímica dos processos biológicos aeróbios e anaeróbios no aspecto lodo, efluente e matéria orgânica.	42
Figura 9 – Variação de volume e teores de sólidos totais e umidade do lodo.	44
Figura 10 – Curva da umidade de equilíbrio de diversos materiais em função da umidade relativa do ar ambiente.	46
Figura 11 – Secadores de bandejas múltiplas de contato indireto (esquerda) e direto (direita).....	51
Figura 12 – Fluxo de lodo numa planta de secagem por tambor rotativo.	52
Figura 13 – Fenômeno de transferência de Calor no estado 1 e transferência de Calor e Massa no estado 2 para uma mesma amostra de lodo.	56
Figura 14 – Ilustração da composição do ar úmido com relação as duas principais fases....	61
Figura 15 – Carta psicrométrica que correlaciona temperatura, entalpia e umidade absoluta na pressão de 1 atm.	63
Figura 16 – A esquerda um termômetro normal e a direita um termômetro adaptado para realizar a medição de bulbo úmido.....	66
Figura 17 – Comportamento do calor específico para gases comuns e considerados.	69
Figura 18 – Modelos de trocadores de calor. (a) Contato direto, (b) Duplo tubo em contracorrente, (c) Duplo tubo em escoamento paralelo e (d) Aletado de fluxo cruzado.....	76
Figura 19 – A esquerda a distribuição de temperatura em um trocador de calor real e a direita um idealizado com área superficial tendendo ao infinito.	78

Figura 20 – Efetividade em trocadores de calor contracorrente para diversos tipos de fluídos.	79
Figura 21 – A esquerda uma representação de um Ciclo de ar padrão Brayton regenerativo e a direita o diagrama das variações no fluído de trabalho ao longo do ciclo de operação... 80	80
Figura 22 – Esquema de um resfriador evaporativo e a representação do processo na carta psicrométrica..... 81	81
Figura 23 – Esquema didático de um saturador adiabático (a) e a representação de diagrama temperatura por volume específico do processo de saturação adiabática. 83	83
Figura 24 – Ilustração didática de uma torre de resfriamento por convecção forçada e em contracorrente com os principais fluxos de entrada e saída representados..... 84	84
Figura 25 – Ilustração didática da variação de entalpia numa compressão isentrópica e outra real..... 87	87
Figura 26 – Vista aérea da ETE Araçás, Vila Velha/ES, ano de 2015. 89	89
Figura 27 – Fluxograma das principais etapas do estudo e as respectivas ordens..... 91	91
Figura 28 – Galpão dos sopradores da ETE Araçás, local que foi realizado as medições de temperatura e termografia..... 94	94
Figura 29 – Imagem ilustrativa de câmera termográfica da marca Flir. 94	94
Figura 30 – Termômetro digital de haste com leitura na escala de graus Celsius. 95	95
Figura 31 – A esquerda a forma original na descarga de um soprador e a direita com a adaptação do termômetro para realizar a medição de temperatura do ar..... 96	96
Figura 32 – Detalhe da adaptação do termômetro na descarga do soprador de ar..... 96	96
Figura 33 – A esquerda o galpão dos sopradores e a direita o galpão de geração de lodo úmido pela centrifuga com a caçamba de armazenamento na ETE Araçás..... 99	99
Figura 34 – Fluxograma ilustrativo das etapas previstas no MTSL desenvolvido para o estudo..... 99	99
Figura 35 – Fluxograma didático dos submodelos e interações internas do MTSL 103	103
Figura 36 – Centrifuga ao fundo, caçamba de armazenamento e lodo centrifugado na ETE Araçás. 105	105
Figura 37 – Etapas envolvidas no submodelo de Balanço de Massa e Energia do Lodo Úmido. 106	106
Figura 38 – Etapas envolvidas no submodelo de Balanço de Massa e Energia do Ar de Secagem e Sopradores..... 113	113

Figura 39 – Etapas envolvidas no submodelo de Balanço de Massa e Energia do Lodo Misturado.....	128
Figura 40 – Fluxos de entrada e saída do reator de secagem de lodo deste submodelo....	133
Figura 41 – Fluxograma representando os testes sobre o ar de secagem e o lodo no cenário 1.....	140
Figura 42 – Testes de cenário para a condição de projeto da ETE Araçás.....	142
Figura 43 – Conjunto motor soprador SO-01/E durante uma manutenção corretiva na ETE Araçás.....	144
Figura 44 – Na seqüência da direita para a esquerda, barrilete, registros e válvulas, conjuntos motores sopradores da ETE Araçás.....	145
Figura 45 – Parte interna do reator de aeração “C” da ETE Araçás durante um período de manutenção corretiva com destaque para os difusores de ar instalados no fundo.....	145
Figura 46 – Termografia da descarga e barrilete com o SO-01/A operando em plena carga.....	147
Figura 47 – Descarga e barrilete do SO-01/A em operação plena.....	148
Figura 48 – Termografia da superfície da válvula de segurança do SO-01/A que operava em plena carga.....	148
Figura 49 – Termografia do início da tubulação tronco de distribuição de ar que sai do galpão dos sopradores.....	149
Figura 50 – Distribuição das temperaturas monitoradas no ar ambiente do galpão e ar na descarga do soprador SO-01/A da ETE Araçás.....	150
Figura 51 – Diagrama da variação de temperatura dos sopradores de deslocamento positivo da fabricante OMEL.....	152
Figura 52 – Fluxograma das etapas de tratamento que o lodo é submetido até a formação da torta de lodo úmido pela centrifuga.....	154
Figura 53 – Polígono a esquerda delimita o digestor e adensadores de lodo, enquanto o polígono a direita representa o galpão de centrifugação e a caçamba de armazenamento de lodo úmido.....	154
Figura 54 – Caracterização das frações do lodo produzido na ETE Araçás em 2014.....	156
Figura 55 – Variação do ar na saída do reator em função da sua variação de vazão – valores fixados para o lodo na saída em 90% de ST e 80°C, além de 3 sopradores em operação no cenário 1.....	159
Figura 56 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação de vazão de ar – valores fixados para o lodo na saída do reator em 90% de ST e 80°C, além de 3 sopradores operando no cenário 1.....	160

Figura 57 – Variação da entalpia e taxa de energia do ar na saída do reator em função da vazão – valores fixados do lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 3 sopradores no cenário 1.....	161
Figura 58 – Variação da temperatura do ar em função da sua própria vazão – valores fixados do lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 3 sopradores operando no cenário 1.	161
Figura 59 – Variação das propriedades do ar no ponto ótimo termodinâmico ao longo do MTSL no cenário 1 – fixado na saída do reator o ar em 6,51 kg.s ⁻¹ e o lodo em 90% de ST e 80°C.....	162
Figura 60 - Variação das propriedades do lodo no ponto ótimo termodinâmico ao longo do MTSL no cenário 1 – fixado na saída do reator o ar em 6,51 kg.s ⁻¹ e o lodo em 90% de ST e 80°C.....	163
Figura 61 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da vazão de ar – valores fixados do lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 4 sopradores em operação no cenário 2.....	165
Figura 62 – Variações inconsistentes do ar e do lodo no reator em função da variação da vazão de ar – fixado o lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 4 sopradores operando no cenário 2.....	166
Figura 63 – Variação do ar na saída do reator em função da variação da fração de lodo – fixada no cenário 3, na saída do reator, o lodo com 90% ST e 80°C, vazão de ar de 8,70 kg.s ⁻¹ e 4 sopradores.	167
Figura 64 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da fração de lodo – fixada no cenário 3 na saída do reator o lodo com 90% ST e 80°C, vazão de ar de 8,70 kg.s ⁻¹ e 4 sopradores.	167
Figura 65 – Variação do ar na saída do reator em função da variação da vazão – fixada no cenário 3, na saída do reator, o lodo com 90% ST, 80°C e 59% da produção de projeto, além de 4 sopradores.	168
Figura 66 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da vazão – fixada no cenário 3, na saída do reator, o lodo com 90% ST, 80°C e 59% da produção de projeto, além de 4 sopradores.	168
Figura 67 – Variação do ar no ponto ótimo termodinâmico ao processar 59% do lodo produzido em projeto e com vazão de ar na saída fixa em 8,70 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores no cenário 3.....	169
Figura 68 – Variação do lodo no ponto ótimo termodinâmico ao processar 59% da produção de projeto e com vazão de ar na saída em 8,70 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores no cenário 3.	169
Figura 69 – Variação do ar na saída do reator em função da fração de lodo produzido nas condições de projeto para o cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.....	172

Figura 70 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da fração de lodo produzido nas condições de projeto no cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.	173
Figura 71 – Variação do ar ao processar 78% de lodo no cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.	173
Figura 72 – Variação do lodo ao processar 78% da produção prevista em projeto no cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.	174
Figura 73 – Variação do ar na saída do reator em função da variação do teor de ST – fixados na saída do reator o lodo com 60°C e 78% da produção prevista em projeto, vazão de ar de 8,74 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás para o cenário 4.	176
Figura 74 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação do teor de ST – fixados na saída do reator o lodo com 60°C e 78% da produção prevista em projeto, vazão de ar de 8,74 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás para o cenário 4.	177
Figura 75 – Variação do ar na saída do reator em função da vazão – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores operando na ETE Araçás no cenário 5.	179
Figura 76 – Variação do IES e ITS do reator em função da vazão de ar de saída – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores operando na ETE Araçás no cenário 5.	180
Figura 77 – Variação do ar ao longo do MTSL para o cenário 5 – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores operando na ETE Araçás.	180
Figura 78 – Variação do lodo ao longo do MTSL para o cenário 5 – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s ⁻¹ , além de 4 sopradores operando na ETE Araçás.	181
Figura 79 – Comportamento do ar na saída do reator em função do teor de ST do lodo – fixadas na saída do reator, para o cenário 5, a vazão de ar de 12,84 kg.s ⁻¹ , 100% do lodo com 40°C, além de 4 sopradores.	183
Figura 80 – Variação do IES e ITS do reator em função do teor de ST do lodo – fixadas na saída do reator a vazão de ar de 12,84 kg.s ⁻¹ , 100% do lodo com 40°C, além de 4 sopradores.	184
Figura 81 – Variação do IES e ITS do reator em função da vazão de ar na saída – fixadas na saída do reator, para o cenário 5, o lodo com 55% ST, 40°C e 100% da produção, além de 4 sopradores.	184
Figura 82 – Representação didática do secador de lodo com base no processo de refrigeração evaporativa.	193

Figura 83 – Esquema caracterizando e comparando as teorias de secagem de lodo com ênfase na vaporização.	194
Figura 84 – Curva de umidade absoluta e pressão parcial do vapor d'água em função da variação de temperatura do ar.	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química aproximada do ar seco.....	62
Tabela 2 – Capacidades de projeto e utilizada na ETE Araçás em 2014.....	89
Tabela 3 – Composição e frações molares dos componentes do ar seco.....	115
Tabela 4 – Componentes, ordens e constantes empregadas na Equação 51.....	117
Tabela 5 – Resumo das capacidades utilizadas no ano de 2014 e de projeto da ETE Araçás.	143
Tabela 6 – Média dos monitoramentos de temperatura na ETE Araçás.....	150
Tabela 7 – Dados de entrada no MTSL e simulação Energética dos sopradores da ETE Araçás	153
Tabela 8 – Monitoramento do lodo nas diversas etapas do tratamento em comparação ao projeto.	155
Tabela 9 – Produção de lodo na ETE Araçás ao longo do ano de 2014 e na condição de projeto.	156
Tabela 10 – Comparação da produção de lodo <i>per capita</i> da ETE Araçás e da literatura técnica.....	157
Tabela 11 – Balanço de Massa e Energia para a secagem com higienização do lodo na ETE Araçás	158
Tabela 12 – Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 1 – condição de operação do ano de 2014 na ETE Araçás.....	164
Tabela 13 – Comportamento do lodo nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 1 – condição de operação do ano de 2014 na ETE Araçás.....	164
Tabela 14 - Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 3 para secar e higienizar 59% do lodo da ETE Araçás.....	171
Tabela 15 – Comportamento dos 59% do lodo da ETE Araçás nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 3.....	171
Tabela 16 – Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL para o cenário 4 com secagem de 78% do lodo produzido na ETE Araçás.....	175
Tabela 17 – Comportamento da secagem dos 78% do lodo produzido na ETE Araçás com vazão de ar de $8,74 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ na saída no cenário 5.	175
Tabela 18 – Comportamento do ar para o cenário 4 com secagem de 78% do lodo produzido na ETE Araçás até atingir 55% de ST.	178

Tabela 19 – Comportamento durante a secagem dos 78% de lodo produzido na ETE Araçás até atingir 55% no cenário 4.....	178
Tabela 20 – Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 5 – condição de operação prevista em projeto da ETE Araçás.....	182
Tabela 21 – Comportamento do lodo nas etapas do MTSL durante o teste de cenário 5 – condição de operação prevista em projeto da ETE Araçás.	182
Tabela 22 – Comportamento do ar para o cenário 5 com secagem de todo o lodo produzido na ETE Araçás até atingir 55% de ST e 40°C na saída do reator.....	186
Tabela 23 – Comportamento do lodo produzido na ETE Araçás no cenário 5 até atingir 55% de ST com vazão de ar de $8,74 \text{ kg.s}^{-1}$ na saída do reator.....	186
Tabela 24 – Variações de Temperatura e Entalpia entre a entrada e saída dos Trocadores e Regeneradores de Calor que foram empregados neste estudo.....	189
Tabela 25 – Capacidade de absorção de vapor d'água no ar seco ao nível do mar.....	195

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Poder calorífico do lodo e de outros resíduos.	43
Quadro 2 – Caracterização das frações de água no lodo e os métodos de separação.	45
Quadro 3 – Classificação dos secadores mecânicos pelo método utilizado.	49
Quadro 4 – Tipos de secadores mecânicos mais destacados.....	49
Quadro 5 – Enquadramento do lodo por classes.....	55
Quadro 6 – Valores das constantes do polinômio da Equação 12.	71
Quadro 7 – Dados técnicos do projeto dos conjuntos motor sopradores da ETE Araçás. ..	146

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrylonitrile Butadiene styrene
ANA	Agência Nacional de Águas
CESAN	Companhia Espírito Santense de Saneamento
DBO _{5,20}	Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias e em 20°C
COC	Carga Orgânica Carbonácea
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO _{5,20}	Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias em 20°C
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
ES	Espírito Santo
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IES	Índice Energético do Secador
ITS	Índice Térmico do Secador
max	Máximo
min	Mínimo
MO	Matéria Orgânica
MS	Massa Seca
MTSL	Modelo Termodinâmico de Secagem de Lodo
NMP	Número Mais Provável
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PROCEL SANEAR	Programa de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SES	Sistema Esgotamento Sanitário
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
T	Temperatura
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UR	Umidade Relativa

LISTA DE SIMBOLOS

Ar	Argônio
Ar ₀	Ar no estado de referência
Ar ₁	Ar no estado 1
Ar ₂	Ar no estado 2
Ar ₃	Ar no estado 3
Ar ₄	Ar no estado 4
Ar ₅	Ar no estado 5
Ar ₆	Ar no estado 6
Atm	Unidade de Pressão Atmosfera
Bar	Unidade de Pressão Bar
C _x	Capacidade Térmica do Componente X
ct	Centitonelada
°C	Graus Celsius
CO ₂	Dióxido de Carbono
$C_{p_{Lodo\ seco}}$	Calor Específico do Lodo seco
d	Dia
ϵ	Efetividade
f	Perda de Carga
g	Gramma
h	Hora
h_{eva}	Entalpia Específica da água evaporada
H _x	Taxa de Energia do Componente X
h _x	Entalpia Específica do componente X
H ₂ O	Água Líquida ou Vapor
L	Litro
k	Constante Isentrópica
K	Kelvin
Kg	Quilograma
kJ	Quilograma Joule
kmol	Quilograma Molar
kW	Quilograma Watt
kWh	Quilograma Watt Hora
L ₀	Lodo úmido no estado de referência

L_1	Lodo úmido no estado 1
L_2	Lodo úmido no estado 2
L_3	Lodo úmido no estado 3
L_4	Lodo úmido no estado 4
L_5	Lodo úmido no estado 5
L_6	Lodo úmido no estado 6
L_{seco}	Lodo em massa seca
M	Massa Molecular
M_{Ar}	Vazão Mássica do ar
m_L	Vazão Mássica de Lodo Úmido
$m_{Lágua}$	Vazão Mássica de água presente no lodo úmido
m_{Lseco}	Vazão Mássica de Lodo seco
m_x	Vazão Mássica do Componente X
m^3	Metro Cúbico
mg	Miligrama
η_{iso}	Eficiência Isentrópica
N_2	Nitrogênio Molecular
n_x	Número de Moles do Componente X
O_2	Oxigênio Molecular
p_x	Pressão do Componente X
Q	Quantidade de Calor
Q_{max}	Quantidade máxima de calor trocado
s	Segundo
T_{arx}	Temperatura do Ar no estado x
T_{Lx}	Temperatura do Lodo no estado x
$T_{SOP,ent}$	Temperatura do Soprador na Entrada
$T_{SOP,sai}$	Temperatura do Soprador na Saída
R	Constante Universal dos Gases
$R\$$	Reais
V_x	Volume do Componente X
W	Watt
W	Trabalho
X_{Lx}	Teor de Sólidos Totais no Lodo no Estado X
y_x	Fração Molar do Componente X
ω	Umidade Absoluta ou Razão da Mistura

$\%$	Porcentagem
ϕ	Umidade Relativa
Δh	Varição de Entalpia
ΔH	Varição de Energia
Δp	Varição de Pressão
ΔT	Varição de Temperatura
dT	Notação de Derivação em Função da Temperatura
ρ	Densidade do Ar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 MOTIVAÇÃO.....	29
2. OBJETIVOS	31
2.1 GERAL.....	31
2.2 ESPECÍFICOS	31
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3.1 DEMANDA DE ENERGIA NO SANEAMENTO.....	32
3.2 LODO ATIVADO	33
3.3 TECNOLOGIA UNITANK	34
3.4 SISTEMA DE AERAÇÃO	36
3.5 SOPRADORES DE AR	38
3.6 LODO BIOLÓGICO	41
3.6.1 Produção e composição do lodo biológico	41
3.6.2 Poder Calorífico e Calor Específico do Lodo Seco	43
3.6.3 Propriedades Reológicas do Lodo (Propriedades Mecânicas)	44
3.6.4 Umidade de Equilíbrio	45
3.6.5 Tipos de Tratamento de Lodo	47
3.7 SECADORES MECÂNICOS DE LODO	47
3.7.1 Classificação dos Secadores Mecânicos de Lodo	49
3.7.2 Tipos de Secadores Mecânicos de Lodo.....	49
3.7.3 Secador de Bandejas Múltiplas	50
3.7.4 Alimentação de Lodo Úmido nos Secadores Mecânicos.....	51
3.8 CUSTOS COM SECAGEM TÉRMICA.....	52
3.9 CICLO DOS NUTRIENTES	53
3.10 HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA.....	54
3.11 TRANSFERENCIA DE CALOR E MASSA	55
3.11.1 Transferência de Massa	57
3.12 PSICROMETRIA.....	57
3.13 VAPORIZAÇÃO DA ÁGUA	58

3.13.1	Ebulição	58
3.13.2	Calefação	59
3.13.3	Evaporação	59
3.14	AR ATMOSFÉRICO, AR SECO E AR ÚMIDO	61
3.14.1	Ar Seco	61
3.14.2	Ar Úmido	62
3.15	PRINCIPAIS PARÂMETROS PSICROMÉTRICOS.....	64
3.15.1	Pressões	64
3.15.2	Temperaturas.....	65
3.15.3	Umidade do Ar.....	66
3.15.4	Temperatura de Ponto de Orvalho.....	68
3.16	CALOR ESPECÍFICO E ENTALPIA PARA LÍQUIDOS E SÓLIDOS.....	68
3.17	CALOR ESPECÍFICO E ENTALPIA DO AR ÚMIDO.....	69
3.17.1	Entalpia do Ar Seco	71
3.17.2	Entalpia do Ar Úmido.....	72
3.18	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA.....	73
3.19	TROCADORES DE CALOR	75
3.20	METODO DA <i>EFETIVIDADE-NUT</i> PARA TROCADORES DE CALOR.....	76
3.21	RESFRIAMENTO EVAPORATIVO E SATURADOR ADIABÁTICO	81
3.22	TORRES DE RESFRIAMENTO	84
3.23	PROCESSOS ISENTRÓPICOS EM COMPRESSORES DE AR	86
3.23.1	Eficiência Isentrópica em Compressores	86
4.	METODOLOGIA.....	88
4.1	DELINEAMENTO DO ESTUDO	88
4.2	ÁREA DE ESTUDO	89
4.3	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO ESTUDO.....	90
4.4	OBTENÇÃO DOS DADOS	92
4.4.1	Dados Coletados Sobre a Estação.....	92
4.4.2	Dados Medidos na Estação.....	93
4.5	TRATAMENTO DOS DADOS E CARACTERIZAÇÕES.....	97
4.5.1	Caracterização da Fonte Quente	97
4.5.2	Caracterização do Lodo Úmido.....	97
4.6	MODELO TERMODINÂMICO DE SECAGEM DE LODO	98
4.6.1	Considerações Gerais Sobre o Modelo.....	98

4.6.2	Dados de Entrada	104
4.6.3	Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Lodo Úmido.....	105
4.6.4	Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Ar de Secagem e dos Sopradores 112	
4.6.5	Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Lodo Misturado	127
4.6.6	Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Secador de Lodo.....	133
4.7	TESTES DE CENÁRIOS E RESULTADOS FINAIS	139
4.6.7	Testes nas Condições do ano de 2014	140
4.6.8	Testes nas Condições Previstas em Projeto.....	141
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	143
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA FONTE TÉRMICA E DO LODO ÚMIDO	143
5.1.1	Fonte Térmica da ETE Araçás	144
5.1.2	Caracterização do Lodo Úmido.....	153
5.2	RESULTADOS DOS TESTES DE CENÁRIOS	159
5.2.1	Cenário 1	159
5.2.2	Cenário 2.....	165
5.2.3	Cenário 3.....	166
5.2.4	Cenário 4.....	172
5.2.5	Cenário 5.....	179
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	187
5.3.1	Secagem e Higienização do Lodo da ETE Araçás	187
5.3.2	Teoria de Secagem e Higienização de Lodo com Energia Térmica de Baixa Temperatura	191
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	198
6.1	FUTURAS PESQUISAS.....	201
7	REFERÊNCIAS.....	202

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais sistemas utilizados para o tratamento de efluentes domésticos e industriais nas regiões metropolitanas é o processo de Lodo Ativado, apresentando a vantagem na elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes e mínima geração de odores desagradáveis. No entanto, elevados custos são requeridos nos tocantes da energia elétrica e tratamento do lodo biológico.

O último, por sua vez, torna-se um desafio maior a cada ano para a área de saneamento, pois o gerenciamento do lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto (ETE) vem demandando o emprego de tecnologias mais eficientes para possibilitar o seu uso, após tratamento adequado, como insumo em outros processos produtivos, disponibilizando energia, nutrientes e até, em alguns casos, matéria prima na composição física de produtos.

O uso do lodo de esgoto 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 de materiais para os aterros sanitários que não sejam resíduos finais e sem viabilidade econômica para 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 aterro de solos, composição de matéria prima em indústria de cerâmicas, obtenção de energia térmica e elétrica, entre outras possibilidades, desde que o lodo seja tratado adequadamente para cada uso previsto.

Andreoli (2006) e a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA, 2003) afirmam que o lodo gerado pode conter até 80% de matéria orgânica, além de umidade e nutrientes que permitem o desenvolvimento de plantas, condicionamento de solo e sustentabilidade da produção agrícola. O primeiro autor ainda relata que o uso como combustível para obter energia nos processos industriais também é possível, pois o poder calorífico da fração volátil do lodo de esgoto pode chegar até $11.880 \text{ kJ.kg}^{-1}$, semelhante ao da lenha.

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. Por esse motivo os processos que

visam reduzir o volume gerado pela excessiva presença de água e contaminantes biológicos são amplamente estudados, possibilitando o aprimoramento das técnicas empregadas e a obtenção da viabilidade econômica para os usos nobres do lodo de esgoto.

Entre os tratamentos existentes, Haandel e Marais (1999) relatam que os métodos mecânicos são considerados o mais econômicos. Por exemplo, o adensamento por gravidade é mais econômico quando comparado a centrifugação, que utiliza em torno de 1.000 vezes mais energia que o primeiro. A evaporação forçada, realizada via secagem térmica, apresenta um consumo de até um milhão de vezes superior ao do adensamento. Isto resulta, por metro cúbico de lodo tratado, no consumo de energia de 3,6 kJ para adensamento, 3.600 kJ para a centrifugação e $3,6 \times 10^6$ kJ para o tratamento térmico por evaporação.

Apesar de a secagem térmica apresentar um consumo superior aos métodos tradicionais de tratamento de lodos, esta técnica continua sendo um dos processos mais eficientes e flexíveis para reduzir o teor de umidade e higienizar lodos de origem doméstica e industrial, além de produzir biossólidos que podem ser facilmente manipulados, armazenados e reciclados. Ensaio realizados para higienizar lodo biológico obtiveram resultados satisfatórios com temperaturas a partir de 60 °C e com vários tempos de exposição (ANDREOLI e BONNET, 2000; ANDREOLI, 2001; ARLABOSSE, CHAVEZ e PREVOT, 2005; CHERNICHARO *et al.*, 2009; ARCE, 2009; BARÉS, 2010).

No entanto, dentro da composição de custos de uma ETE de Lodo Ativado, a secagem térmica representaria um valor elevado na parcela referente a energia, podendo o projetista optar por métodos de menor custo e, inevitavelmente, menor eficiência na remoção de água. Por exemplo, Tsutiya (2001) relata que os custos médios para o tratamento e destinação final de lodo representam de 20 a 40% do custo operacional total de uma estação de tratamento de esgoto.

Mesmo sem o tratamento térmico do lodo nas estações, os demais consumos continuam significativos. Por exemplo, Mitsdoerffer e Christ (2009) afirmam que de todo o consumo de energia elétrica das unidades de Lodo Ativado, em torno de 2/3 corresponde ao tratamento biológico do esgoto. Além das diversas bombas para

deslocamento e recirculação do lodo, os aeradores são os equipamentos que geram o maior consumo de energia nas estações desse tipo.

A aeração nos sistemas de Lodo Ativado é realizada, basicamente, por aeradores superficiais ou sistema de ar difuso, sendo último o de maior eficiência em comparação ao primeiro método.

Apesar dos grandes avanços tecnológicos que os equipamentos eletromecânicos alcançaram no decorrer das décadas, as perdas energéticas continuam significativas quando comparadas à quantidade de energia útil que é utilizada para realizar o trabalho. As principais perdas estão na transformação da energia elétrica para a forma mecânica, designadas como perdas de conversão. Neste contexto, apesar da boa eficiência do sistema de aeração por ar difuso no aspecto transferência de oxigênio, o mecanismo de aeração (soprador) continua limitado à típica eficiência dos equipamentos eletromecânicos.

As perdas energéticas ocorrem de diversas maneiras. Por exemplo, no sistema de aeração por ar difuso, o ar soprado é produzido por um conjunto, acoplado, de motor elétrico e soprador, onde as perdas energéticas ou energia que não produziu trabalho são dissipadas na forma de vibração, ruído e, principalmente, calor. Esta última, que é dissipada pela carcaça do soprador e pelo ar soprado, representa a parcela da perda na sua forma térmica, sendo produzida durante a compressão do ar e movimentação dos componentes internos do equipamento de aeração. Autores renomados, como Incropera *et al.* (2014), que trabalham com sistemas térmicos de potência, afirmam que de toda a energia consumida no mundo, 60% é rejeitada na forma de calor.

1.1 MOTIVAÇÃO

O ar que sai da descarga de um soprador, presente em sistemas de aeração de estações de tratamento de esgoto, pode alcançar vazões na ordem de 7,08 m³/s e temperaturas finais de até 150 °C, gerando grande dissipação de calor e necessitando, para algumas aplicações, de resfriamento forçado (TCHOBANOGLIOUS, BURTON e STENSEL, 2003; OMEL, 2014).

O desenvolvimento de novas tecnologias pode permitir a recuperação de parcela das perdas energéticas dos equipamentos eletromecânicos, possibilitando a posterior aplicação como energia de entrada em processos menores e paralelos.

Essas ações tem foco na eco-eficiência da produção, conceito que visa empregar e desenvolver a tecnologia, de maneira inovadora, para aumentar a eficiência dos processos. Tal visão é compartilhada por Incropera *et al.* (2014), que relatam que a engenharia térmica pode ser conduzida com o objetivo de aproveitar a parcela da energia dissipada na forma de calor nos processos existentes.

Desta forma, considerando a viabilidade do aproveitamento de energia de processos principais para movimentar processos menores e paralelos, a possibilidade de recuperar a energia térmica perdida em equipamentos de grande porte deve ser estudada com o objetivo de secar e higienizar lodos de diversas origens, trazendo à luz do conhecimento uma tecnologia para o tratamento deste material que vai ao encontro dos princípios da sustentabilidade, que abrangem soluções viáveis economicamente, corretas ecologicamente e justa socialmente.

Neste contexto, a presente pesquisa buscou comprovar a viabilidade termodinâmica do aproveitamento da energia térmica dissipada nos sopradores de ar de sistemas de aeração de ETE de Lodo Ativado para realizar a secagem em baixas temperaturas do lodo produzido pela própria estação.

A presente pesquisa tem significativa importância para as práticas de tratamento de lodo, pois este resíduo tem por características uma elevada quantidade de água, patógenos e nutrientes, tornando importante e necessário o seu desaguamento e higienização para evitar a disseminação de doenças de veiculação hídrica que são responsáveis pela morte de milhões de pessoas ao ano, além do retorno do material ao solo via a agricultura, garantindo a continuidade do ciclo dos nutrientes na natureza e não o seu confinamento e armazenamento em aterros sanitários.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolver um modelo termodinâmico que faça uso da energia térmica aproveitada dos sopradores de ar de estações de tratamento de esgoto sanitário do tipo Lodo Ativado para realizar a secagem em baixas temperaturas do lodo produzido pelo próprio sistema.

2.2 ESPECÍFICOS

- Desenvolver um modelo conceitual para a teoria de secagem de lodo com energia térmica de baixa temperatura;
- Caracterizar a fonte de energia térmica deste estudo e quantificar o seu potencial energético;
- Caracterizar quali-quantitativamente o lodo biológico estudado para a secagem térmica;
- Desenvolver um modelo termodinâmico, com regeneração de calor, para a secagem de lodo com energia térmica de baixa temperatura;
- Avaliar a viabilidade termodinâmica da secagem do lodo com base no modelo desenvolvido e testes propostos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DEMANDA DE ENERGIA NO SANEAMENTO

Grandes discussões sobre a implantação de infraestrutura de bombeamento e tratamento de água e de esgoto envolvem os custos operacionais e de manutenção, pois são estes custos que, em longo prazo, são significativos para as companhias de saneamento em comparação aos valores de implantação das instalações físicas. Esta maior repercussão sobre os custos de operação e manutenção em relação a implantação tem se acentuado nos últimos anos em virtude dos gastos energéticos que são cada vez maiores (GOMES, 2005).

De acordo com o Programa de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR), 2,5% do consumo total de energia elétrica do Brasil, equivalente a aproximadamente 10,4 bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadores de serviços de água e esgotamento sanitário. Tal realidade demanda o desvio de significativa parcela dos recursos financeiros arrecadados na prestação dos serviços para custear esse insumo e garantir a continuidade da operação dos seus sistemas, tornando a energia à segunda parcela das despesas, ficando atrás apenas dos custos com mão de obra (PROCEL SANEAR, 2005; PROCEL, 2011).

Gomes (2009) relata que os sistemas de saneamento são responsáveis por, aproximadamente, 3% da energia consumida no mundo. Portanto, melhorias que visem à eficiência energética na área de saneamento são necessárias, principalmente com o relato de Schaeffer (2008) sobre o aumento na demanda de energia elétrica ocorrida no Brasil e no mundo nos últimos 25 anos. Aumento tal que propiciou, dentro do período citado, uma duplicação na geração hidrelétrica no Brasil, ocasionando, em virtude da implantação de empreendimentos hidroelétricos, elevados custos ambientais e de reassentamento de populações, impactando significativamente no meio físico, biótico e social de seus habitantes.

Apesar da demanda por energia crescer direção do consumo, a proporção é diferente, sendo que a demanda cresce com taxa superior ao consumo em virtude das perdas energéticas existentes. Por exemplo, nos Estados Unidos os autores Incropera *et al.* (2014) relatam que 70% da energia gerada para produzir eletricidade é perdida, enquanto na combustão em automóveis os valores podem alcançar 78,5%, ambas liberadas, principalmente, na forma de calor para o ambiente.

3.2 LODO ATIVADO

O sistema de Lodo Ativado é biológico e originou-se na Inglaterra em 1913, sendo amplamente difundido e aceito nas grandes ETE fora do Brasil, podendo apresentar inúmeras variações. O chamado sistema convencional é composto de diversas unidades, cuja finalidade principal é a remoção dos sólidos e matéria orgânica presentes no esgoto (JORDÃO, PESSOA, 2011; NUVOLARI, 2011).

Na ETE de Lodo Ativado o esgoto afluente e o lodo ativo são misturados e aerados em unidades chamadas reatores de aeração. Em seguida, ocorre a separação do lodo ativo do esgoto por sedimentação em decantadores. A maior parte do lodo ativo, quando separado, retorna para o processo, enquanto uma parcela menor é retirada para tratamento específico ou destinação final, o chamado lodo de excesso. O esgoto tratado sai do decantador no qual ocorreu a separação de fases, caracterizando o efluente final (JORDÃO, PESSOA, 2011).

O tratamento do lodo de excesso pode ocorrer em varias etapas, sendo as mais relevantes a fase de digestão, onde ocorre a remoção de parcela da matéria orgânica; adensamento para o aumento da concentração de sólidos e; desaguamento, momento que o lodo alcança elevados teores de matéria seca.

Segundo Arlabosse *et al.*(2005) e Luboschik (1999), o lodo biológico é um problema atual e de relevante preocupação para a sociedade devido ao potencial de poluição e o elevado consumo de energia para o seu tratamento.

Chernicharo *et al.* (2009) e Corrêa *et al.* (2005) relatam que o uso agrícola do lodo vem sendo estimulado por muitas agências ambientais ao redor do mundo como tentativa de solucionar o problema, mas o material continua necessitando de tratamentos mais específicos para essa finalidade por questões de ordem sanitária e ambiental. Sendo que um dos tratamentos específicos, de acordo com Ferreira *et al.* (2003) e Li *et al.* (2013), engloba a secagem e higienização para que o lodo alcance baixos valores de umidade e eliminação de microorganismos patógenos, permitindo o posterior emprego na agricultura e garantindo o retorno dos nutrientes ao ciclo natural do meio ambiente. A Figura 1 ilustra o esquema típico de uma ETE de Lodo Ativado.

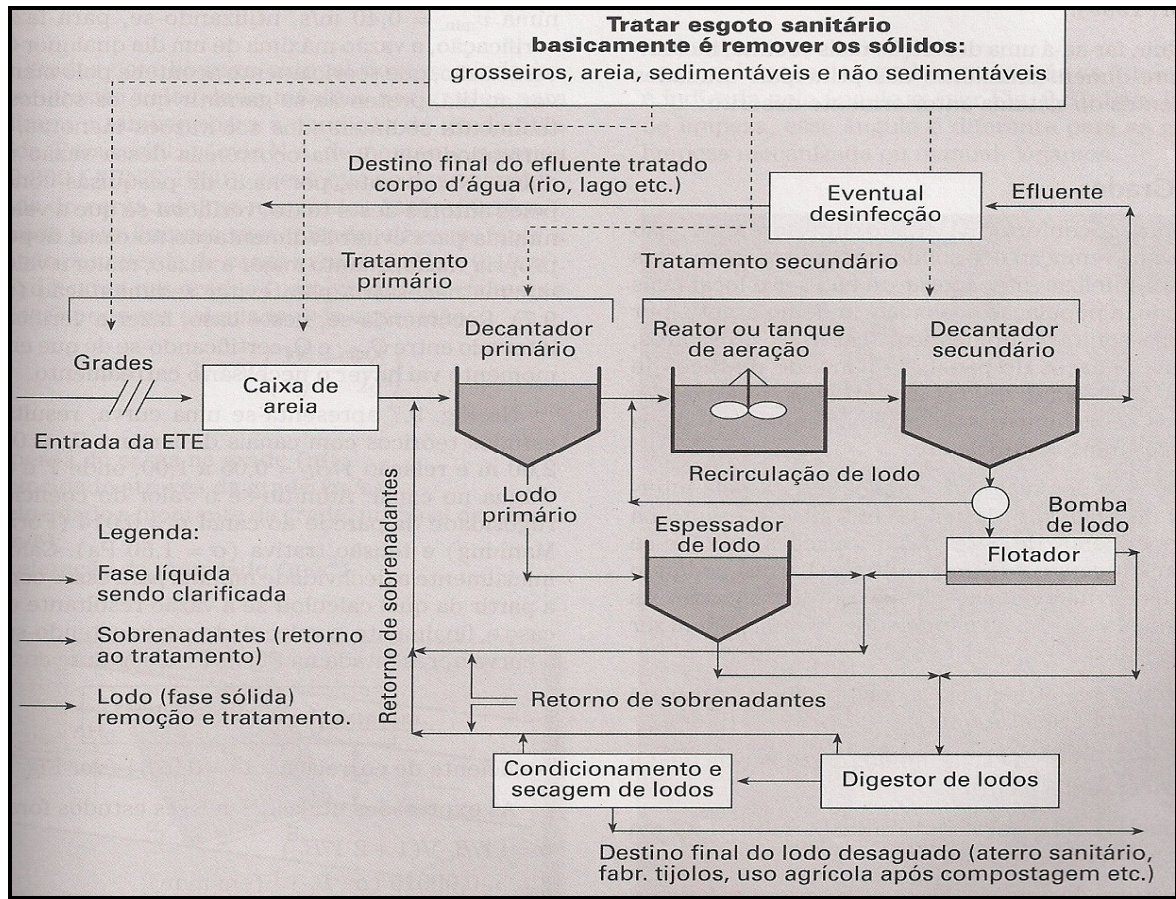


Figura 1 – Esquema de ETE de Lodo Ativado com fase de tratamento de lodo.

Fonte: Nuvolari, 2011.

3.3 TECNOLOGIA UNITANK

O sistema de Lodo Ativado que emprega a tecnologia UNITANK é uma variação do sistema convencional que visa à remoção de matéria orgânica carbonácea e sólidos em suspensão, podendo, ainda, remover nutrientes em algumas configurações.

Tomando como referencia a ETE Araçás, sistema de tecnologia UNITANK de segunda geração que foi instalado no município de Vila Velha – estado do Espírito Santo – a Figura 2 ilustra as principais unidades da referida estação.

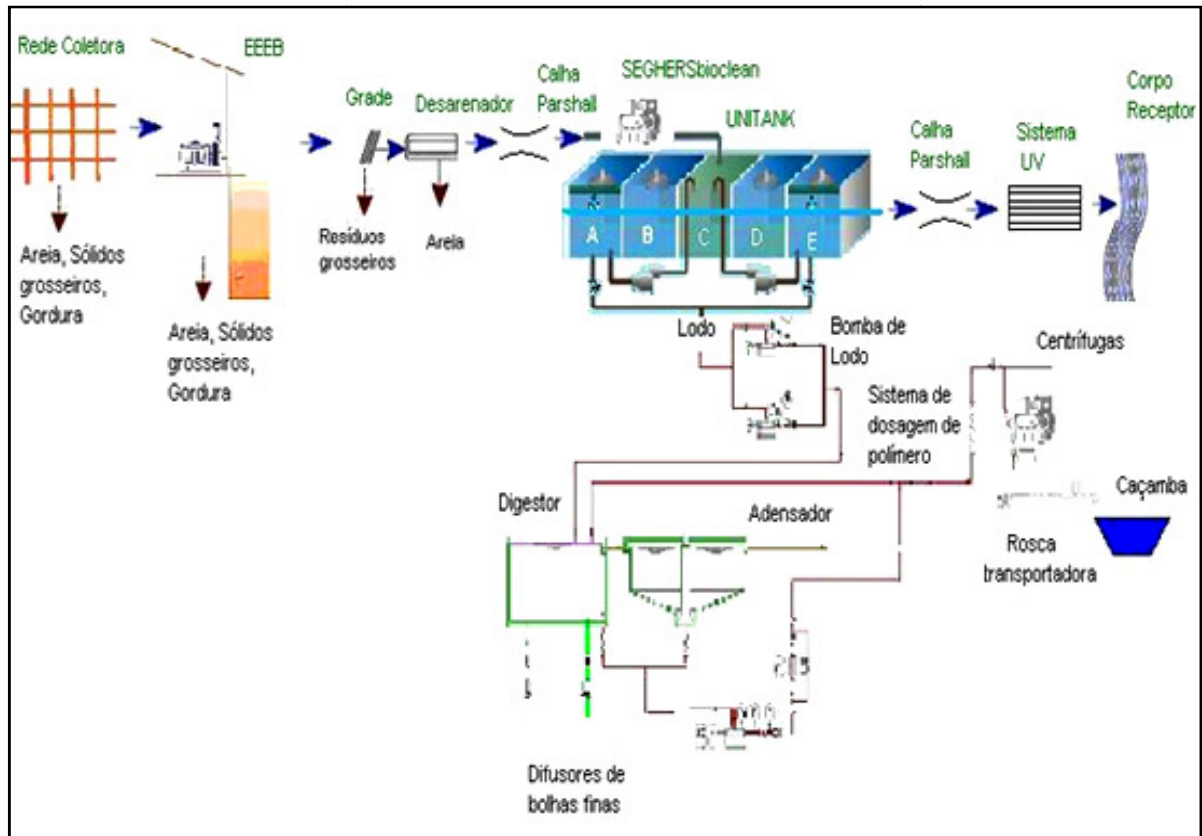


Figura 2 – Esquema ilustrativo das principais unidades da ETE Araçás.

Fonte: Seghers Képpel, 2003.

O Sistema UNITANK de segunda geração consiste em um tanque retangular subdividido em cinco compartimentos ligados hidraulicamente, sendo que dois deles funcionam como reatores de aeração, um como reator anóxico e dois como reatores de aeração/decantação que alternam o funcionamento entre aerador e decantador em função da fase de operação do sistema.

O esgoto é tratado de maneira similar ao sistema de Lodo Ativado convencional, sendo o diferencial a não existência de um tanque de decantação isolado que tem a única finalidade de sedimentar o lodo, além de um sistema interno de retorno de lodo que fica dentro dos próprios reatores de aeração/decantação, eliminando a necessidade de um sistema de extração de lodo no fundo dos decantadores e uma elevatória específica de retorno do material sedimentado ao tanque de aeração.

A operação do sistema UNITANK é cíclica e ocorre por meio da alternância da operação unitária de aeração para sedimentação entre os dois reatores de aeração/decantação, caracterizando o sistema como fluxo contínuo e alternado, pois o fluxo da estação é invertido a cada fase de operação.

3.4 SISTEMA DE AERAÇÃO

Para que ocorra a transferência de oxigênio para o meio líquido com elevadas taxas, em geral, utilizam-se equipamentos mecânicos que são denominados aeradores. Estes dispositivos podem ser enquadrados, didaticamente, em dois grupos (SANT'ANNA JR, 2013; NUVOLARI, 2011):

- Aeração por Ar Difuso: a passagem de oxigênio do ar para o meio líquido ocorre a partir de bolhas finas liberadas no fundo dos tanques de aeração. Este tipo de aeração apresenta a maior eficiência na atualidade;
- Aeração Mecânica ou Superficial: o contato do ar com o líquido ocorre de maneira turbulenta e próxima da superfície, podendo, ainda, a transferência de oxigênio ocorrer pela suspensão de pequenas gotas do líquido na atmosfera.

A transferência de oxigênio para o meio líquido, baseado no sistema de aeração por ar difuso, é feita pelo contato direto do ar com o líquido, desde o fundo do reator até a sua superfície. O sistema de aeração é composto por bombas de ar, também conhecidos como sopradores, tubulações de transporte e distribuição de ar, além de um componente de extrema importância que é o difusor de bolhas que pode ser de disco cerâmico ou membranas flexíveis (SANT'ANNA JR, 2013).

A Figura 3 retrata a aeração por ar difuso e a superficial, ilustrando como ocorre o contato entre a fase líquida e a gasosa para a transferência de oxigênio.

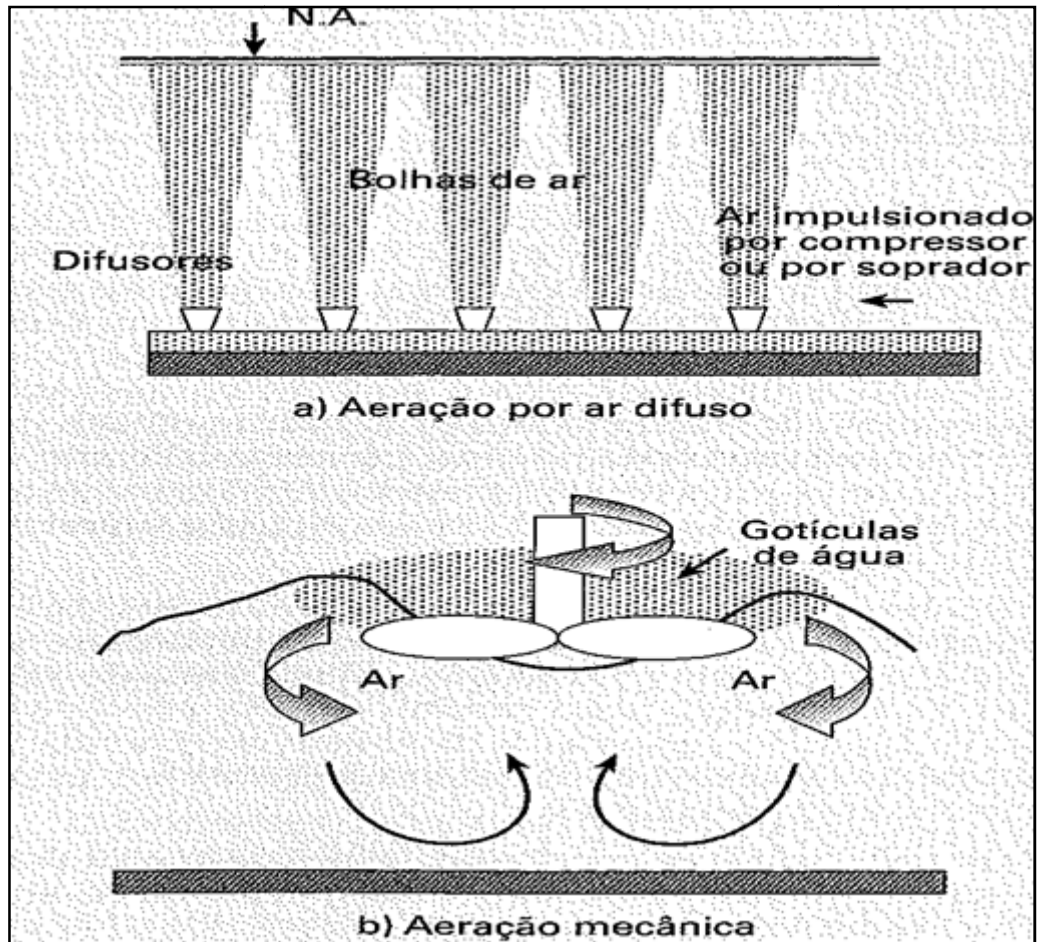


Figura 3 – Esquema ilustrativo da forma da aeração por ar difuso e mecânica.

Fonte: Nuvolari, 2011.

Sempre que possível os sistemas de Lodo Ativado são previstos com aeração por ar difuso, pois a eficiência na transferência é superior aos demais métodos disponíveis no mercado. Por exemplo, o processo de aeração instalado no sistema UNITANK da ETE Araçás é do tipo ar difuso, sendo constituído por conjuntos motores sopradores, tubulações de distribuição de ar soprado e membranas difusoras de bolhas finas que estão instaladas a, aproximadamente, 5,50 metros de profundidade em relação à superfície do tanque de aeração.

3.5 SOPRADORES DE AR

Segundo Tchobanoglous *et al.* (2003), dois dos principais tipos de sopradores utilizados para os sistemas de aeração por ar difuso são os centrífugos e os de lóbulos rotativos, sendo, este último, também conhecido como soprador de deslocamento positivo. A Figura 4 ilustra os dois tipos de sopradores com detalhes dos principais componentes internos.

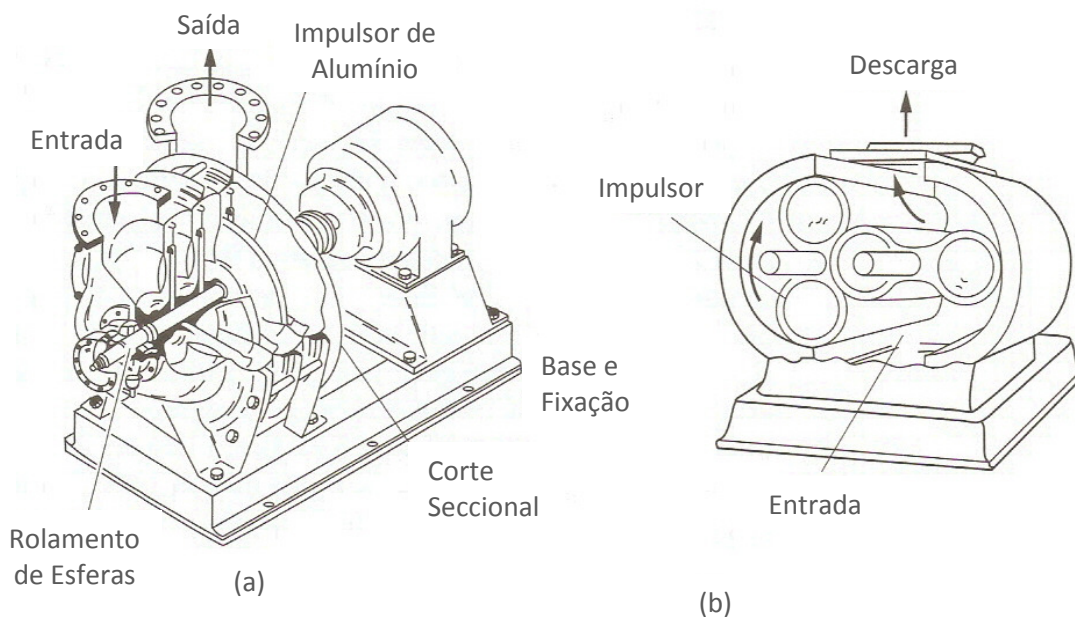


Figura 4 – Ilustração de um soprador centrífugo (a) e de lóbulos rotativos (b).

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003.

Apesar do soprador de deslocamento positivo apresentar uma grande gama de modelos, a sua aplicação não apresenta muita variação, pois são equipamentos utilizados quando as condições de operação que exigem pressões elevadas para vazões inferiores a 425 m³/min por equipamento (TCHOBANOGLIOUS, BURTON, STENSEL, 2003).

O aumento de pressão e temperatura que ocorre na descarga dos sopradores de deslocamento positivo é decorrente do tipo de mecanismo existente neste equipamento, haja vista que o ar aspirado é comprimido nas pequenas folgas que se formam entre os lóbulos e o corpo do equipamento, sendo, em seguida, transferido para a descarga e podendo atingir a pressão manométrica de 1,013 bar durante a operação, equivalente ao dobro da pressão atmosférica (OMEL, 2014). A Figura 5

ilustra, didaticamente, o movimento dos lóbulos e a saída de ar com elevada temperatura e pressão.

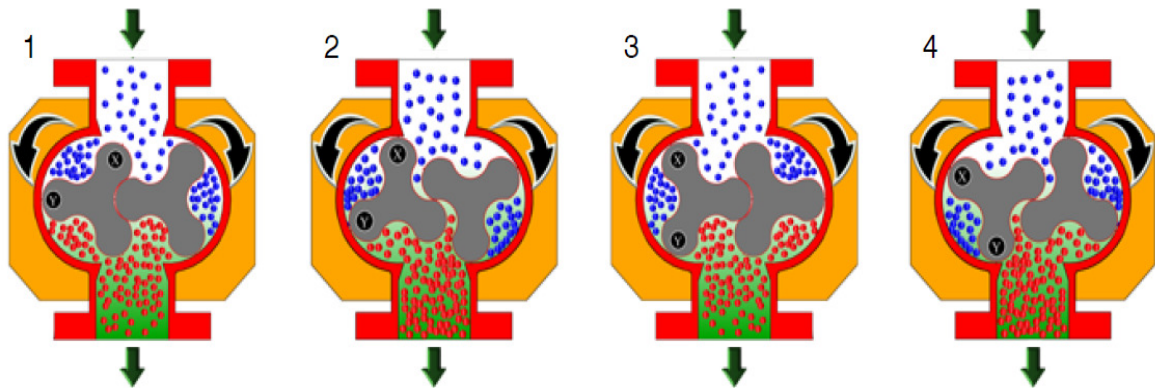


Figura 5 – Esquema ilustrativo da compressão e descarga de ar pelos lóbulos dos sopradores.

Fonte: OMEL, 2012.

A compressão do ar, mencionada anteriormente, ocasiona um aumento de temperatura durante a passagem pelos lóbulos e na descarga do equipamento, gerando, dependendo das condições de operação e do ambiente externo, variações de temperaturas de até 110 °C e temperaturas finais acima de 150 °C.

Em alguns casos, quando a temperatura do ar deslocado pelo equipamento fica superior aos 150 °C, se faz necessário um resfriamento forçado pela carcaça do soprador. Sendo a temperatura do ar deslocado igual à temperatura do ar ambiente/aspiração, somado a variação de temperatura gerada pela compressão do mesmo (OMEL, 2014).

A Figura 6 apresenta o diagrama de variação média de temperatura (ΔT) em função da relação de compressão do soprador (p_2/p_1) e da sua velocidade máxima de rotação (% max).

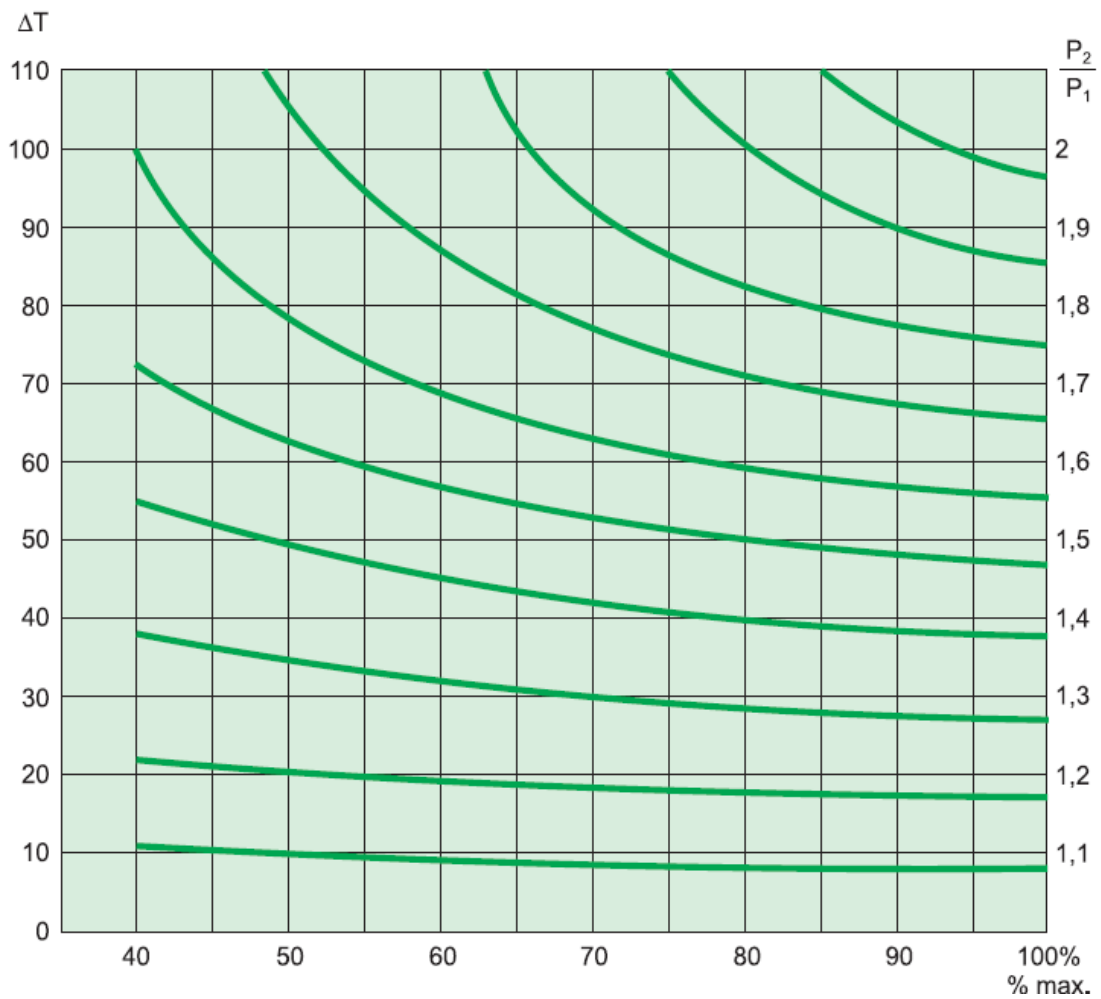


Figura 6 – Diagrama da variação de temperatura dos sopradores de deslocamento positivo da fabricante OMEL.

Fonte: OMEL, 2014.

Apesar das curvas de variação de temperatura apresentar a principal correspondência na relação das pressões, que por sua vez é um princípio conhecido pela Equação de Estado dos Gases, o presente diagrama foi montado com base nos sopradores de deslocamento positivo, do tipo trilobulares, da fabricante OMEL, devendo, para cada estudo sobre este assunto, mas com equipamentos diferentes, realizar a construção de diagrama próprio.

3.6 LODO BIOLÓGICO

3.6.1 Produção e composição do lodo biológico

O lodo é o principal resíduo gerado pelo tratamento de efluentes líquidos, 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 do lodo como primários, secundários e terciários, sendo o lodo secundário proveniente do processo de tratamento biológico ou secundário do esgoto, apresentando, inevitavelmente, diversos tipos de bactérias, vírus, protozoários e ovos de helmintos que podem desencadear doenças de veiculação hídrica quando esse lodo apresenta origem sanitária (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 7 e 8 que os processos aeróbios podem incorporar 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% da matéria orgânica afluyente, correspondendo a, aproximadamente, 62% da produção aeróbia, além de apresentar uma maior estabilidade sobre a matéria orgânica.

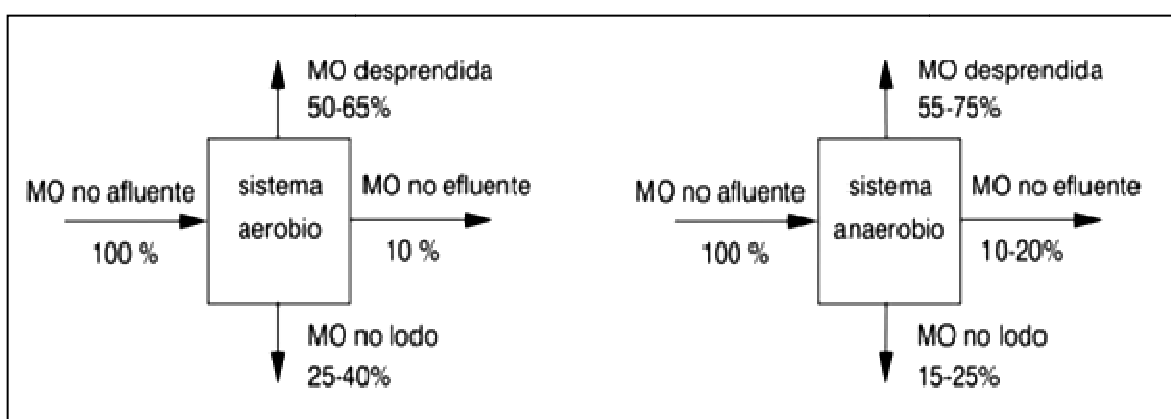


Figura 7 – Rota e incorporação da matéria orgânica afluyente nos sistemas de tratamento biológico aeróbio (esquerda) e anaeróbio (direita).

Fonte: Adaptado de van Haandel, 2009.

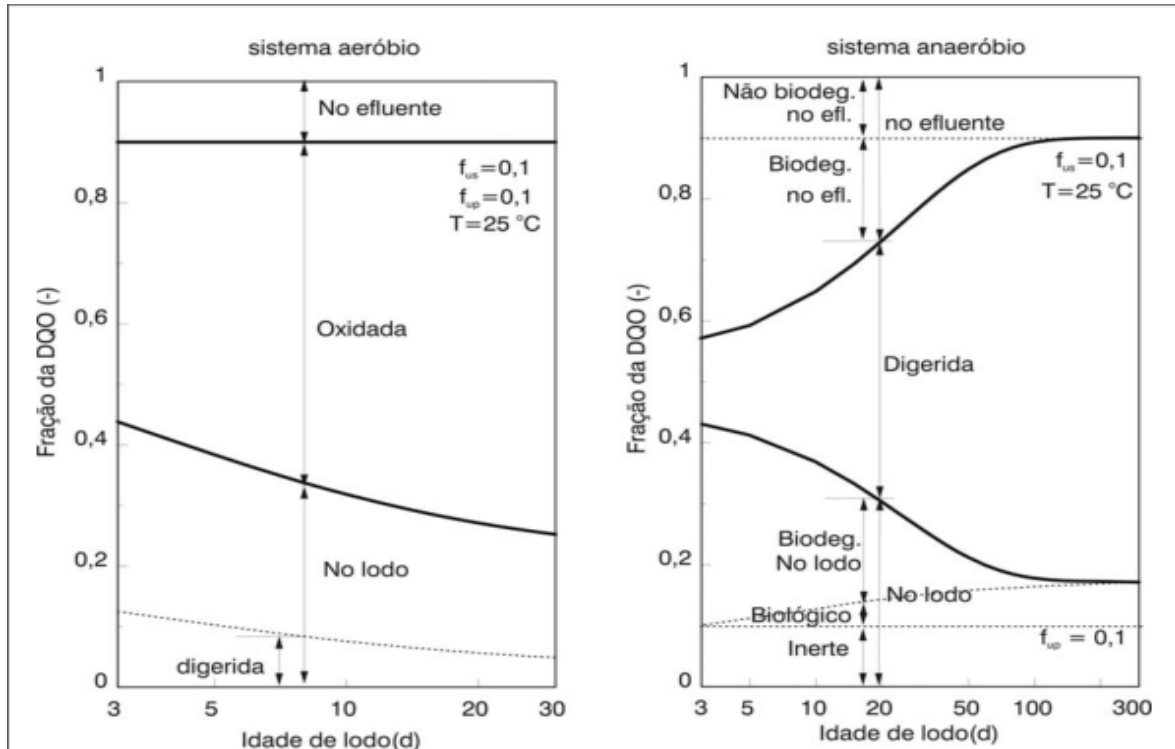


Figura 8 – Diferenciação bioquímica dos processos biológicos aeróbios e anaeróbios no aspecto lodo, efluente e matéria orgânica.

Fonte: Adaptado de van Haandel, 2009.

Lodos formados em estações de tratamento de esgoto por via aeróbia apresentam grande diversidade de microorganismos e significativa parcela de matéria orgânica não biodegradável incorporada. No aspecto desaguamento, o lodo proveniente de sistemas que apresentam aeração, 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).

Com relação à composição química dos lodos de origem sanitária, destaca-se a concentração de macronutrientes. Por exemplo, após estabilização o lodo pode apresentar valores de 3,3 % de nitrogênio e 2,3 % de fósforo, porcentagens significativas quando comparadas aos valores de 5,0 % de nitrogênio e 10,0 % para fósforo que são encontrados em típicos fertilizantes agrícolas (TCHOBANOGLIOUS, BURTON, STENSEL, 2003). Enquanto a matéria orgânica, de acordo com Coscione & Ceolato (2006), apresenta-se e distribuída em proporções aproximadas 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.

3.6.2 Poder Calorífico e Calor Específico do Lodo Seco

De acordo com Lee e Santos (2011), os valores de poder calorífico do lodo seco e de algumas biomassas como a madeira, apresentam valores na ordem de 16 MJ/kg, sendo a quantidade de energia por unidade de massa que mostra a viabilidade no uso de tais materiais como fontes de energia na forma térmica.

A aplicação do lodo como biomassa para combustão e geração de energia térmica também é relatada por Arauterm (2008, *apud* Borges *et al.*, 2008), pois o mesmo afirma que o Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) do lodo seco são, respectivamente, 20,1 e 18,6 MJ/kg, superior aos valores da madeira de descarte com PCS de 13 MJ/kg e do bagaço de cana em brinquete com PCS de 14,5 MJ/kg, ambos usados na obtenção de energia em diversos tipos de processos industriais.

Outros resíduos também apresentam o poder calorífico semelhantes ao lodo seco, conforme pode ser observado no Quadro 1:

Quadro 1 – Poder calorífico do lodo e de outros resíduos.

PODER CALORÍFICO				
MATERIAL	PC ^I	PCS	PCI	REFERENCIA
	MJ/kg			
Lodo Sanitário Seco	-	20,1	18,6	Borges <i>et al.</i> , 2008
	-	16,27	15,3	Lee e Santos, 2011
	11,8	-	-	Andreoli, 2006
	12,5-15,0	-	-	Almeida, 2007
Resíduos Industriais Genéricos	-	16,0	-	
Resíduos Hospitalares	-	14,0	-	
Refugos variados	-	18,5	-	Arauterm (2008) <i>apud</i> Borges <i>et al.</i> , 2008
Madeira de Descarte	13	-	-	
Bagaço de Cana em Briquete	14,5	-	-	

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Sem especificação se o Poder Calorífico seria o superior ou inferior.

Dentro das propriedades térmicas do lodo seco, também merece destaque o calor específico da base seca que corresponde a quantidade de energia necessária para variar em uma unidade de temperatura uma determinada massa do material.

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

(Equação 1)

$$Cp_{Lodo\ seco} = 1434 + 3,29T_L$$

Sendo:

$Cp_{Lodo\ seco}$: Calor específico do lodo seco na temperatura T ($\frac{J}{kg\ ^\circ C}$);

T_L : Temperatura do lodo seco ($^\circ C$).

3.6.3 Propriedades Reológicas do Lodo (Propriedades Mecânicas)

Segundo Andreoli (2006), 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 a umidade fica inferior aos 75% ou superior aos 25% de Sólidos Totais (ST), dando origem a um semissólido com características plásticas.

O referido autor ainda relata que ao aumentar a retirada de água o lodo entra no estado de sólido com elevada dureza ao toque, principalmente quando a umidade atinge a ordem de 65% (45% ST). Com a concentração de água atingindo o valor de 40% (60% ST), o lodo começa a ter um comportamento granular, semelhante a carvão triturado. Podendo, ainda, apresentar a condição de material de baixa granulometria e virar pó quando o teor de ST ultrapassa os 85% (15% de umidade).

A Figura 9 retrata, aproximadamente, o descrito por Andreoli em relação ao volume, umidade e teor de sólidos totais do lodo.

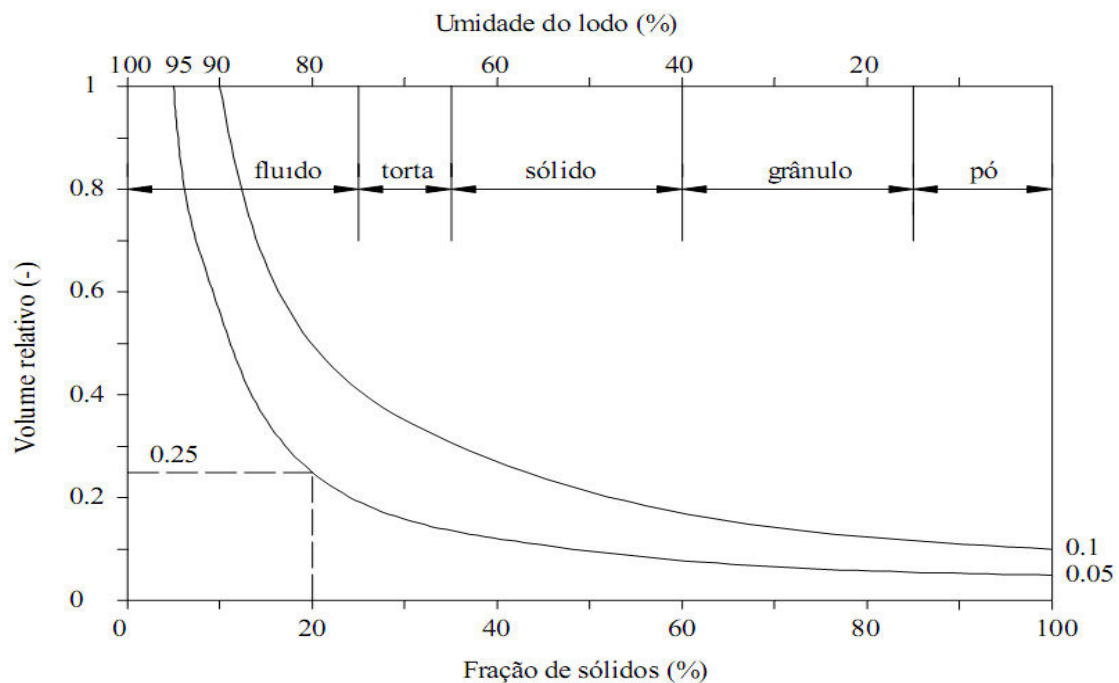


Figura 9 – Variação de volume e teores de sólidos totais e umidade do lodo.

Fonte: Van Haandel e Lettinga, 1994.

As variações nas características reológicas apresentam, entre várias causas, relação com a natureza da água presente no lodo. Esta, por sua vez, implica no método de separação de fases escolhida para realizar a sua retirada, sendo no Quadro 2 apresentadas as frações de água que constituem o lodo biológico, além dos métodos de separações recomendados para cada forma existencial.

Quadro 2 – 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 floclulantes.
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 e Marais, 1999.

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

Mesmo com o emprego de métodos mecânicos a retirada total da água livre não é possível, necessitando, dependendo do emprego esperado do lodo, um processo mais avançado para retirar o residual de água. Visão confirmada por Kamil 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.

3.6.4 Umidade de Equilíbrio

De acordo com David (2002), para realizar a secagem térmica de lodo biológico a umidade de equilíbrio do material deve ser considerada, evitando custos adicionais e perda de eficiência, pois a recuperação de água pelo lodo seco pode ocorrer quando o mesmo apresenta valores de umidade inferiores a umidade de equilíbrio, 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 umidade de equilíbrio são função da umidade relativa do ar ambiente (PERRY e CHILTON, 1980).

A Figura 10 mostra a umidade de equilíbrio do lodo biológico desaguado em função da umidade relativa do ar ambiente. Observa-se que a umidade de equilíbrio do lodo, para a umidade relativa de 78% do ar ambiente, o valor é ligeiramente inferior aos 10%.

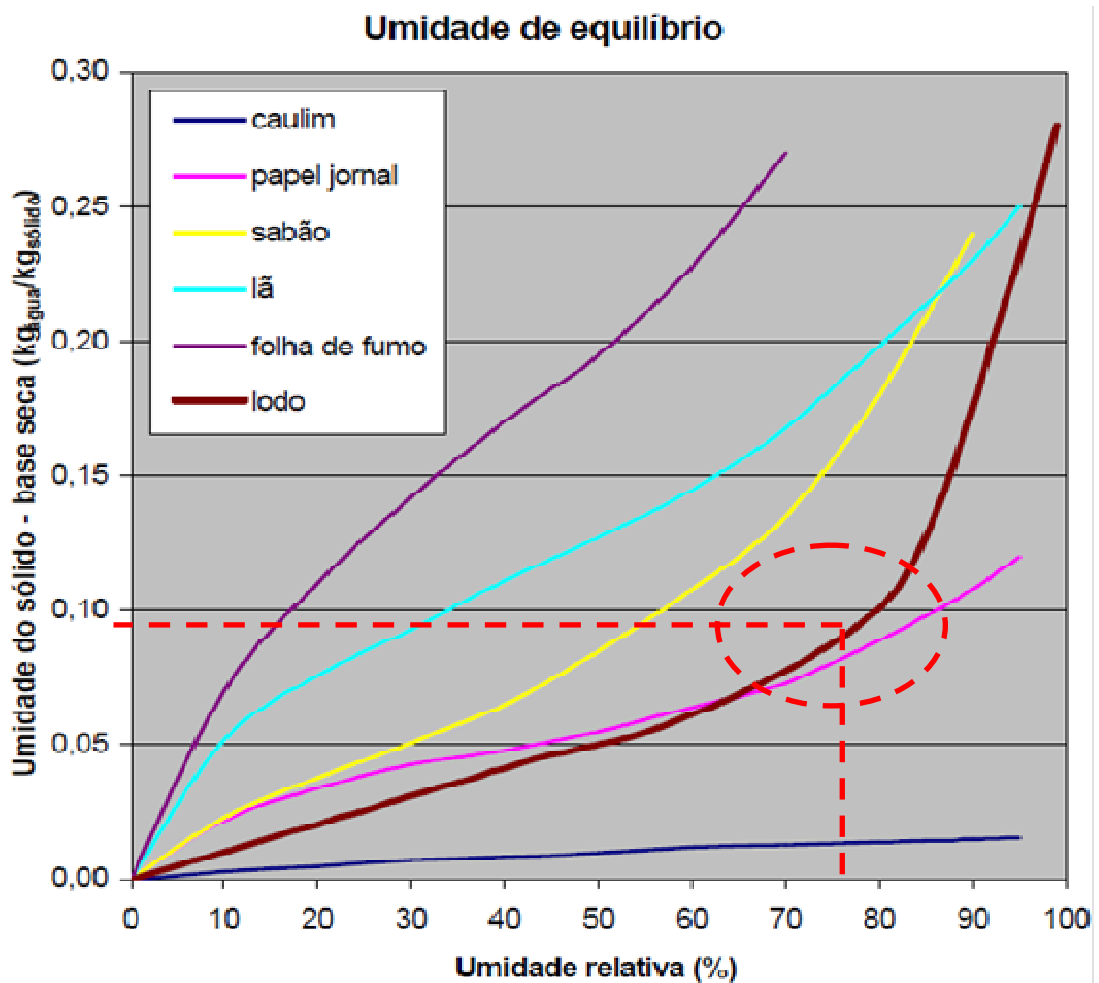


Figura 10 – Curva da umidade de equilíbrio de diversos materiais em função da umidade relativa do ar ambiente.

Fonte: Adaptado de David, 2002.

3.6.5 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.

Lobato (2011) afirma que os processos para retirar água do lodo podem ser classificados em mecanizados e naturais. O primeiro permite o processamento de grandes quantidades de lodo numa pequena área, enquanto o segundo requer grandes extensões e apresenta variações de eficiência pelas condições climáticas.

Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) relatam que a maioria dos processos para o tratamento de lodo ocorre por meio dos mecanismos de estabilização química, espessamento, digestão, compostagem, desidratação, secagem térmica e incineração.

Entre os processos citados a secagem térmica apresenta um grande potencial para a redução da massa de lodo na ordem de 70 a 80%, minimizando os custos com o transporte e destinação final do material. A secagem térmica é caracterizada pela evaporação 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; HAANDEL, 2009; DAVID, 2002).

Werle e Wilk (2010) afirmam que o tratamento térmico é uma alternativa promissora para o tratamento de lodos. Portanto, os secadores mecanizados merecem relevante destaque dentro dos processos de secagem térmica e, por esse motivo, serão tratados ao longo dos próximos subtópicos com maior profundidade.

3.7 SECADORES MECÂNICOS DE LODO

Os secadores mecânicos de lodo são equipamentos que podem processar significativas quantidades com elevada taxa, gerando biossólidos com baixos teores de água e higienizados, adequados para o uso agrícola.

De acordo com David e Tsutiya (2001) a secagem térmica em equipamentos mecanizados é realizada em altas temperaturas, por esse motivo é empregado combustíveis como óleo, carvão, biomassa, gás liquefeito de petróleo, além do próprio biogás gerado em determinados tipos de tratamento de resíduos, para produzir, por meio da combustão, a energia térmica necessária para secar o lodo.

Sendo o gasto com combustíveis, em virtude da elevada demanda de energia do processo, um dos principais motivos que tornam a secagem térmica de lodo em secadores mecanizados de elevado custo financeiro.

David e Tsutiya (2001) ainda estudaram um secador de soleiras múltiplas instalado na ETE São Miguel, São Paulo, que opera com temperaturas variando entre 280°C na entrada e 230°C na saída. 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 de secagem. 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.

A temperatura e a velocidade do ar, além do teor de água no ar e no lodo são os principais fatores que influenciam a secagem e higienização, tornando-se um dos principais parâmetros para controlar o processo de secagem térmica. Independente se o processo de secagem é natural, por exemplo os leitos de secagem com energia oriunda da radiação solar, ou forçada, a queima de combustíveis representa a fonte de energia, a necessidade do processo é que seja gerado energia térmica suficiente para a água alcançar o ponto latente de evaporação, passando do estado líquido para o de vapor d'água (HUANG, CHEN E JIA, 2015; COTA-ESPERICUETA e PONCE-CORRAL, 2008; HAMMER, 1979).

Para evaporar 1 kg de água presente no lodo, em condições ideais, é necessário 2.744 kJ de energia térmica, mas que esse valor pode aumentar em até 100%, dependendo do tipo de processo, lodo e equipamento utilizado (ANDREOLI, 2001). Valor próximo e coerente aos 2.600 kJ que foram descritos por Van Haandel (2009) para secar 1 kg de água presente em lodo desidratado com 20% de sólidos totais. e 80% de umidade.

O aumento de 100% da energia térmica para evaporar água presente no lodo que foi mencionado é ocasionado pelas perdas energéticas que são provenientes das fugas de energia e irreversibilidades, ambas inerentes ao processo termodinâmico real.

3.7.1 Classificação dos Secadores Mecânicos de Lodo

Segundo Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) existem diversos tipos de secadores mecânicos, sendo classificados em diretos, indiretos, infravermelho ou combinados, sendo o ultimo 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. O Quadro 3 apresenta a classificação de forma didática e inter-relacionada com o método e a transferência de calor.

Quadro 3 – Classificação dos secadores mecânicos pelo método utilizado.

CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES		
PRINCÍPIO DO METODO	TRANSFERENCIA DE CALOR	CLASSIFICAÇÃO
Convecção	Ar quente 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 impede o contato direto.	Indireto
Radiação	Lâmpadas elétricas ou queima de gás transmitem radiação infravermelha até o lodo.	Infravermelho

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Burton e Stensel, 2003; Tuncal e Uslu, 2014.

3.7.2 Tipos de Secadores Mecânicos de Lodo

São destacados no Quadro 4 alguns secadores mecânicos utilizados na área de saneamento, sendo que os mesmos apresentam distinções em função do método de transferência de calor e configuração de operação.

Quadro 4 – Tipos de secadores mecânicos mais destacados.

SECADORES MECÂNICOS DE LODO			
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.	Indireto	90 – 95%
Secador Rápido	Lodo é pulverizado e fica suspenso pelos gases quente no interior do secador pelo tempo necessário para a vaporização da água.	Direto	90 – 92%

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Burton e Stensel, 2003.

Nota: I: Teor de lodo seco expresso em porcentagem de Sólidos Totais.

Em virtude do objetivo do presente estudo, o secador do tipo bandejas múltiplas foi tratado em tópico específico a seguir, garantindo um maior conhecimento do seu uso e o aprofundamento em suas informações.

3.7.3 Secador de Bandejas Múltiplas

Lobato (2011) relata que 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.

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. A alimentação de lodo no equipamento 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 em cada bandeja e garantindo, assim, um grande contato do material com o ar aquecido e o tempo de detenção suficiente para ocorrer à secagem e higienização térmica.

Hammer (1979) afirma que 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. Esta linha de pensamento não é comum aos autores Tchobanoglous, Burton e Stensel (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 do primeiro autor, aceitando a existência dos secadores de bandejas múltiplas para a finalidade de secagem e incineração de lodo, dependendo do objetivo.

A Figura 11 apresenta dois secadores de bandejas múltiplas com transmissão de calor de maneira indireta (esquerda) e direta (direita).

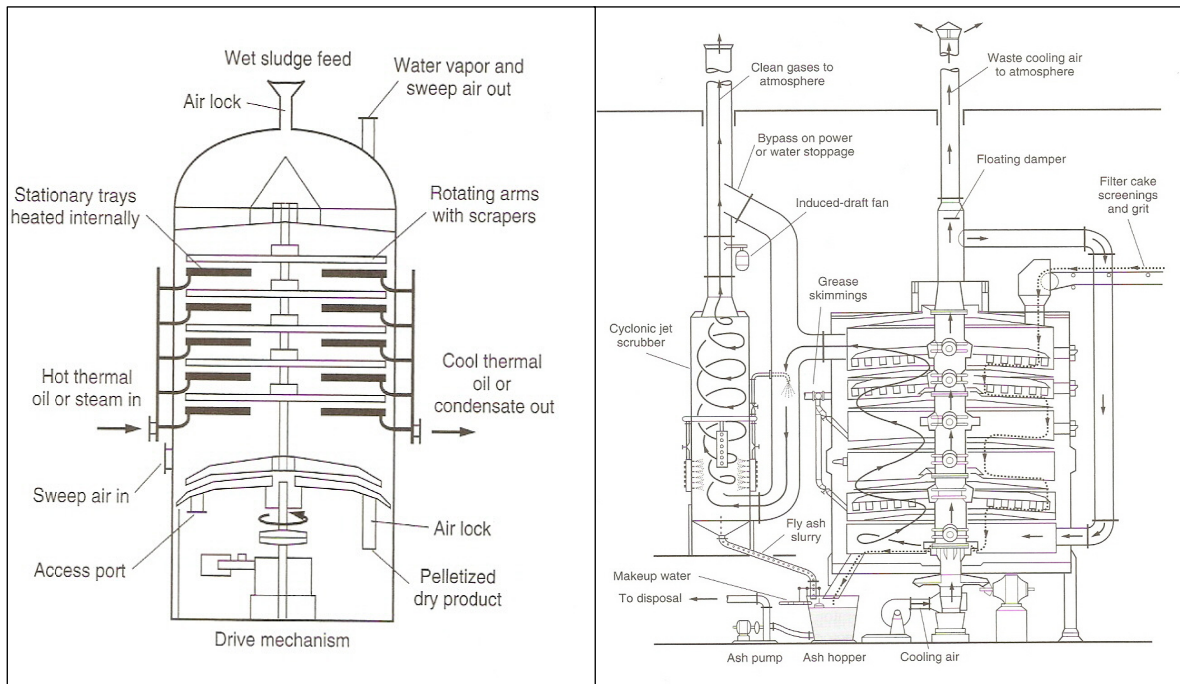


Figura 11 – Secadores de bandejas múltiplas de contato indireto (esquerda) e direto (direita).

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003.

Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) relatam que, dependendo do uso previsto do lodo seco, o secador com transmissão de calor indireto pode ser regulado para obter uma concentração de sólidos totais entre 65 e 95%.

3.7.4 Alimentação de Lodo Úmido nos Secadores Mecânicos

Com relação à característica dos lodos que entram nos secadores, recomenda-se que os teores de sólidos totais estejam entre 15 e 30%, dependendo da rota tecnologia e tipo de lodo utilizado (ANDREOLI, 2001).

Teores de sólidos entre 20 e 30% são facilmente obtidos por processos mecânicos de desaguamento, por exemplo, a centrifugação (STASTA *et al.*, 2005). Entretanto, Li *et al.* (2013) relatam que o lodo biológico apresenta elevada aderência nas paredes do secador quando atingem teores de ST de 40%, reduzindo a aderência e melhorando o manuseio a medida que o teor de sólidos é elevado acima deste valor.

Por causa dessa característica pegajosa do lodo, normalmente uma parcela do material seco é misturada ao lodo úmido que será alimentado no secador, formando um material com menor teor de sólidos e garantindo, assim, as características físicas

adequadas para o processo. (TCHOBANOGLIOUS, BURTON, STENSEL, 2003; OUTWATER, 1994).

A Figura 12 mostra o esquema de um secador do tipo tambor rotativo que utiliza a recirculação do lodo seco para realizar a mistura com o lodo úmido. Essa é uma prática usual nos processos de secagem, possibilitando, não apenas as mudanças das características do lodo de entrada, mas o reprocessamento das partículas que tem dimensões não adequadas para a destinação final prevista.

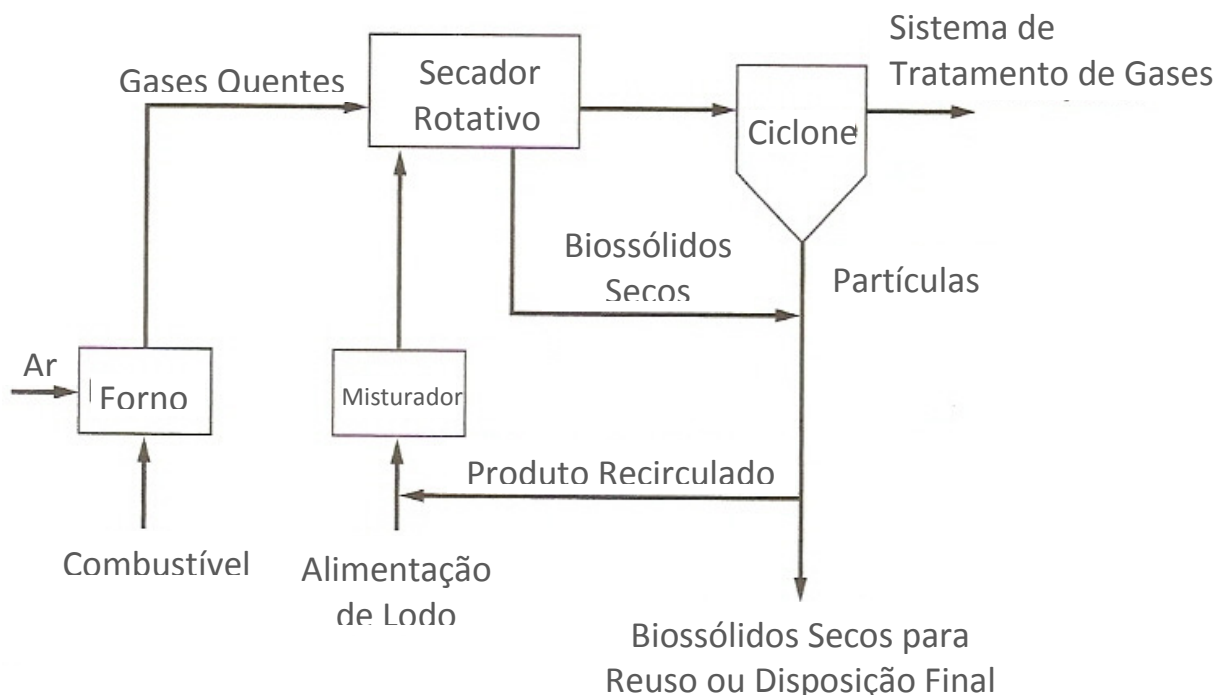


Figura 12 – Fluxo de lodo numa planta de secagem por tambor rotativo.

Fonte: Tchobanoglous, Burton, Stensel, 2003.

3.8 CUSTOS COM SECAGEM TÉRMICA

Estima-se que os custos energéticos para a secagem térmica de lodo biológico variem de 27 até 54% no valor do produto final comercializado como fertilizante, tornando-se uma das principais barreiras para empregar este material como fonte de recursos ao solo, via uso agrícola (FROSSARD e MOREL, 1995).

David e Tsutiya (2001) relatam que o custo médio com a compra de combustível para realizar a secagem térmica de lodo, baseado no gás natural e com valores médios do ano de 2001, fica na ordem de R\$180,00 por tonelada de massa seca processada, tomando como referencia a variação de 20% para 90% de ST no lodo.

Maldonado, Finzer e Lima Verde (2009) experimentaram a secagem térmica de lodo biológico em secador rotativo com recheio de inertes e relataram que a energia de operação do equipamento era obtida pela queima de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) para obter temperaturas na ordem de 450°C na câmara de combustão que alimentará a entrada do secador, garantindo, assim, a remoção da umidade do material.

A necessidade de alcançar elevadas temperaturas nos gases de entrada dos secadores de lodo, conseqüentemente, leva à grande consumo de combustíveis, aumentando o custo da secagem térmica de lodo e tornando, em muitos casos, inviável a instalação ou operação de tal processo.

3.9 CICLO DOS NUTRIENTES

Segundo Frossard e Morel (1995), o retorno dos nutrientes aos solos agrícolas pelos resíduos urbanos é de extrema importância nas sociedades com altas taxas de consumo de recursos naturais, garantindo que o solo não empobreça e que o ciclo natural dos nutrientes continue girando.

Também devem ser considerados os benefícios para os agricultores, pois o emprego de lodo tratado na agricultura reduz a compra de fertilizantes industriais, aumenta a fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade das plantas, capacidade de armazenamento e infiltração de água no solo, além da redução de erosão pelo aumento da resistência dos agregados que a mistura lodo e solo geram (LIRA; GUEDES; SCHALCH, 2008; LIANG; DAS; MCCLENDON, 2003; TSUTIYA, 2000;).

Além dos benefícios sociais e econômicos que o emprego na agricultura de lodo tratado apresenta, também existe o benefício ecológico de garantir o retorno dos nutrientes, parcela da água e energia que foram exportados para os centros urbanos na forma de alimentos (POGGIANI, 2000).

Neste contexto, o emprego de tratamentos que visem à secagem e higienização de lodos biológicos é de extrema relevância, sejam nos aspectos ecológicos em relação ao retorno dos nutrientes ao solo ou nos aspectos sociais e ambientais, evitando a contaminação e dispersão de agentes patológicos no ambiente.

3.10 HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA

O tratamento térmico do lodo pode visar dois aspectos distintos, sendo o primeiro a secagem do material e o segundo a higienização. Entretanto, dependendo das condições, pode ocorrer um e não o outro aspecto.

Arce (2009) e Barés (2010) 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, respectivamente, de 90, 60 e 30 minutos.

Barés (2010) relata que ao analisar de maneira estatística os resultados obtidos, as amostras submetidas à temperatura de 60 °C por 60 minutos apresentaram as melhores eficiências, considerando o gasto com energia elétrica e o tempo de exposição. Tendo como resultado final 0,25 ovos por grama de lodo seco para ovos viáveis de helmintos e $1,0 \times 10$ NMP (número mais provável) por grama de lodo seco para coliformes termotolerantes, tornando, para essas análises, o lodo enquadrado na classe A da Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 375/06 e demonstrando que baixas temperaturas podem gerar bons resultados de higienização.

O sucesso na secagem e higienização de lodos biológicos em baixas temperaturas também foi confirmado anteriormente na Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) por Andreoli e Bonnet (2000), submetendo lodo de origem anaeróbia em leitos de secagem cobertos por estufa, alcançaram a higienização para Ovos viáveis de Helmintos com exposição de 50 °C em 48 horas, 60 °C em 6 horas e 80 °C em 5 minutos. Resultados semelhantes foram encontrados por Serenotti (2009), onde as amostras de lodo apresentaram considerável eliminação de microorganismos em temperaturas de 60°C a partir de 60 minutos.

Processos de pasteurização do lodo em temperaturas de 70°C com exposição de 30 minutos também apresenta elevada eficiente para a higienização de lodos biológicos, entretanto, sem nenhuma variação na quantidade do material (GONÇALVES, 1999). Passamani, Keller e Gonçalves (2002) observaram a completa eliminação da viabilidade dos ovos de helmintos quando submeteram lodo biológico anaeróbio ao processo de pasteurização, comprovando a eficiência do método para a temperatura e exposição descritas.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 375/06 que define os critérios e procedimentos para o uso agrícola de resíduos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário, a mesma afirma que as práticas de higienização de lodo devem atender aos limites máximos de concentrações nos parâmetros biológicos mencionados no Quadro 5 para que possam ser utilizados diretamente em cultivos agrícolas, respeitando as respectivas restrições de cultura que são descritas na resolução.

Quadro 5 – Enquadramento do lodo por classes.

ENQUADRAMENTO DO LODO POR CLASSES	
PARAMETRO	CLASSE A
Coliformes Termotolerantes	< 1.000 NMP/g lodo seco
<i>Salmonella SP</i>	< 4 NMP/4 g lodo seco
Vírus entéricos	< 1 PFU/4 g lodo seco
Ovos viáveis de helmintos	< 1 ovo/ 4 g lodo seco

Fonte dos dados: Brasil, 2006.

Silva (2007) relata que, em leitos de secagem simples, a radiação solar permite o aquecimento do lodo até 50°C – temperatura suficiente para alcançar a morte de vários organismos patogênicos como bactérias, vírus, fungos e até nematóides.

Os ovos de helmintos são os organismos patogênicos mais resistentes as intempéries do meio ambiente, pois podem resistir por meses no lodo e de dois a sete anos como valores médios de sobrevivência 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).

3.11 TRANSFERENCIA DE CALOR E MASSA

Para a compreensão dos processos de transferência de calor, Moran e Shapiro (2014) explicam que, quando um sistema termodinâmico interage com a sua vizinhança sem realizar trabalho, ou seja, não gerando variação de volume, a interação decorre na transferência de energia através de calor. Por exemplo, adotando que uma moeda de dinheiro seja um sistema termodinâmico limitado pelas

dimensões externas da moeda, ao colocar a mesma sobre uma chapa metálica aquecida a sua temperatura aumentará e chamamos isso de transferência de energia através de calor.

Indo um pouco além do exemplo do autor, mesmo com o alcance da temperatura de fusão da liga metálica da moeda e a alteração do estado físico, o fenômeno observado continuará sendo a transferência de calor entre o sistema e a sua vizinhança. No entanto, se a temperatura for suficientemente elevada ao ponto dos elementos de liga sofrerem vaporização e escaparem para a atmosfera, isso seria um fenômeno de transferência de calor e massa, pois com o passar do tempo, não apenas a energia da moeda foi alterada, mas a quantidade de massa.

Sendo os processos de secagem térmica de lodo baseados nas leis da termodinâmica, pois envolvem a transferência de calor e massa entre o lodo úmido (água e matéria seca) e o ar ao redor, pode-se contextualizar o exemplo da moeda para a secagem térmica de lodo da seguinte forma:

Considerando a fronteira do sistema termodinâmico na parte superficial do lodo, quando o mesmo é aquecido sem a perda de água, por exemplo em processos de pasteurização, ocorre apenas a transferência de energia na forma de calor, mas quando ele perde água, por exemplo em secadores mecânicos de lodo, o mesmo realiza a transferência de calor e massa, resultando no aumento de temperatura e redução da umidade do material, além da geração de um fluxo adicional de saída pelo vapor d'água gerado, conforme pode ser observado na Figura 13 que ilustra os dois fenômenos em um sistema termodinâmico composto apenas por lodo.

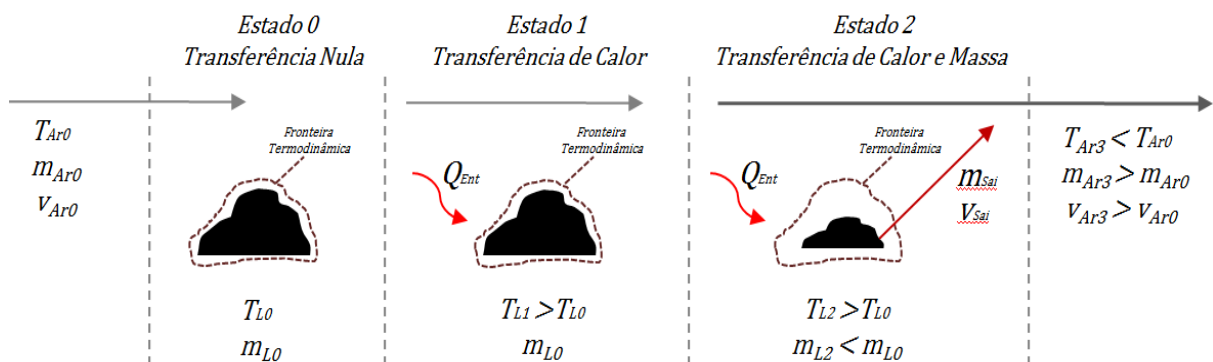


Figura 13 – Fenômeno de transferência de Calor no estado 1 e transferência de Calor e Massa no estado 2 para uma mesma amostra de lodo.

Fonte: Produção do próprio autor.

3.11.1 Transferência de Massa

Apesar da transferência de massa estar intimamente ligada à transferência de energia, pois a matéria só consegue ser deslocada ou transferida de um ponto para outro por meio do consumo de energia, diversos processos apresentam como objetivo principal a transferência de massa e não de energia, sendo a transferência da energia uma consequência da transferência de massa.

Por exemplo, a evaporação por convecção de água presente na roupa recém lavada e posta para secar é um clássico exemplo de um processo que objetiva a transferência de massa e não energia, pois a intenção é transferir a água presente na roupa para o ar, mas sem o fornecimento induzido de calor.

O mesmo fenômeno pode ser observado em poças de água e piscinas, onde o seu conteúdo líquido é reduzido ou, em alguns casos, totalmente vaporizado sem a necessidade de introduzir energia externa aos limites da poça. Incropera *et al.* (2014) descrevem e exemplificam o mesmo processo de evaporação descrito com as seguintes palavras:

Quando ar se movimenta ao longo da superfície de uma poça d'água, a água líquida irá evaporar e vapor d'água será transferido para dentro da corrente de ar.

Incropera *et al.*, 2014, 243 p.

Em um sistema fechado, tal evaporação descrita não gera aumento no volume de ar, apenas ganho de massa, pois a transferência de massa que ocorre apenas usa a capacidade disponível do ar em absorver vapor d'água, sendo o limite desta capacidade representada pela pressão de saturação do vapor d'água – que é uma propriedade estudada dentro da psicrometria e que será detalhada a seguir.

3.12 PSICROMETRIA

De acordo com Moran e Shapiro (2014), a Psicrometria estuda o processo de transferência de calor e massa que envolve a vaporização da água líquida para o ar seco, sendo uma vertente da termodinâmica e que suas propriedades são usualmente utilizadas para o condicionamento de ar, por exemplo, na climatização de ambientes para o convívio humano ou na indústria alimentícia para desidratar

frutas e garantir uma baixa umidade no interior dos silos, evitando a proliferação de fungos (MORAN, SHAPIRO, 2014; SHARMA, CHEN, LAN, 2009).

Oliveira, Berbert e Martinazzo (2013) também empregaram as técnicas psicrométricas para a secagem térmica das partes aéreas de plantas herbáceas em temperaturas de 30, 40 e 50 °C, vazões de ar de 0,27 e 0,54 kg/s e em materiais com 79,4% de umidade inicial, alcançado bons resultados com média de 11,1% de umidade final em 20 horas de secagem.

Na área de saneamento as propriedades psicrométricas também envolvem o método de secagem térmica do lodo, principalmente quando o objetivo é evaporar a água presente no lodo em temperaturas inferiores aos 100°C.

3.13 VAPORIZAÇÃO DA ÁGUA

Vaporização é o nome genérico destinado ao processo de mudança do estado físico do líquido para o gasoso, podendo ser diferenciado de acordo com a forma física da mudança de estado em 3 tipos. Considerando a água como o líquido estudado neste trabalho e a mesma na pressão atmosférica de 1,013 bar ou 1 atm (nível do mar), os três tipos serão detalhados nos subitens a seguir.

3.13.1 Ebulição

Quando a temperatura de 100 °C é atingida pela massa líquida, temos o ponto em que a água é denominada saturada. Qualquer acréscimo de energia sem variação de pressão gera a passagem da água do estado líquido para o vapor sem alterar a sua temperatura, pois a energia adicionada depois de 100°C será utilizada pela água para a mudança do estado físico. Sendo esse tipo de evaporação denominado de ebulição e muito comum durante a preparação de alimentos em residências.

A temperatura da água não apresenta variação durante a troca de fase, porque a energia térmica cedida para o líquido é utilizada como calor latente de evaporação e não calor sensível. Entretanto, tal fenômeno só é observado quando a água se encontra saturada.

A Equação 2 representa a forma de determinar a quantidade de energia necessária para vaporizar, via ebulição, determinada quantidade de água.

(Equação 2)

$$Q = mh_{vap}$$

Sendo:

Q: Quantidade de energia necessária para vaporizar determinada quantidade de água;

m: Massa de água líquida a ser vaporizada;

h_{vap}: Entalpia específica de vaporização a 100°C.

A entalpia de vaporização da água a 100°C e nível do mar é de 2.257 kJ.kg⁻¹ (MORAN e SHAPIRO, 2014).

3.13.2 Calefação

O processo de vaporização por calefação constitui na passagem brusca da água líquida ao estado de vapor quando uma pequena massa de água é aquecida rapidamente e ocasiona a mudança de fase quase instantaneamente. Tal fenômeno é observado ao gotejar água líquida sobre uma superfície aquecida com temperatura muito superior aos 100 °C, por exemplo, numa panela metálica.

3.13.3 Evaporação

O processo de vaporização por evaporação é o mais comum no cotidiano das pessoas, pois a vaporização da água de piscinas, lagos, poças, copos, inclusive do suor presente na superfície do corpo humano para garantir o controle térmico, são exemplos do processo evaporativo.

A evaporação consiste na passagem da água do estado líquido para vapor em temperaturas inferiores ao ponto de ebulição e superiores ao ponto de solidificação, inclusive na temperatura ambiente.

O processo ocorre quando algumas moléculas de água atingem a quantidade de energia cinética suficiente para vencer a tensão superficial do líquido e escapar para a atmosfera na forma de vapor. Incropera *et al.* (2014) descrevem o fenômeno da seguinte forma:

A evaporação acontece quando as moléculas do líquido próximas à superfície sofrem colisões que aumentam a sua energia para um valor acima daquele necessário para superar a energia de ligação na superfície (INCROPERA *et al.*, 2014, 262 p.)

Quando esse fenômeno ocorre, tais moléculas retiram da massa líquida apenas a quantidade de energia necessária para a mudança de fase, também conhecida como entalpia específica de vaporização que no caso da água é de, aproximadamente, 2.308 kJ/kg em 80°C e 2.257 kJ/kg em 100°C.

Existem programas computacionais que realizam o cálculo do calor latente de evaporação da água líquida em temperaturas inferiores aos 100°C (não saturada), por exemplo, o *Steam Table®* é um *software* que funciona como suplemento do programa *Microsoft Office Excel®* e permite ao usuário obter as entalpias e calores específicos da água líquida ou vaporizada, em condições saturadas ou não saturadas, de forma dinâmica e interativa.

Além dos *softwares* termodinâmicos, também é possível obter tais valores de tabelas ou utilizando equações apropriadas. Por exemplo, a Equação 3 descreve a quantidade de energia necessária para evaporar determinada quantidade de água líquida em função da massa e da entalpia específica de evaporação.

(Equação 3)

$$Q = mh_{eva})_T$$

Sendo:

$h_{eva})_T$: Entalpia específica de evaporação da água na temperatura T .

Para avaliar se a evaporação da água líquida para o ar pode ocorrer, deve ser considerada a pressão parcial do vapor d'água na atmosfera, pois quando a pressão exercida pelo líquido for superior a pressão parcial do vapor d'água exercida pela atmosférica, o escape de moléculas de água ocorre de forma espontânea.

Os secadores de lodo não mecanizados, por exemplo, os leitos de secagem e outras variações, fazem uso da transferência de massa pelo processo evaporativo, pois a água do lodo passa para o ar atmosférico em temperaturas inferiores ao ponto de ebulição. Tais secadores apresentam a principal característica do processo evaporativo que é a operação em baixas temperaturas e a lentidão da transferência de massa entre os meios quando comparado aos demais tipos de vaporização.

3.14 AR ATMOSFÉRICO, AR SECO E AR ÚMIDO

O ar atmosférico ou ambiente é uma substância gasosa composta por inúmeros gases, vapor de água e contaminantes. Para a maioria das aplicações termodinâmicas e, principalmente, psicrométricas, os contaminantes são desconsiderados e o ar passa a ser constituído de apenas gases e vapor d'água.

Denomina-se, usualmente, a mistura gasosa sem vapor de água de “ar seco” e quando esse “ar seco” apresenta vapor d'água, passa a ser conhecido como “ar úmido”, conforme ilustra a Figura 14.

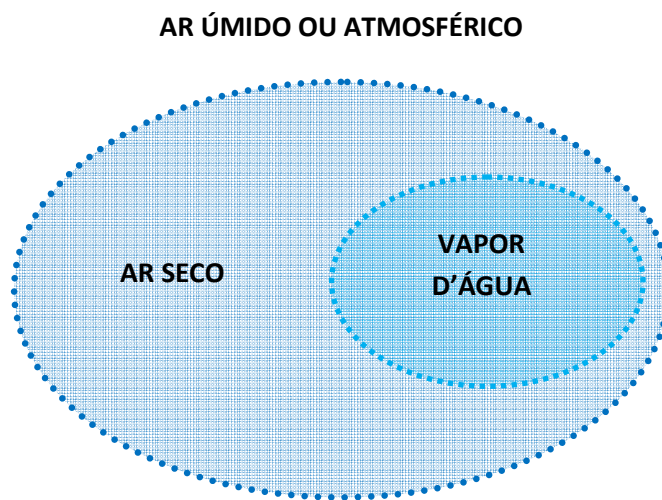


Figura 14 – Ilustração da composição do ar úmido com relação as duas principais fases.

Fonte: Produção do próprio autor.

Um estudo mais detalhado sobre o ar seco e o vapor d'água presentes no ar úmido foi descrito nos próximos subtópicos, garantindo o conhecimento mais profundo destas duas parcelas que serão aplicadas as propriedades psicrométricas.

3.14.1 Ar Seco

A expressão ar seco é utilizada para descrever as substâncias gasosas que compõem o ar atmosférico, desconsiderando as parcelas que compreendem o vapor d'água e demais contaminantes como poeira, pólen e poluentes diversos (MORAN e SHAPIRO, 2014).

A Tabela 1 descreve a composição aproximada do ar seco e as respectivas frações molares de cada componente.

Tabela 1 – Composição química aproximada do ar seco.

Componente	Fração Molar (%)	Massa Molecular (kg/kmol)
Nitrogênio	78,08	28,013
Oxigênio	20,95	31,999
Argônio	0,93	39,948
Dióxido de carbono	0,03	44,010
Neônio, hélio, metano e outros	0,01	-
TOTAL	100	28,964

Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro, 2014.

Segundo Simões Moreira (1999), o ar seco deve ser tratado como um gás ideal que apresenta a massa molecular de 28,964 kg/kmol para as aplicações psicrométricas. Para os casos que envolvem ar úmido, o vapor d'água e o ar seco devem ser tratados separadamente e não caracterizando os mesmos como um único gás.

3.14.2 Ar Úmido

O ar úmido é formado pela união do ar seco e vapor d'água, sendo a quantidade máxima do segundo definida em função da máxima capacidade do ar seco em absorver o vapor d'água de acordo com a temperatura e pressão da mistura gasosa.

Essa quantidade relativa é denominada umidade absoluta e pode ser encontrada nas cartas psicrométricas que determinam os valores desta umidade em função da temperatura, sendo a variável pressão fixa e pré-determinada para cada carta psicrométrica, conforme pode ser observado na Figura 15 que mostra a carta psicrométrica para uma pressão de 1 atm (nível do mar).

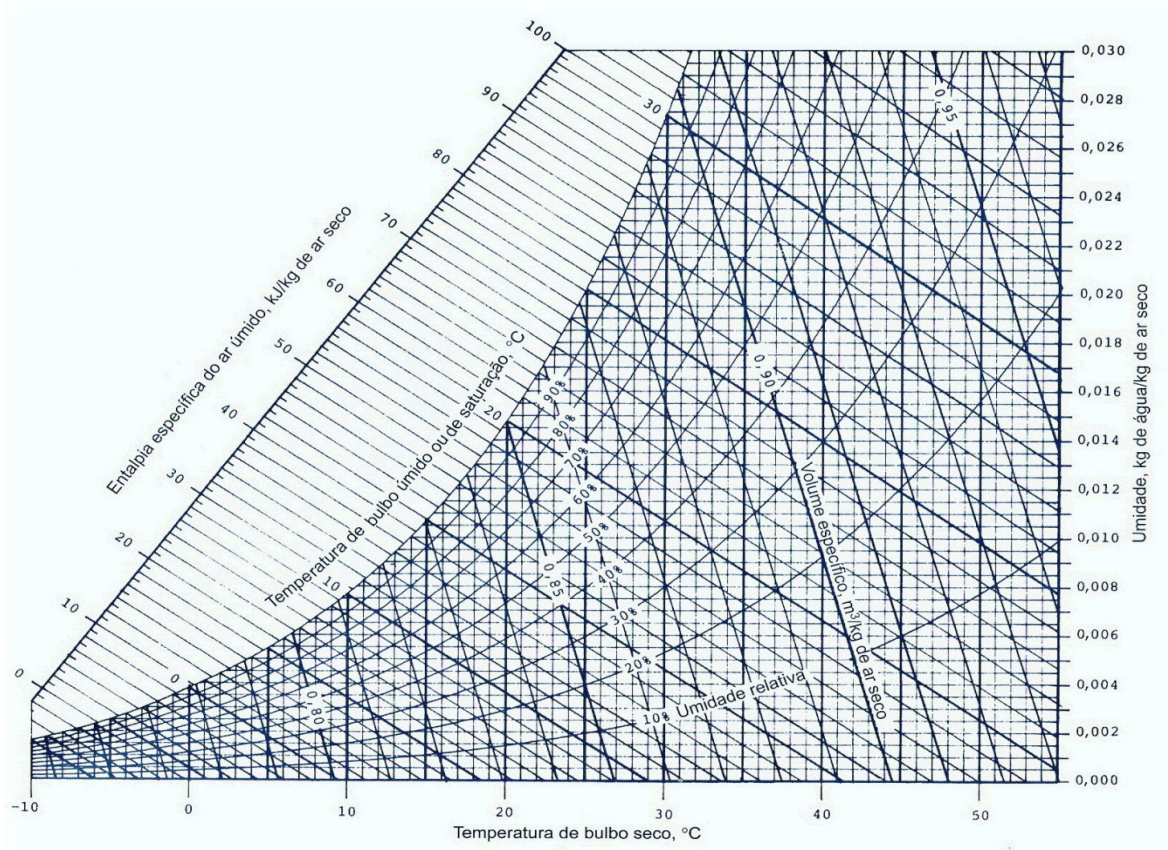


Figura 15 – Carta psicrométrica que correlaciona temperatura, entalpia e umidade absoluta na pressão de 1 atm.

Fonte: Z. Zhang, M. B. Pate, 1988, *apud* Moran, Shapiro, 2014, 812 p.

Quando o ar úmido atinge o limite máximo de vapor d'água, o mesmo passa a ser denominado de ar saturado. Tal condição ocorre quando a umidade relativa atinge 100% e a umidade absoluta alcança o máximo de vapor d'água por quilograma de massa de ar seco possível para uma pressão e temperatura determinada. Sendo que a identificação prática que o ar úmido atingiu o ponto de saturação é quando a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido apresentam valores iguais.

Para a condição que o ar é saturado, qualquer redução de temperatura gera a condensação de parcela do vapor d'água presente no ar. Tal condensação é proporcional a variação de temperatura ocorrida, pois a mistura de vapor d'água e ar seco terá uma nova relação máxima entre estes dois constituintes.

O processo de condensação mencionado, quando induzido, é denominado desumidificação por resfriamento e encontra aplicação em sistemas que apresentam o interesse em reduzir a umidade do ar para condicionamento de ambientes ou recuperação de energia, principalmente, na forma de calor latente de condensação.

3.15 PRINCIPAIS PARÂMETROS PSICROMETRICOS

A psicrometria apresenta algumas propriedades singulares e outras compartilhadas de áreas correlacionadas, sendo as principais detalhadas a seguir.

3.15.1 Pressões

Segundo Simões Moreira (1999), a Lei de John Dalton que trata da mistura de gases perfeitos descreve que a pressão total ou pressão da mistura de determinado gás é formada pela soma das pressões parciais geradas por cada componente constituinte da mistura. Contextualizando para o ar úmido que é constituído por uma mistura, considerada perfeita, entre ar seco e vapor d'água, pode ser equacionada as pressões existentes na mistura pela Equação 4.

(Equação 4)

$$p = p_a + p_v$$

Sendo:

p : pressão total da mistura (bar);

p_a : pressão parcial do ar seco (bar);

p_v : pressão parcial do vapor d'água (bar).

As principais pressões existentes dentro das propriedades psicrométricas são descritas a seguir.

Pressão parcial de vapor d'água: pressão parcial exercida pelo vapor de água no ar úmido.

Utilizando a equação geral dos gases ideais a pressão parcial do vapor d'água pode ser representada pela equação 5

(Equação 5)

$$p_v V_v = n_v \bar{R} T_v \xrightarrow{\text{rearranjando}} p_v = \frac{n_v \bar{R} T_v}{V_v}$$

Sendo:

p_v : pressão parcial do vapor d'água;

V_v : volume específico do a úmido;

n_v : número de moles de vapor d'água;

\bar{R} : constante universal dos gases ideais em base molar;

T_v : temperatura do vapor d'água.

Pressão de vapor saturado: máxima pressão exercida pelo vapor de água em determinadas condições de temperatura e pressão do ar úmido. Também é atribuída quando o ar úmido se encontra completamente saturado.

Tal condição de pressão pode ser representada pela equação 6 nas condições de ar úmido saturado.

(Equação 6)

$$p_g = \frac{n_g \bar{R} T_v}{V_v}$$

Sendo:

p_g : pressão parcial do vapor d'água saturado na mistura;

V_v : volume específico do ar úmido;

n_g : número de moles de vapor d'água na condição saturada;

\bar{R} : constante universal dos gases ideais em base molar;

T_v : temperatura do vapor d'água.

3.15.2 Temperaturas

As temperaturas psicrométricas podem ser medidas por termômetros e representadas pela temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, conforme descrito a seguir.

Temperatura de bulbo seco: temperatura indicada pela medição direta de um termômetro em relação ao ambiente;

Temperatura de bulbo úmido: temperatura indicada pelo termômetro quando o bulbo de medição do mesmo é envolvido por um material umedecido com água destilada.

As temperaturas de bulbo seco e úmido apresentam valores diferentes, sendo o primeiro sempre maior que a do segundo, exceto quando a umidade relativa do ar ambiente se encontra saturado (100% UR) e os valores serão iguais.

A Figura 16 apresenta um típico método de medição de temperatura de bulbo seco e úmido composto por dois termômetros de coluna de mercúrio, sendo o primeiro realizando a medição direta do ar ambiente, enquanto o segundo realiza uma medição indireta via um pequeno pedaço de pano molhado com água, permitindo

que a água evaporada para o ambiente absorva energia do líquido, que por sua vez reduzirá a temperatura do bulbo do termômetro.

Quando a umidade relativa do ambiente estiver em 100%, equivalente a pressão parcial de vapor d'água saturado, a água líquida no pedaço de pano não evaporará e a medição de ambos os termômetros serão iguais.

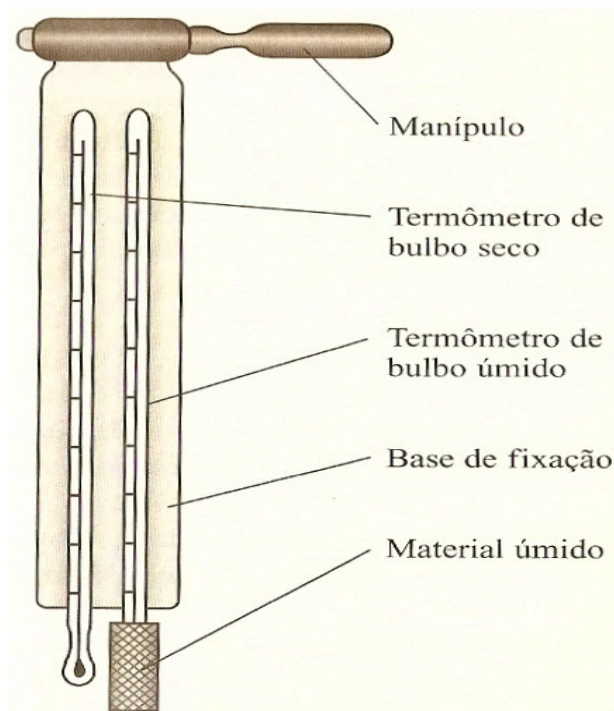


Figura 16 – A esquerda um termômetro normal e a direita um termômetro adaptado para realizar a medição de bulbo úmido.

Fonte: Simões Moreira, 1999.

3.15.3 Umidade do Ar

A umidade presente no ar representa quanto de vapor d'água existe naquele meio, podendo ser expressa na forma de umidade relativa ou umidade absoluta.

Umidade absoluta: razão da mistura entre o vapor d'água e o ar seco, usualmente expresso em massa de vapor por quilograma de ar seco, conforme a Equação 7.

(Equação 7)

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Sendo:

ω : umidade absoluta de vapor d'água na mistura $\left(\frac{\text{kg vapor d'água}}{\text{kg de ar seco}}\right)$;

m_v : massa ou vazão mássica de vapor d'água presente na mistura (kg);

m_a : massa ou vazão mássica de ar seco presente na mistura (kg).

A umidade absoluta também é conhecida como umidade específica ou razão da mistura. Simões Moreira (1999) e Moran e Shapiro (2014) descrevem que a mesma pode ser equacionada em função das pressões parciais com o auxílio da equação dos gases, conforme consta na Equação 8 e é demonstrado ao longo do seu desenvolvimento.

Desenvolvendo do conceito descrito:

$$m = \frac{MpV}{RT}$$

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v V / \bar{R}T}{M_a p_a V / \bar{R}T} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a}$$

Sabendo que a pressão parcial do ar seco é a diferença da pressão total pela pressão parcial do vapor, conforme descrito na Equação 3, somado ao fato de que a razão de massa molecular da água e do ar seco é, aproximadamente, 0,62198, pode-se reescrever a umidade específica como função da pressão parcial de vapor e pressão total da mistura pela Equação 8.

(Equação 8)

$$\omega = 0,62198 \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right)$$

Umidade relativa: razão entre a quantidade de vapor de água existente no ar e a quantidade de vapor de água quando o ar estiver saturado na mesma temperatura e pressão, conforme pode ser observado na Equação 9.

(Equação 9)

$$\phi = 100 x \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)_{T,p}$$

Sendo:

ϕ : Umidade relativa da mistura (%);

$\omega_g =$ umidade absoluta na mistura saturada $\left(\frac{\text{kg vapor d'água}}{\text{kg de ar seco}} \right)$.

A umidade relativa também pode ser expressa em função das pressões parciais do vapor d'água a partir da equação de umidade absoluta vista anteriormente, ficando na forma da Equação 10.

(Equação 10)

$$\phi = 100 \times \left(\frac{p_v}{p_g} \right)_{T,p}$$

Sendo: ϕ : Umidade relativa da mistura (%); p_v : pressão parcial do vapor d'água (bar). p_g : pressão parcial do vapor d'água quando a mistura estiver saturada (bar);

3.15.4 Temperatura de Ponto de Orvalho

Baseado numa mistura com umidade relativa inferior aos 100%, efetua-se o resfriamento da mistura até a condição que a umidade relativa se torne 100% e o ar fique saturado - neste momento é obtida a temperatura de Ponto de Orvalho.

Tal condição ocorre porque a capacidade de absorver vapor d'água pelo ar seco é diretamente proporcional a temperatura, portanto, à medida que a última é reduzida, a capacidade de absorver vapor d'água fica inferior.

Diante da temperatura do Ponto de Orvalho, qualquer redução de temperatura ou aumento de pressão resultará na condensação de vapor d'água presente na mistura. Tal princípio é comumente utilizado em processos de desumidificação por resfriamento e regeneradores de calor, conforme mencionado anteriormente.

3.16 CALOR ESPECÍFICO E ENTALPIA PARA LÍQUIDOS E SÓLIDOS

O calor específico é uma propriedade intensiva que define quanto de energia é necessária para variar em uma unidade de temperatura uma determinada massa. Por exemplo, para variar em um grau Celsius uma amostra de um quilograma de cobre metálico na temperatura ambiente é necessário 0,385 kJ, enquanto a mesma variação para a cortiça é de 1,210 kJ. Portanto, o calor específico de tais materiais são, respectivamente, 0,385 e 1,210 kJ.kg⁻¹ °C⁻¹.

Baseado nos valores descritos, conclui-se que a variação de temperatura ocasionada no cobre é muito superior a variação medida na cortiça para uma mesma quantidade de energia fornecida. Por esse motivo o cobre é empregado como condutor térmico de sistemas de troca de calor e a cortiça no revestimento com o objetivo de isolamento térmico.

O calor específico varia para cada substância em função da temperatura e pressão, desta forma, as variações de entalpia das substâncias com calores específicos a pressão constante, por exemplo o lodo que é formado por sólidos e água, são descritas em função da integração do calor específico pela sua respectiva variação de temperatura, conforme consta na Equação 11.

(Equação 11)

$$\Delta h = \int_{T_{ini}}^{T_{fin}} (c_{p_{Lodo}}) dT$$

Sendo:

Δh : Variação de entalpia $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$c_{p_{Lodo}}$: Calor específico a pressão constante $\left(\frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right)$;

T_{fin} : Temperatura final ($^{\circ}C$);

T_{ini} : Temperatura inicial ($^{\circ}C$).

3.17 CALOR ESPECÍFICO E ENTALPIA DO AR ÚMIDO

O calor específico dos gases apresenta o comportamento diferenciado quando comparado aos líquidos e sólidos ao longo de uma variação de temperatura, pois comumente apresentam variações elevadas, conforme mostra a Figura 17 para alguns gases comuns e considerados ideais.

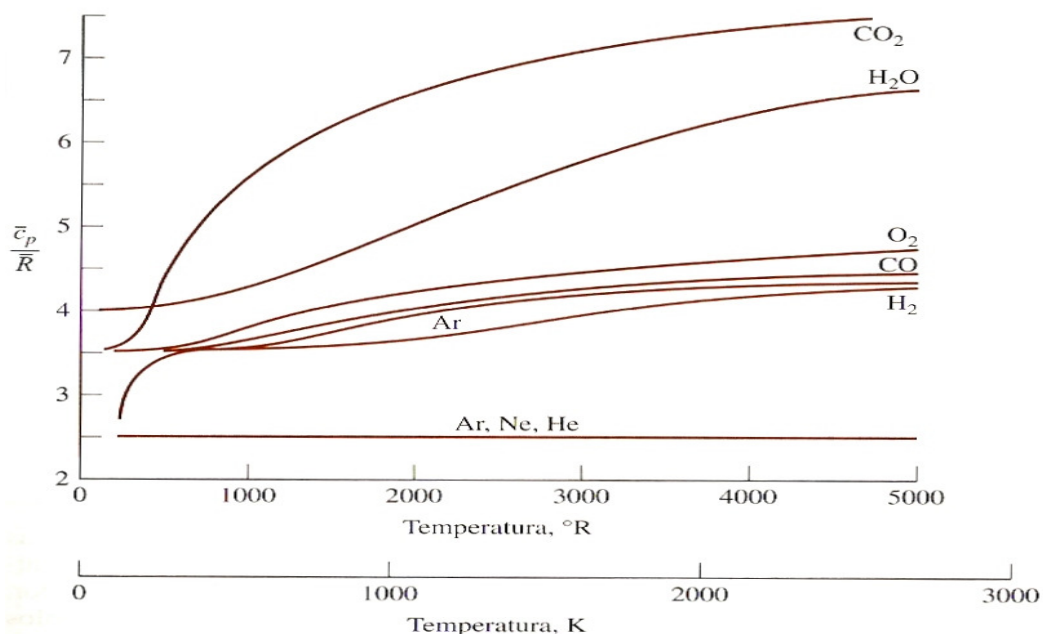


Figura 17 – Comportamento do calor específico para gases comuns e considerados.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

O calor específico aumenta à medida que a temperatura é elevada, exceto para os gases monoatômicos como o Argônio, Neônio e Hélio. Por esse motivo é comum realizar a avaliação de gases com base na variação de entalpia.

A variação de entalpia em função de uma variação de temperatura pode ser expressa por equações, por exemplo, a Equação 12 é uma forma adaptada de uma integração na forma polinomial para o cálculo da variação de entalpia específica em intervalos de temperatura de 273 a 1.800 Kelvin (00,15 a 1.526,85°C) para gases, considerando o calor específico a pressão constante. Sendo tal equacionamento descrito por Lozano e Valero (1986) durante o estudo da determinação de exergia em substâncias de interesse industrial.

(Equação 12)

$$h_{x2} - h_{x1} = \int_{T_1}^{T_2} (c_{p_x}) dT = \int_{T_1}^{T_2} (A + BT + CT^2 + DT^3)_x dT$$

Sendo:

h_{x1} : Entalpia específica do componente x no estado 1 $\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right)$;

h_{x2} : Entalpia específica do componente x no estado 2 $\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right)$;

T_1 : Temperatura no estado 1 (K);

T_2 : Temperatura no estado 2 (K);

c_{p_x} : Calor específico do componente x na mistura $\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)$;

A, B, C e D : Constantes $\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol K}}\right)$.

O mesmo equacionamento pode ser utilizado para o cálculo da taxa de energia do componente em determinado fluxo por meio da adição da vazão mássica do componente na equação de entalpia, conforme mostra a Equação 13.

(Equação 13)

$$H_{x2} - H_{x1} = n_x \int_{T_1}^{T_2} (A + BT + CT^2 + DT^3)_x dT$$

Sendo:

H_{x1} : Taxa de energia do componente x no estado 1 $\left(\frac{\text{cal}}{\text{s}}\right)$;

H_{x2} : Taxa de energia do componente x no estado 2 $\left(\frac{\text{cal}}{\text{s}}\right)$.

n_x : Vazão mássica do componente x $\left(\frac{\text{mol}}{\text{s}}\right)$.

As constantes da equação polinomial para algumas substâncias presentes na atmosfera estão descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores das constantes do polinômio da Equação 12.

COMPONENTE	<i>A</i>	<i>B</i> x 10 ²	<i>C</i> x 10 ⁵	<i>D</i> x 10 ⁹
	cal/mol.K			
CO ₂	5,316	1,4285	-0,8362	1,784
H ₂ O	7,700	0,04594	0,2521	-0,8587
O ₂	6,085	0,3631	-0,1709	0,3133
N ₂	6,903	-0,03753	0,193	-0,6861
Ar*	4,964	-	-	-

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

3.17.1 Entalpia do Ar Seco

Quando o ar é considerado como uma substância formada por varias combinações gasosas, ela passa a apresentar um comportamento diferenciado. Moran e Shapiro (2014) relatam que as propriedades como a entalpia específica e a taxa de energia de determinadas substâncias complexas, como é o caso do ar seco, podem ser estimadas a partir da quantidade que cada componente aparece na mistura – ou seja – as propriedades da mistura correspondem às propriedades de cada componente em função da quantidade em massa que o mesmo representa, conforme pode ser observado na Equação 14 e 15 para a taxa de energia e na Equação 16 para a entalpia específica em base molar.

(Equação 14)

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_j = \sum_{i=1}^j H_i$$

Sendo a taxa de energia, em base molar, representada por:

(Equação 15)

$$nh = n_1h_1 + n_2h_2 + n_3h_3 + \dots + n_jh_j = \sum_{i=1}^j n_jh_j$$

Sendo:

H: Taxa de energia da mistura em determinado estado $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

H_x: Taxa de energia do componente *x* em determinado estado $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

n_x: Vazão mássica do componente *x* na mistura $\left(\frac{mol}{s}\right)$;

h_x: Entalpia específica do componente *x* na mistura $\left(\frac{cal}{mol K}; \frac{kJ}{mol K}\right)$.

Para a entalpia específica da mistura:

(Equação 16)

$$h = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_j}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_j} = \sum_{i=1}^j \frac{H_i}{n_j}$$

Por fim, conclui-se, com base na Lei de Dalton e nas informações discutidas, que a entalpia específica do ar seco pode ser representada pela composição descrita na Equação 17.

(Equação 17)

$$h_a = \frac{H_{N_2} + H_{O_2} + H_{Ar} + H_{CO_2} + H_{GT}}{n_{mistura}}$$

Sendo:

h_a : Entalpia específica do ar seco em determinado estado $\left(\frac{cal}{mol}; \frac{kJ}{mol}\right)$;

H_{N_2} : Taxa de energia do Nitrogênio presente na mistura $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

H_{O_2} : Taxa de energia do Oxigênio presente na mistura $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

H_{Ar} : Taxa de energia do Argônio presente na mistura $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

H_{CO_2} : Taxa de energia do Dióxido de Carbono presente na mistura $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$.

H_{GT} : Taxa de energia dos gases traços presentes na mistura $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$.

$n_{mistura}$: Vazão mássica da mistura $\left(\frac{mol}{s}\right)$.

3.17.2 Entalpia do Ar Úmido

Baseado no conceito abordado para o ar seco, a entalpia do ar úmido corresponde a adição da fração d'água na mistura de ar seco, conforme consta na Equação 18.

(Equação 18)

$$h_{Ar} = \frac{H_{N_2} + H_{O_2} + H_{Ar} + H_{CO_2} + H_{GT} + H_{H_2O}}{n_{ar\ seco} + n_{H_2O}}$$

Sendo:

h_{Ar} : Entalpia específica do ar úmido em determinada estado $\left(\frac{cal}{mol}; \frac{kJ}{mol}\right)$;

H_{H_2O} : Taxa de energia do vapor d'água presente na mistura $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

$n_{ar\ seco}$: Vazão mássica do ar seco na mistura $\left(\frac{mol}{s}\right)$;

n_{H_2O} : Vazão mássica do vapor d'água presente na mistura $\left(\frac{mol}{s}\right)$.

O conhecimento de que a taxa de energia pode ser expressa pelo produto da entalpia específica pela vazão mássica de cada componente – conforme expresso na Equação 19 – permite o seu emprego em modelagem termodinâmica para realizar o balanço de massa e energia de sistemas que apresentam variações ao longo do tempo.

(Equação 19)

$$H_{Ar} = m_{N_2}h_{N_2} + m_{O_2}h_{O_2} + m_{Ar}h_{Ar} + m_{CO_2}h_{CO_2} + m_{GT}h_{GT} + m_{H_2O}h_{H_2O}$$

Sendo:

H_{Ar} : Taxa de energia do ar úmido em determinado estado $\left(\frac{cal}{s}; \frac{kJ}{s}; kW\right)$;

m_x : Vazão mássica do componente x presente na mistura $\left(\frac{mol}{s}\right)$;

h_x : Entalpia específica do componente x presente na mistura $\left(\frac{cal}{mol}; \frac{kJ}{mol}; \frac{kJ}{kg}\right)$.

3.18 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

De acordo com Sperling e Chernicharo (2005), o princípio da conservação de massa é à base dos balanços de massa dos sistemas físicos, relatando que a massa presente no processo não pode desaparecer ou surgir espontaneamente, apenas ser transformada ao longo do tempo.

O princípio do balanço de massa também pode englobar a parcela de energia de forma simultânea, gerando um balanço de massa e energia que é a base para quantificar, por exemplo, os processos de secagem térmica de lodo.

Os balanços de massa e energia podem ser representados pelo modelo descrito por Moran e Shapiro (2014) e que se encontra transcrito, simplificado, numa representação didática pela Equação 20.

(Equação 20)

$$\left(\begin{array}{c} \text{VARIÇÃO DA MASSA} \\ \text{E ENERGIA CONTIDA} \\ \text{NO SISTEMA} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{SOMA DOS FLUXOS DE} \\ \text{MASSA E ENERGIA QUE} \\ \text{ENTRAM NO SISTEMA} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{SOMA DOS FLUXOS DE} \\ \text{MASSA E ENERGIA QUE} \\ \text{DEIXAM O SISTEMA} \end{array} \right)$$

Comumente são considerados os sistemas termodinâmicos como volumes de controle em regime permanente para fins de modelagem, pois os mesmos não apresentam variações nas taxas de massa e energia entre a entrada e a saída do sistema ao longo do tempo. Portanto, somente se aplica esta consideração, que

engloba a Equação 20, aos sistemas que estão em operação contínua e nunca durante períodos transientes (acionamento ou desligamento), reduzindo a margem de erro e a complexidade da modelagem (MORAN e SHAPIRO, 2014).

Utilizando os trocadores de calor para exemplificar um balanço de massa e energia teórico, Moran e Shapiro (2014) realizam o balanço considerando que a fronteira do sistema termodinâmico existe nos limites físicos do trocador de calor e, diante disso, considera as seguintes parcelas no balanço:

- a. Quantidade de calor trocado com a vizinhança (Q_{VC});
- b. Trabalho realizado no trocador de calor (W_{VC});
- c. Energia cinética ($V^2/2$) e energia potencial (gz) do escoamento do fluido;
- d. Parcelas relacionadas com a variação de massa e entalpia específica (mh).

Neste contexto, partindo da conservação de massa e energia do volume de controle, pode-se descrever o balanço, inicialmente, pela Equação 21.

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$\sum_{\text{entrada}} \text{fluxos} = \sum_{\text{saída}} \text{fluxos}$$

(Equação 21)

$$0 = Q_{VC} - W_{VC} + \sum_{\text{entrada}} m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_{\text{saída}} m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

De acordo com os autores, pode-se considerar com boa aproximação as seguintes considerações:

- O único trabalho realizado é o exercido pelo escoamento dos fluidos na entrada e saída do sistema, logo, o termo ligado ao trabalho desaparece do equacionamento;
- As energias cinéticas e potenciais podem ser desconsideradas neste tipo de modelo em regime permanente;
- Sendo o trocador de calor um sistema que apresenta o objetivo de interagir, direta ou indiretamente, com os fluidos entrando e saindo do sistema, pode-se considerar nula a transferência de calor com a vizinhança.

Tais considerações resultam na Equação 22 que correlaciona o balanço de massa e energia aos valores de vazão mássica e entalpia na entrada e saída do volume de controle em regime permanente.

(Equação 22)

$$\sum_{ent} m_e h_e = \sum_{sai} m_s h_s$$

Sendo:

m_e : Vazão mássica de entrada no volume de controle $\left(\frac{mol}{s}; \frac{kg}{s}\right)$;

h_e : Entalpia específica de entrada no volume de controle $\left(\frac{cal}{mol}; \frac{cal}{kg}; \frac{kJ}{mol}; \frac{kJ}{kg}\right)$;

m_s : Vazão mássica de saída no volume de controle $\left(\frac{mol}{s}; \frac{kg}{s}\right)$;

h_s : Entalpia específica de saída no volume de controle $\left(\frac{cal}{mol}; \frac{cal}{kg}; \frac{kJ}{mol}; \frac{kJ}{kg}\right)$.

3.19 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são dispositivos empregados nas mais diversas áreas da engenharia e não se restringem apenas ao uso industrial, mas também doméstico. Torres de resfriamento, condensadores de vapor, umidificadores de ar, serpentinas para aquecimento de água, radiadores para dissipação de calor em automóveis e outros dispositivos são exemplos práticos de trocadores de calor encontrados no cotidiano das pessoas (MORAN e SHAPIRO, 2014).

O conceito dos trocadores de calor é baseado na premissa de permitir, de forma facilitada, a passagem de energia na forma de calor entre um meio e outro pelo contato direto ou indireto dos mesmos, podendo apresentar diversos métodos e configurações para atender a sua função, conforme ilustra a Figura 18.

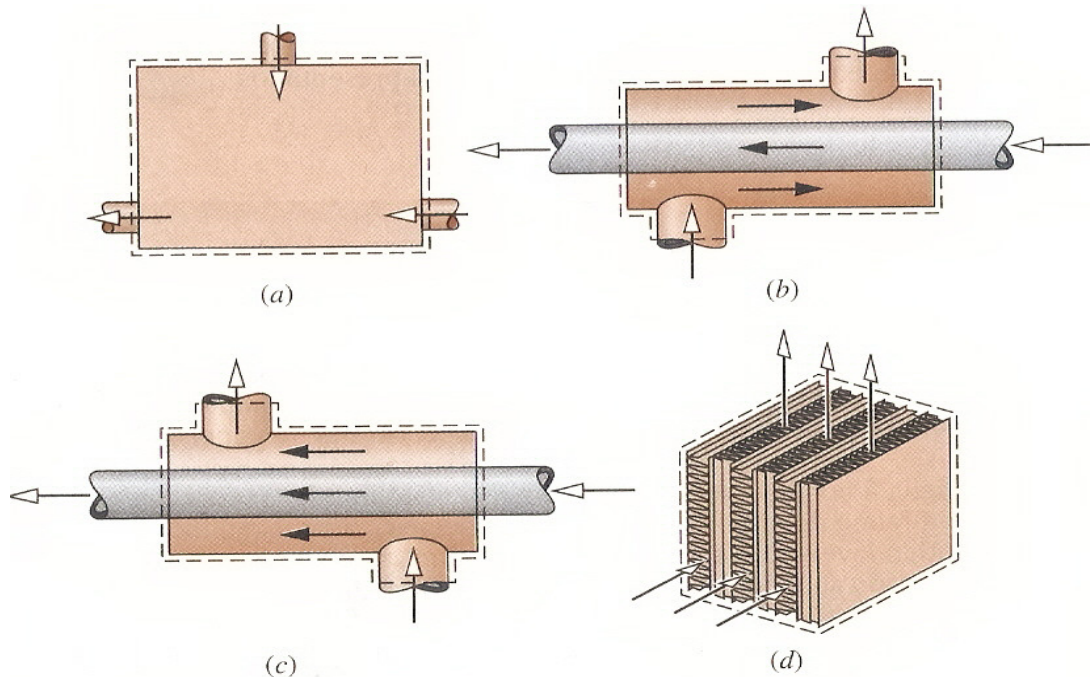


Figura 18 – Modelos de trocadores de calor. (a) Contato direto, (b) Duplo tubo em contracorrente, (c) Duplo tubo em escoamento paralelo e (d) Aletado de fluxo cruzado.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

Os trocadores de calor ainda podem ser classificados em relação ao estado físico ou constituinte dos fluídos utilizados, por exemplo, trocadores ar/gás, ar/líquido, gás/gás, líquido/sólido, ar/sólido, entre outras combinações.

Diversos processos termodinâmicos clássicos fazem uso de trocadores de calor, merecendo destaque, em função do tema abordado neste estudo os resfriadores evaporativos, desumidificadores por resfriamento e regeneradores de calor.

3.20 METODO DA EFETIVIDADE-NUT PARA TROCADORES DE CALOR

De acordo com Incropera *et al.* (2014), para dimensionar um trocador de calor quando as únicas informações conhecidas são as temperaturas e vazões mássicas de entrada dos fluidos quente e frio, torna-se vantajoso o emprego do procedimento alternativo denominado de *efetividade*-NUT ou ε -NUT.

Baseado na conservação de energia em um trocador de calor que representa um sistema termodinâmico fechado, admite-se que a quantidade de energia trocada pelo fluxo quente (Q_q) será igual à quantidade de energia trocada pelo fluxo frio (Q_f),

sendo a máxima quantidade de calor trocado uma função da diferente máxima de temperatura entre a fonte quente e fria ($T_{q,ent} - T_{f,ent}$).

Baseado neste princípio, o método consiste em identificar a quantidade de calor trocado pelo fluxo de menor capacidade térmica (C_{min}) em função da maior variação de temperatura do mesmo – simulando um trocador de calor com a máxima troca possível (Q_{max}), conforme pode ser observado na Equação 23.

$$Q_{max} = C_{min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})$$

(Equação 23)

Baseado na diferença entre as capacidades térmicas, a equação acima pode ser descrita das seguintes formas.

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$C_f < C_q \quad Q_{max} = C_f(T_{q,ent} - T_{f,ent})$$

Na situação inversa,

$$C_q < C_f \quad Q_{max} = C_q(T_{q,ent} - T_{f,ent})$$

Sendo:

C_f : Capacidade térmica da fonte fria;

C_q : Capacidade térmica da fonte quente.

Tal condição de máxima troca seria possível para um trocador de calor idealizado, onde a área superficial tenderia ao infinito para alcançar o equilíbrio térmico dos dois fluidos. Entretanto, no processo real a possibilidade de uma área infinita não é praticada e nem plausível, surgindo, assim, o conceito de *efetividade* (ε) que é definida e descrita por Incropera *et al.* (2014) da seguinte maneira:

[...] razão entre a taxa de transferência de calor real em um trocador de calor e a taxa de transferência de calor máxima possível [...] Por definição, a efetividade, que é adimensional, tem que estar no intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (Incropera *et al.*, 2014, 461p).

A efetividade, conforme mencionada pelo autor, é representada pela Equação 24.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$

(Equação 24)

Sendo:

ε : efetividade;

Baseado neste conceito, a definição da taxa real de transferência de calor em um trocador de calor pode ser expressa pela Equação 25.

$$Q = \varepsilon C_{min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})$$

(Equação 25)

A efetividade permite a separação entre um trocador de calor idealizado e outro real, no primeiro a troca de calor seria máxima e os dois fluidos tenderiam a manter uma variação de temperatura nula, enquanto para o trocador de calor real a existência de uma variação de temperatura sempre ocorrerá e será proporcional a efetividade.

A Figura 19 ilustra a distribuição de temperatura em trocadores de calor em contracorrente numa operação real e idealizado.

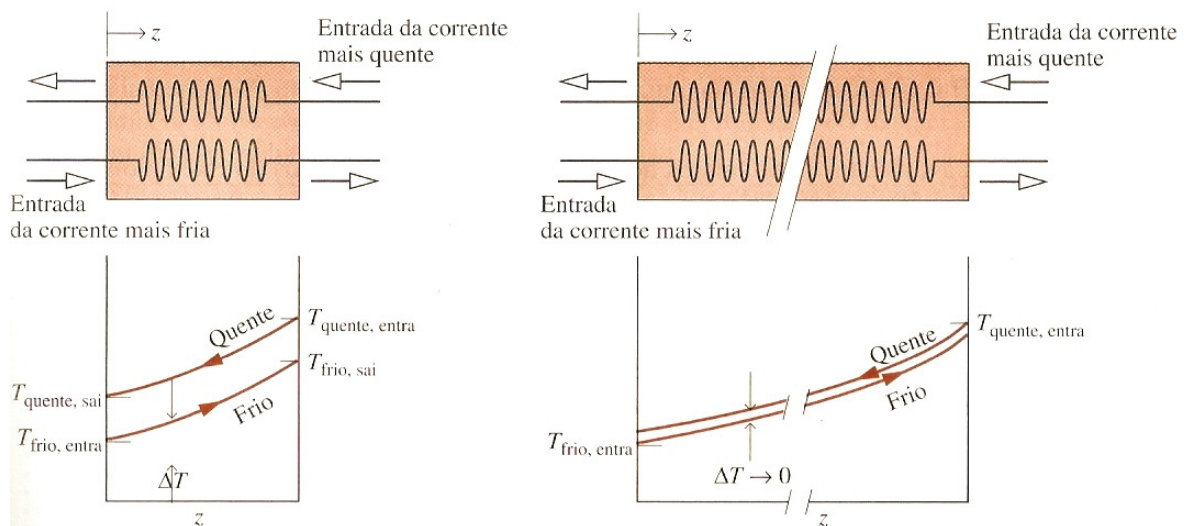


Figura 19 – A esquerda a distribuição de temperatura em um trocador de calor real e a direita um idealizado com área superficial tendendo ao infinito.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

Diante do conhecimento das temperaturas de entrada e a definição de uma efetividade com base no tipo de fluido e a troca requerida, pode ser determinar as temperaturas de saída de ambos os fluidos por meio de um balanço de massa e energia, conforme é possibilitado pela Equação 26, por exemplo, para a fonte fria.

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$Q = Q_f$$

$$\varepsilon C_{min}(T_{q,ent} - T_{f,ent}) = C_f(T_{f,sai} - T_{f,ent})$$

(Equação 26)

$$T_{f,sai} = \left[\frac{\varepsilon C_{min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})}{C_f} \right] + T_{f,ent}$$

Os valores de efetividade são variáveis em função da relação entre as capacidades térmicas (C_{min}/C_{max}) e o número NUT, sendo o último dependente de variáveis como a configuração e tipo do trocador de calor. A Figura 20 ilustra as típicas efetividades em função do número NUT e capacidades térmicas num trocador de calor do tipo contracorrente.

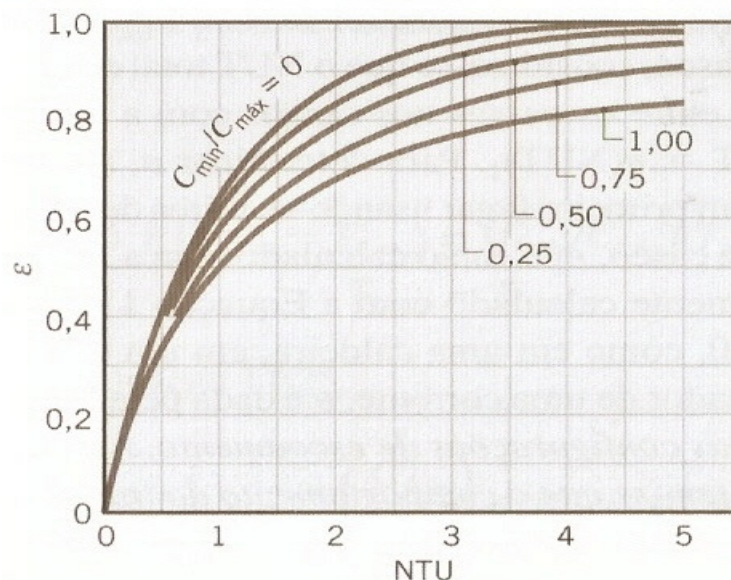


Figura 20 – Efetividade em trocadores de calor contracorrente para diversos tipos de fluídos.

Fonte: Incropera *et al*, 2014.

Trocadores de calor do tipo regeneradores, empregados para recuperar energia e aproveitar no próprio sistema, apresentam típicos valores de efetividade entre 0,6 e 0,8, podendo alcançar em concepções otimizadas o valor de 0,88 com perda de pressão de 2,5% sobre a entrada (CERQUEIRA, 1999; MORAM E SHAPIRO, 2014).

Tal efetividade descrita é plausível e confirmada numa primeira análise da Figura 20 que mostram efetividades superiores aos 0,8 nas curvas dos calores específicos de razão 0,25 e 1,00 para valores inferiores aos 2 e 4 NUT, respectivamente.

Regeneradores são trocadores de calor que apresentam no seu principal objetivo recuperar parte da energia descartada por processos produtivos e que ainda apresenta a capacidade de realizar trabalho, possibilitando o aumento da eficiência global do sistema. Por exemplo, na Figura 21 um regenerador é utilizado para recuperar uma parcela da energia térmica na saída de uma turbina que opera com Ciclo de Ar Padrão Brayton, gerando o aumento da energia do fluido que sai do compressor do estado 2 para o estado x, reduzindo, assim, a energia proveniente da queima de combustíveis (Q_{entra}) para que o fluido alcance o estado 3.

O diagrama de temperatura por entropia na mesma figura ilustra o trecho de 2 até x que representa a atuação do regenerador e a economia de energia gerada.

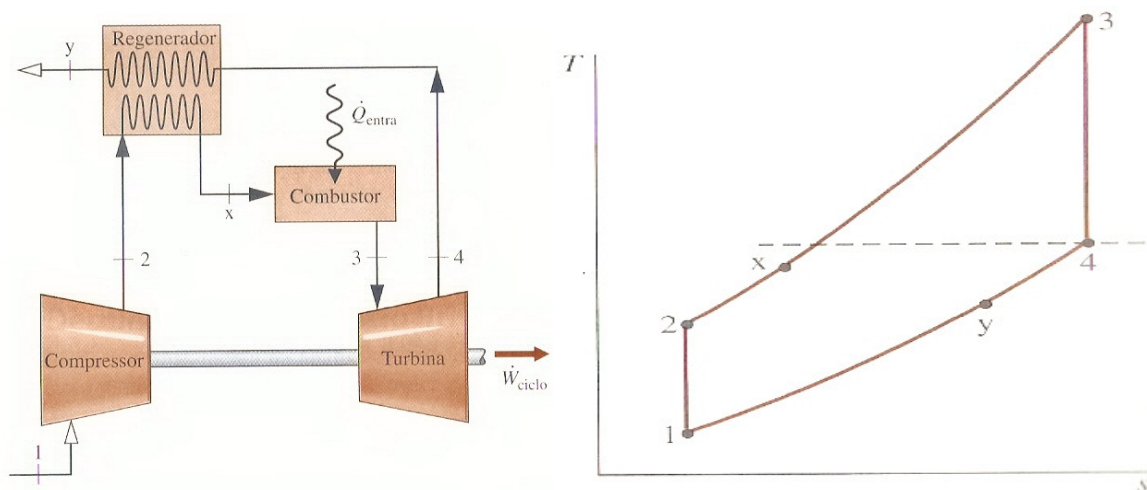


Figura 21 – A esquerda uma representação de um Ciclo de ar padrão Brayton regenerativo e a direita o diagrama das variações no fluido de trabalho ao longo do ciclo de operação.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

Moran e Shapiro (2014) explicam o uso do regenerador e a sua importância ambiental e econômica na passagem a seguir:

A temperatura de saída de uma turbina a gás simples é normalmente bem acima da temperatura ambiente. Em conseqüência, o gás quente de escape da turbina possui uma utilidade termodinâmica significativa (exergia), que seria irremediavelmente perdida se o gás fosse descarregado diretamente nas vizinhanças. Uma maneira de utilizar esse potencial é por meio de um trocador de calor chamado regenerador, o qual permite que o ar que deixa o compressor seja *preaquecido* antes de entrar no combustor, reduzindo-se, dessa forma, a quantidade de combustível que deve ser queimada no combustor (Moran e Shapiro, 2014, 412p).

3.21 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO E SATURADOR ADIABÁTICO

Dentro dos processos que a psicrometria é utilizada, os sistemas de resfriamento evaporativo são um dos mais relevantes e que foi empregado para a compreensão e desenvolvimento do método de secagem e higienização de lodo por energia térmica em baixas temperaturas que é a proposta deste estudo.

De acordo com Soares *et al.* (2011), o resfriamento evaporativo é a passagem forçada de ar com umidade relativa inferior a saturação por meio de um painel poroso que contenha água no seu interior, gerando a evaporação do líquido para o ar durante a passagem pelo painel.

Incropera *et al.* (2014) relatam que a origem da energia pode vir do próprio líquido ou ar, mas também de uma fonte externa em alguns casos.

A energia necessária para sustentar a evaporação tem que vir da energia interna do líquido, que deve então experimentar uma redução na temperatura (o efeito do resfriamento). No entanto, se condições de regime estacionário forem mantidas, a energia latente perdida pelo líquido em função da evaporação tem que ser repostada pela transferência de energia para o líquido a partir de sua vizinhança. Desprezando efeitos radiantes, essa transferência pode ser devida à convecção de energia sensível a partir do gás ou devida à adição de calor por outros meios [...] (Incropera *et al.*, 2014, 262-263p).

A Figura 22 ilustra o processo de resfriamento evaporativo com a configuração do ar passando por um painel poroso com água líquida e a representação numa carta psicrométrica a variação de temperatura, entalpia e umidade absoluta.

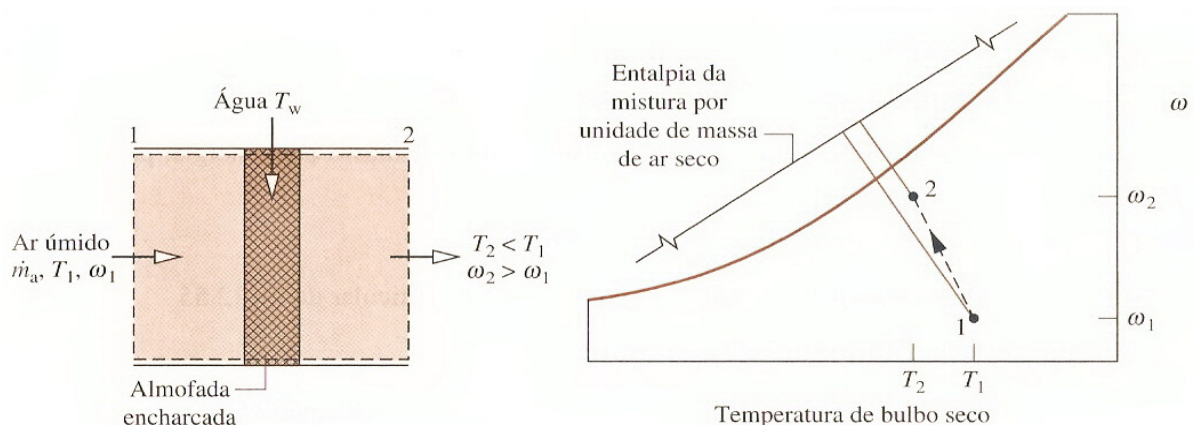


Figura 22 – Esquema de um resfriador evaporativo e a representação do processo na carta psicrométrica.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

Considerando que o processo acima não realiza trabalho e nem variação de energia cinética e potencial, tão pouco troca de calor com a vizinhança, pode-se expressar o balanço para um sistema operando em regime permanente pela Equação 27:

$$\frac{(h_{a_1} + \omega_1 h_{g_1})}{\text{AR ÚMIDO ENTRADA}} + \frac{(\omega_2 - \omega_1)h_L}{\text{ÁGUA EVAPORADA}} = \frac{(h_{a_2} + \omega_2 h_{g_2})}{\text{AR ÚMIDO NA SAÍDA}} \quad (\text{Equação 27})$$

Sendo:

- h_{a_1} : Entalpia específica do ar seco no estado 1 – entrada do evaporador $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;
 ω_1 : Umidade absoluta do ar no estado 1 – entrada do evaporador $\left(\frac{kg \text{ vapor d'água}}{kg \text{ de ar seco}}\right)$;
 h_{g_1} : Entalpia específica do vapor d'água no estado 1 – entrada do evaporador $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;
 ω_2 : Umidade absoluta do ar no estado 2 – entrada do evaporador $\left(\frac{kg \text{ vapor d'água}}{kg \text{ de ar seco}}\right)$;
 h_L : Entalpia específica da água líquida presente no evaporador $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;
 h_{a_2} : Entalpia específica do ar seco no estado 2 – saída do evaporador $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;
 h_{g_2} : Entalpia específica do vapor d'água no estado 2 – saída do evaporador $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Cada parcela da equação representa um constituinte do processo de umidificação evaporativo, sendo que a parcela física da água evaporada é calculada pela diferença de umidade absoluta entre a entrada e saída do umidificador, pois o sistema é conservativo em sua massa e considera que toda a água líquida evaporada foi incorporada ao ar seco.

Baseado na conservação de energia, conclui-se que a parcela da energia presente no ar de entrada foi utilizada para a evaporação da água líquida, portanto, a entalpia específica do ar seco e do vapor d'água na saída devem ser inferiores a entalpia de entrada e, conseqüentemente, uma menor temperatura da mistura será obtida.

Tal fenômeno utilizado nos umidificadores evaporativos é baseado na evaporação da água sem a necessidade de atingir o ponto de ebulição que ao nível do mar seria de 100°C.

A eficiência dos sistemas evaporativos pode variar em grande proporção, pois as taxas de transferência de massa e energia alteram significativamente com a velocidade da passagem do ar, superfície de contato, temperatura e umidade de entrada.

Quando a eficiência alcança 100%, considera-se que o ar que sai do sistema evaporativo atingiu a condição de saturado para a temperatura e pressão de

trabalho. Tal condição é estudada no sistema de saturação adiabática que apresenta na sua concepção um dispositivo com superfície e tempo de contato suficiente para garantir o estado de saturação do ar de saída, conforme mostra a Figura 23.

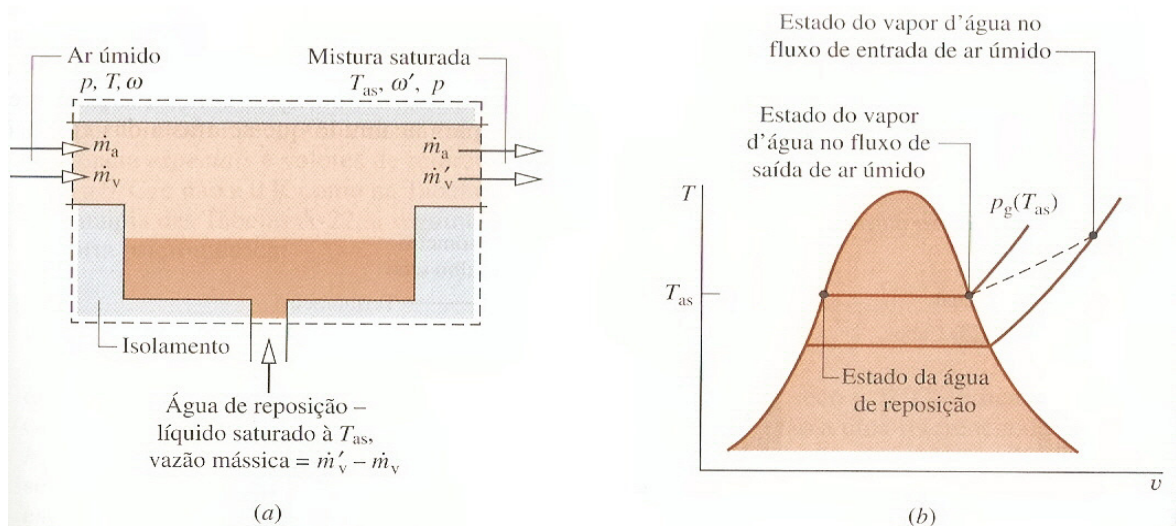


Figura 23 – Esquema didático de um saturador adiabático (a) e a representação de diagrama temperatura por volume específico do processo de saturação adiabática.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

Moran e Shapiro (2014) afirmam que o balanço de massa e energia para o saturador adiabático é semelhante ao resfriamento evaporativo, entretanto, as entalpias são em função do vapor saturado, além de relacionar entalpia e temperatura. O equacionamento proposto pelo autor, resultando na umidade absoluta de saturação, pode ser observado na Equação 28.

$$\omega_{sat} = \frac{[h_a(T_{sat}) - h_a(T)] + \omega_2 [h_g(T_{sat}) - h_f(T_{sat})]}{h_g(T) - h_f(T_{sat})} \quad \text{(Equação 28)}$$

A umidade absoluta saturada pode ser obtida pela adaptação da Equação 8 para trabalhar com a pressão de saturação do vapor d'água, gerando a Equação 29.

$$\omega_{sat} = 0,62198 \left(\frac{p_g(T_{sat})}{p - p_g(T_{sat})} \right) \quad \text{(Equação 29)}$$

Sendo:

$p_g(T_{sat})$: Pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da mistura.

3.22 TORRES DE RESFRIAMENTO

Semelhante ao caso do resfriamento evaporativo, as torres de resfriamento são equipamentos que apresentam no seu principal objetivo a troca de calor e massa do líquido para o ar por meio do calor sensível e do calor latente de evaporação, permitindo que a água de saída alcance uma temperatura inferior ao da entrada.

A modelagem termodinâmica de uma torre de resfriamento apresenta uma complexidade maior do que o resfriamento evaporativo apresentado, pois neste tipo de processo os fluidos que entram e saem do sistema apresentam temperaturas distintas e nem toda a água líquida é evaporada. A Figura 24 retrata uma típica torre de resfriamento por convecção forçada e que opera em contracorrente.

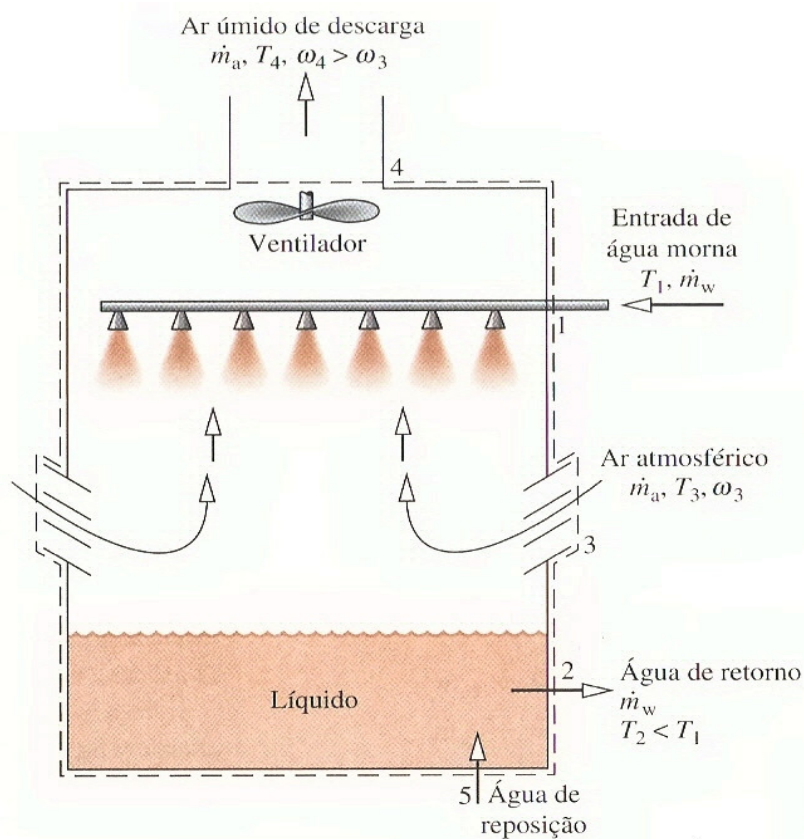


Figura 24 – Ilustração didática de uma torre de resfriamento por convecção forçada e em contracorrente com os principais fluxos de entrada e saída representados.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

Tendo como base que os limites físicos da torre de resfriamento que foi ilustrada na figura acima são a representação da fronteira termodinâmica, somado as considerações que a torre é um volume de controle em regime permanente, a transferência de calor para a vizinhança é desprezível e nenhuma variação de

energia cinética e potencial são representativas, pode-se equacionar o balanço de massa e energia do sistema, a partir do princípio da conservação, pela Equação 30.

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$\sum_{\text{entrada}} mh = \sum_{\text{saída}} mh$$

(Equação 30)

$$m_1 h_{w1} + (m_a h_{a3} + m_{v3} h_{v3}) + m_5 h_{w5} = m_2 h_{w2} + (m_a h_{a4} + m_{v4} h_{v4})$$

Sendo:

m_1 : Vazão mássica de água líquida não saturada na entrada da torre $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_{w1} : Entalpia da água líquida na entrada da torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

m_a : Vazão mássica de ar seco na entrada da torre $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_{a3} : Entalpia do ar seco na entrada da torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

m_{v3} : Vazão mássica de vapor d'água na entrada da torre $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_{v3} : Entalpia do vapor d'água na entrada da torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

m_5 : Vazão mássica de água líquida de reposição que entra na torre $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_{w5} : Entalpia da água líquida não saturada de reposição que entra na torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

m_2 : Vazão mássica da água líquida não saturada que sai da torre $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_{w2} : Entalpia da água líquida que sai da torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

h_{a4} : Entalpia do ar seco que sai da torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

m_{v4} : Vazão mássica de vapor d'água que sai da torre $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

h_{v4} : Entalpia do vapor d'água que sai da torre $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Considerando o sistema conservativo e que a vazão de água líquida de reposição é igual à vazão de água evaporada, então:

$$m_1 = m_2;$$

$$m_5 = m_a(\omega_4 - \omega_3);$$

$$m_{v3} = \omega_3 m_a; m_{v4} = \omega_4 m_a.$$

Rearranjando a equação 30 em função do ar de saída, resulta-se na Equação 31.

(Equação 31)

$$m_a(h_{a4} + \omega_4 h_{v4}) = m_1(h_{w1} - h_{w2}) + m_a[(h_{a3} + \omega_3 h_{v3}) + (\omega_4 - \omega_3)h_{w5}]$$

Sendo:

ω_3 : Umidade absoluta do ar de entrada na torre $\left(\frac{kg \text{ vapor d'água}}{kg \text{ ar seco}}\right)$;

ω_4 : Umidade absoluta do ar úmido na saída da torre $\left(\frac{kg \text{ vapor d'água}}{kg \text{ ar seco}}\right)$.

3.23 PROCESSOS ISENTRÓPICOS EM COMPRESSORES DE AR

Moran e Shapiro (2014) relatam que os processos isentrópicos estudam as propriedades de determinadas substâncias, entre dois estados, quando não ocorrem variações de entropia. No caso do ar, pode-se associar uma variação de pressão e temperatura sem variação de entropia, conforme mostra a Equação 32.

(Equação 32)

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Sendo:

T_1 : Temperatura inicial ou no estado 1 (°C; K);

T_{2s} : Temperatura final isentrópica ou no estado 2s (°C; K);

p_1 : Pressão inicial ou no estado 1 (bar);

p_2 : Pressão final ou no estado 2 (bar);

k : Constante (adimensional).

A constante k é obtida pela relação entre os calores específicos do ar para uma determinada temperatura. K. Wark (1983 *apud* MORAN e SHAPIRO, 2014) descreve a constante k com o valor de 1,400 para o ar na temperatura de 300K ou 26,75°C.

3.23.1 Eficiência Isentrópica em Compressores

No deslocamento de ar por equipamentos mecânicos o desempenho da máquina deve ser considerado, pois alterações no volume, pressão, temperatura e, por conseqüência, energia mecânica e entalpia podem ocorrer. Por esse motivo a temperatura no estado 2, considerando a Equação 32, é diferente da real, pois o equipamento mecânico incorporará no fluido uma parte da energia disponibilizada para realizar o trabalho, surgindo, assim, a idéia de eficiência isentrópica que relaciona a parcela de energia incorporada no ar ao final da compressão.

Moran e Shapiro (2014) relatam que a eficiência isentrópica de compressores e bombas têm por objetivo avaliar a variação de propriedades geradas no fluido entre a entrada e saída no equipamento mecânico utilizado para o deslocamento.

Eficiências isentrópicas envolvem a comparação entre o desempenho real de um equipamento e o desempenho que seria atingido em condições idealizadas para o mesmo estado inicial e a mesma pressão de saída (Moran, Shapiro, 2014, 252p).

Conhecendo a entalpia do ar na entrada do compressor, com a eficiência isentrópica é possível estimar a referida propriedade na saída com a Equação 33.

Equação 33

$$\eta_{IS} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Sendo:

η_{IS} : Eficiência isentrópica (adimensional);

h_{2s} : Entalpia isentrópica de saída do compressor $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

h_1 : Entalpia no estado 1 ou entrada do compressor $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

h_2 : Entalpia no estado 2 ou saída do compressor $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

A eficiência isentrópica em função da temperatura é representada pela Equação 34.

Equação 34

$$\eta_{is} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

Sendo:

T_{2s} : Temperatura isentrópica na saída do compressor ($^{\circ}C$; K);

T_2 : Temperatura no estado 2 ou real na saída do compressor ($^{\circ}C$; K);

A representação gráfica de uma compressão pode ser observada no diagrama de Mollier, Figura 25, que mostra o ponto 2s com a entalpia alcançada no caso isentrópico e o ponto 2 que representa o estado real do fluido após a compressão.

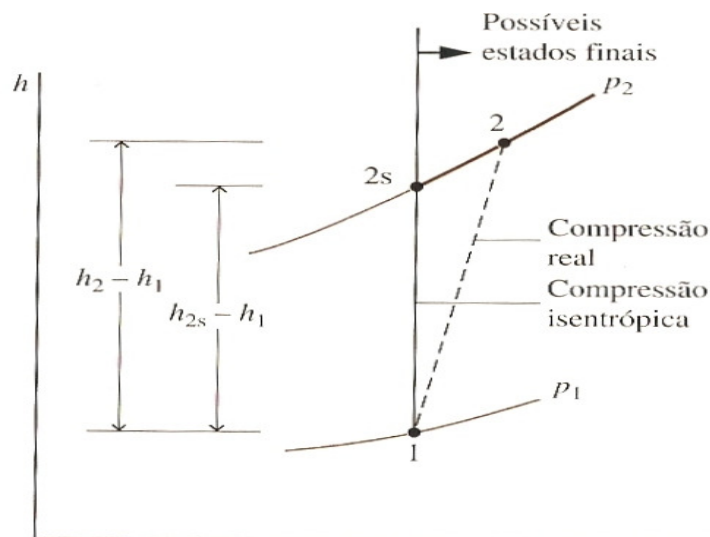


Figura 25 – Ilustração didática da variação de entalpia numa compressão isentrópica e outra real.

Fonte: Moran e Shapiro, 2014.

As eficiências isentrópicas típicas para compressores variam na faixa de 75 a 85% (MORAN E SHAPIRO, 2014).

4. METODOLOGIA

4.1 DELINEAMENTO DO ESTUDO

O presente estudo investiga o potencial de secagem de lodo biológico pelo aproveitamento da energia térmica de baixa temperatura que é presente no ar do sistema de aeração de uma ETE de Lodo Ativado. Sendo o resultado final da investigação a quantidade de lodo que poderá ser secado pelo calor dos sopradores nas condições definidas na metodologia.

A avaliação do potencial de secagem foi realizada por meio de um modelo termodinâmico que integra a energia térmica disponível de uma fonte quente – neste estudo é representada pelo ar na saída dos sopradores da ETE de Lodo Ativado – com a demanda de energia térmica para secar em baixas temperaturas o lodo úmido – que neste caso foi representado pela produção de lodo biológico da própria estação utilizada como exemplo.

O modelo termodinâmico deste estudo foi desenvolvido com o objetivo específico de trabalhar com transferência de massa e energia em baixas temperaturas, além da regeneração de calor do próprio processo de secagem para aumentar a eficiência global do sistema desenvolvido.

O estudo foi composto, além do modelo termodinâmico, por uma pesquisa documental sobre as características dos sopradores, processo de tratamento que originou o lodo desaguado e dados climatológicos do município onde a estação, tomada como exemplo, fica localizada. Adicionalmente, medições em campo de determinados parâmetros foram realizadas para completar os dados necessários para alimentar o modelo termodinâmico de secagem de lodo (MTSL), além de possibilitar e ilustrar as discussões acerca do objetivo de estudo.

4.2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na ETE Araçás, localizada no município de Vila Velha, estado do Espírito Santo. A unidade possui configuração do tipo Lodo Ativado e faz uso da tecnologia belga que é denominada UNITANK.

A instalação pertence à Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), sendo a gestão da operação, manutenção e monitoramento ambiental realizada por empresa terceirizada de origem privada.

A Figura 26 retrata, numa visão aérea, a ETE Araçás com destaque para os reatores dos sistemas secundários e os galpões de equipamentos.



Figura 26 – Vista aérea da ETE Araçás, Vila Velha/ES, ano de 2015.

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 2 apresenta as principais informações sobre a capacidade de tratamento utilizada em 2014 e a prevista em projeto para a ETE Araçás.

Tabela 2 – Capacidades de projeto e utilizada na ETE Araçás em 2014.

ETE ARAÇÁS				
REFERENCIA	Vazão Média Diária		DBO Média	Carga Orgânica Média
	L/s	m ³ /d	mg/l	Kg DBO/dia
PROJETO	399	34.489	296	10.209
2014	308	26.620	253	6.737

Fontes dos Dados: Seghers Képpel, 2003; CESAN, 2015.

4.3 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO ESTUDO

O estudo foi constituído por 9 etapas principais, abrangendo da revisão bibliográfica das informações e dados necessários para o desenvolvimento do modelo termodinâmico e finalizando com os resultados finais. Tais etapas, com as suas ordens e interações, são retratadas pelo fluxograma apresentado na Figura 27.

Para permitir a compreensão das variáveis e métodos adotados para cada fase do estudo, o detalhamento de cada etapa será descrito nos próximos subtópicos da metodologia, exceto as etapas 1 e 2 que correspondem a revisão bibliográfica, apresentada no tópico 3.0 e nas suas derivações, e a etapa 3 que será apresentada em conjunto com a etapa 7.

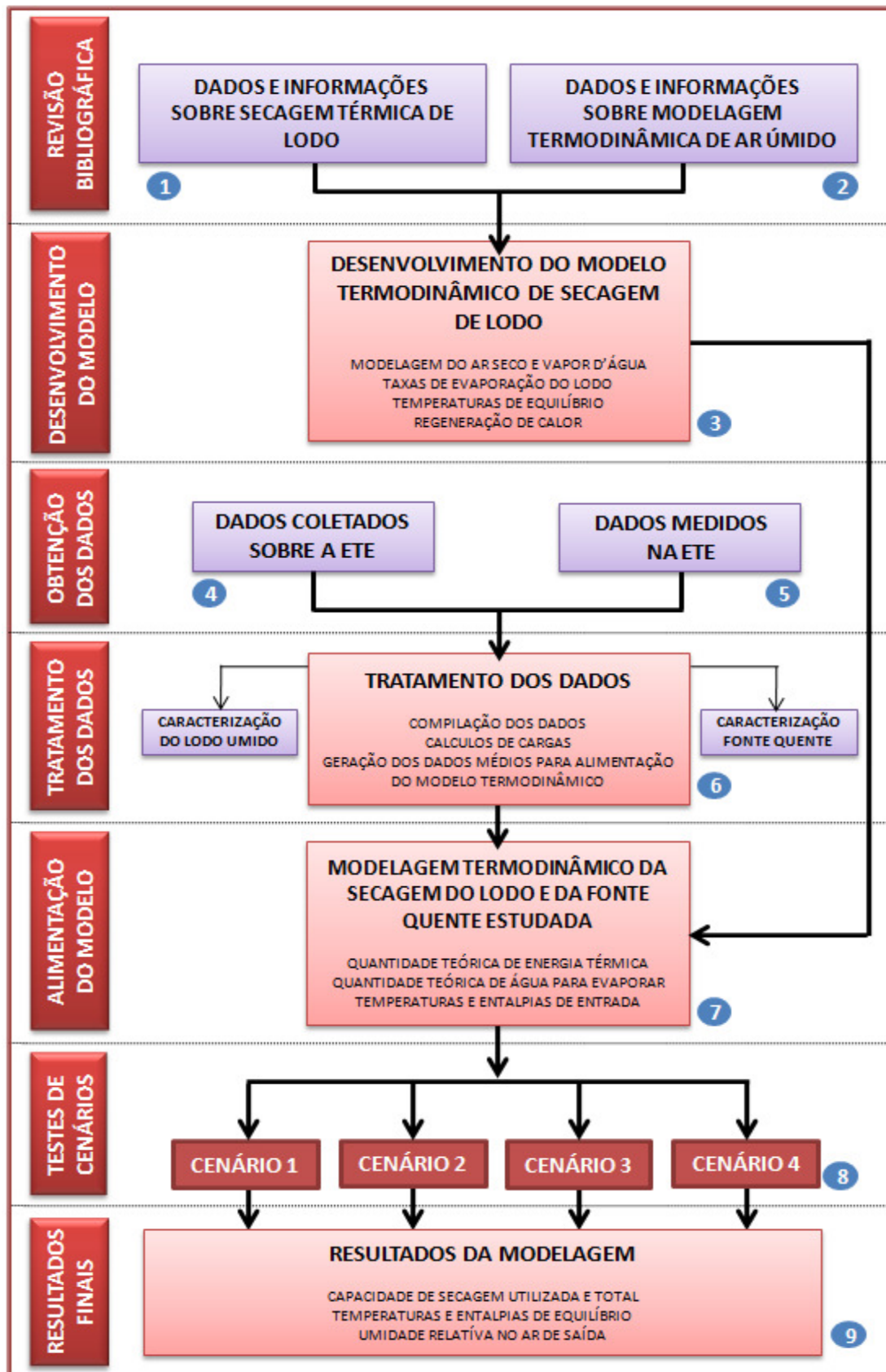


Figura 27 – Fluxograma das principais etapas do estudo e as respectivas ordens. Produção do próprio autor.

4.4 OBTENÇÃO DOS DADOS

Os dados para alimentar o modelo termodinâmico, com relação ao estudo realizado na ETE Araçás, foram constituídos por dados coletados sobre a estação e dados medidos na estação, sendo o primeiro oriundo de fontes bibliográficas e o segundo obtidas em campo.

A coleta e monitoramento de dados foram realizados entre os períodos de setembro de 2013 a outubro de 2015, entretanto, para garantir valores médios da produção de lodo que considerem as flutuações climáticas anuais que são decorrentes das estações do ano, foram alimentados no MTSL os dados obtidos apenas no ano de 2014 e nas condições previstas no projeto de dimensionamento da estação.

4.4.1 Dados Coletados Sobre a Estação

Os dados coletados foram constituídos pelas informações sobre os equipamentos eletromecânicos, históricos de vazões de esgoto bruto e produção de lodo, temperaturas de bulbo seco disponíveis, além de dados climatológicos e outros itens de relevância sobre a ETE Araçás e que estavam registrados nos manuais de operação e manutenção, desenhos e manuais técnicos dos fabricantes, monitoramento ambiental da unidade, bem como literatura técnica e científica que abordavam o tema estudado foram utilizados.

A seguir estão descritos os principais dados que foram levantados sobre a ETE Araçás para o ano de 2014 e o previsto em projeto.

- Produção mensal de lodo úmido (ton/mês);
- Teor de umidade e sólidos totais no lodo desaguado (%);
- Vazão volumétrica de ar dos sopradores (m^3/s);
- Potência unitária e número de sopradores em operação (kW);
- Umidade relativa média anual no município de Vila Velha (%);
- Temperatura média anual no município de Vila Velha ($^{\circ}C$);
- Pressão atmosférica na localidade da ETE Araçás (bar).

Dados com menor especificidade também foram coletados, visando caracterizar o lodo produzido na unidade, os sopradores do sistema de aeração, além de possibilitar a ampliação das futuras discussões sobre os resultados alcançados:

- Dados dos conjuntos motores sopradores;
- Dados operacionais do tratamento secundário e do lodo produzido;
- Condições de operação que foram praticadas ao longo do ano de 2014;
- Dados sobre a capacidade de tratamento do esgoto e produção de lodo da ETE Araçás.

Exceto os dados climatológicos do município em que a ETE Araçás esta localizada, os demais dados foram obtidos, diretamente, na empresa privada Construtora Norberto Odebrecht S/A, responsável pela operação, manutenção e monitoramento ambiental da ETE Araçás durante o período do estudo. Posteriormente, os dados utilizados neste trabalho foram enviados para a divisão de pesquisa da CESAN para solicitar a autorização de uso e divulgação dos mesmos.

4.4.2 Dados Medidos na Estação

Os dados medidos foram originados por análises de parâmetros específicos em campo, compreendendo os seguintes itens:

- Termografia dos sopradores de ar e seus componentes;
- Temperatura de bulbo seco do ar soprado na descarga dos sopradores (°C);
- Temperatura de bulbo seco no ar da sucção dos sopradores – ar ambiente no galpão dos sopradores (°C).

Os monitoramentos citados foram realizados no interior do galpão dos sopradores pelo próprio pesquisador durante as visitas na ETE Araçás e, nos casos de medição noturna, pela equipe de operação local. A Figura 28 mostra o galpão dos sopradores.



Figura 28 – Galpão dos sopradores da ETE Araçás, local que foi realizado as medições de temperatura e termografia.

Fonte: Produção do próprio autor.

As imagens termográficas foram realizadas com uma câmera termográfica, modelo Box 3 e marca Flir Systems, semelhante a apresentada na Figura 29.



Figura 29 – Imagem ilustrativa de câmera termográfica da marca Flir.

Fonte: Flir, 2010.

O monitoramento de temperatura de bulbo seco foi realizado com o auxílio de um termômetro digital de haste metálica e corpo de ABS (Acrylonitrile Butadiene styrene) de marca Equitherm, modelo 315FM, escalada de medição de temperatura em graus Celsius e Fahrenheit com faixa de leitura de -50 até 300°C (-58 até 572°F) e precisão de 1°C para a primeira, conforme mostra a Figura 30.



Figura 30 – Termômetro digital de haste com leitura na escala de graus Celsius.

Fonte: Produção do próprio autor.

As medições de temperatura pelo termômetro citado foram realizadas nos seguintes pontos:

- Ar ambiente na parte interna do galpão dos sopradores – local que ocorre a sucção de ar dos equipamentos;
- Descargas de ar dos sopradores – local que apresenta a maior temperatura e as condições mais propícias para modelar a troca de calor com outro fluido por meio de um trocador de calor do tipo ar/ar.

A medição de temperatura na descarga de ar dos sopradores foi realizada, após a adaptação de um dispositivo para permitir o acoplamento do termômetro, no ponto já existente de medição de pressão.

A adaptação do dispositivo consistiu na instalação, posterior remoção do manômetro, de uma conexão do tipo nípel seguido de uma conexão do tipo CAP (tampão) na ponta do tubo derivado da descarga e que era utilizado para a medição de pressão.

O CAP foi perfurado no centro para produzir uma abertura circular de 5mm de diâmetro, possibilitando a passagem da haste do termômetro para realizar a medição de temperatura do ar que era descarregado do soprador.

A Figura 31 ilustra o local antes e depois da adaptação do dispositivo com o termômetro e a Figura 32 mostra com maiores detalhes a adaptação.

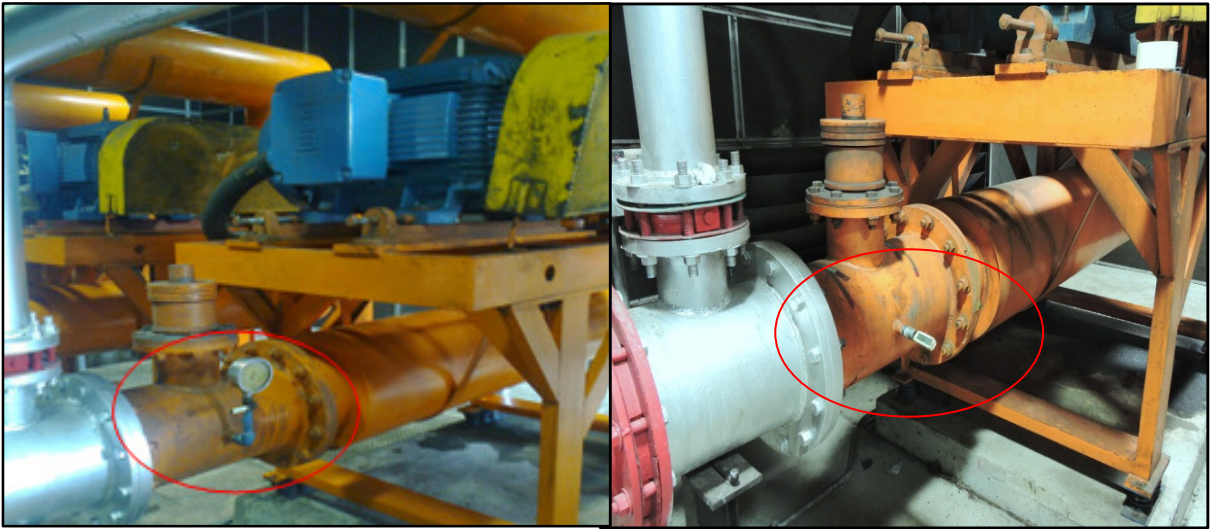


Figura 31 – A esquerda a forma original na descarga de um soprador e a direita com a adaptação do termômetro para realizar a medição de temperatura do ar.

Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 32 – Detalhe da adaptação do termômetro na descarga do soprador de ar.

Fonte: Produção do próprio autor.

4.5 TRATAMENTO DOS DADOS E CARACTERIZAÇÕES

De posse dos dados coletados e medidos, os mesmos foram agrupados, tabulados e avaliados de acordo com a sua natureza, situação que possibilitou a organização e obtenção de uma base de dados para caracterizar do lodo úmido e a fonte quente (soprador), além de fornecer os dados para alimentar o modelo termodinâmico de secagem de lodo.

Para todos os dados que apresentaram variações temporais foi aplicado o conceito da Média Aritmética Simples para que os resultados fossem usados no MTSL. Tais dados incluem, por exemplo, vazão de lodo desaguado por dia, temperatura do ar ao longo das horas, teores de sólidos no lodo desaguado, entre outros.

4.5.1 Caracterização da Fonte Quente

A fonte quente, que neste estudo foi representada pelo ar de saída dos sopradores do sistema de aeração por ar difuso da ETE Araçás, teve uma caracterização qualitativa por meio dos dados coletados nos desenhos técnicos dos sopradores, manuais de operação e manutenção, além das informações obtidas em campo por meio de medições e observações durante as visitas técnicas na unidade.

4.5.2 Caracterização do Lodo Úmido

O lodo úmido foi caracterizado qualitativamente por meio da identificação e descrição de sua origem no sistema, além dos processos que são utilizados para promover o seu tratamento. Enquanto a caracterização quantitativa ocorreu por meio da expressão dos seguintes parâmetros:

- Quantidade média de lodo gerado mensalmente no ano de 2014 (ton/mês);
- Teor médio de ST no lodo após a última etapa de tratamento (%);
- Relação entre as concentrações de sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos totais na etapa de digestão aeróbia do lodo (%).

4.6 MODELO TERMODINÂMICO DE SECAGEM DE LODO

4.6.1 Considerações Gerais Sobre o Modelo

O modelo termodinâmico de secagem de lodo (MTSL) é constituído em sua base por balanços de massa e energia entre uma fonte quente e o lodo úmido. No caso específico deste estudo, a fonte quente é o ar produzido pelos sopradores da ETE Araçás e o lodo úmido tem origem no lodo de excesso do próprio sistema de tratamento estudado.

O objetivo deste modelo termodinâmico foi verificar se a energia térmica disponível no ar descarregado pelos sopradores do sistema de aeração era suficiente para secar o lodo biológico produzido na própria unidade.

Os princípios termodinâmicos que envolveram o presente modelo foram baseados nas propriedades psicrométricas do ar úmido, transferência e conservação da massa e energia em volumes de controle com operação em regime permanente, eficiência isentrópica de compressores de ar, efetividade de trocadores de calor e, principalmente, evaporação da água líquida para o ar não saturado em temperaturas inferiores aos 100°C.

O MTSL foi modelado com base em dois fluxos principais, sendo que o primeiro é o fluxo de ar utilizado para a secagem do lodo, enquanto o segundo fluxo é o lodo úmido originado da estação estudada.

Sobre as origens dos fluxos, foi considerado que o ar de secagem é proveniente do interior do galpão dos sopradores da ETE Araçás e a geração do fluxo é realizada por um soprador auxiliar que estaria instalado no próprio galpão, sendo denominado durante o restante do estudo como soprador do MTSL. O lodo úmido tem origem no processo de centrifugação da referida estação e entraria no MTSL a partir da caçamba de armazenamento do processo de centrifugação.

A Figura 33 apresenta o galpão dos sopradores e o galpão de centrifugação e armazenamento de lodo úmido na ETE Araçás, sendo ambos os galpões adjacentes e germinados pela lateral. A Figura 34 ilustra os fluxos principais e os fluxos auxiliares do modelo, bem como as etapas que cada um apresenta participação.



Figura 33 – A esquerda o galpão dos sopradores e a direita o galpão de geração de lodo úmido pela centrífuga com a caçamba de armazenamento na ETE Araçás.
 Fonte: Produção do próprio autor.

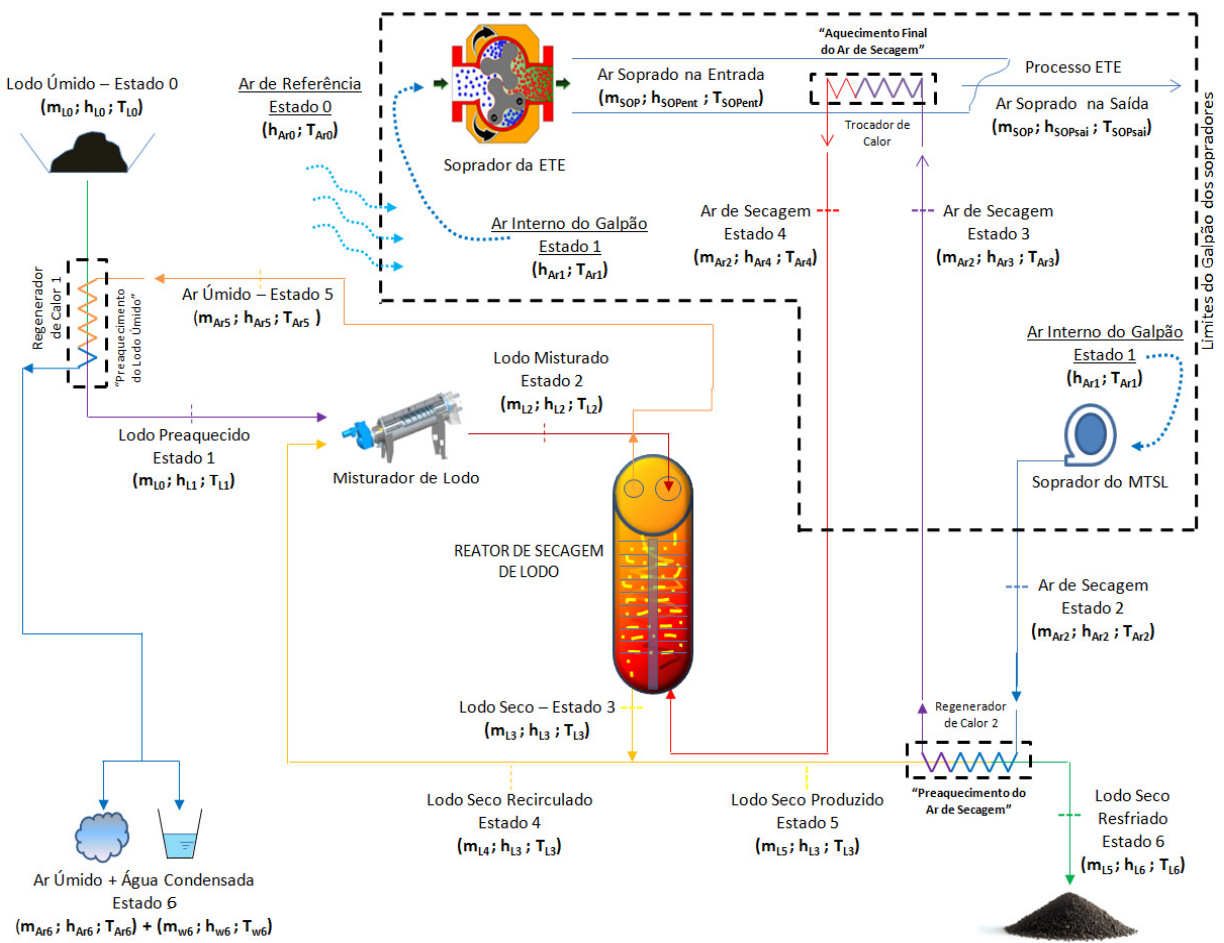


Figura 34 – Fluxograma ilustrativo das etapas previstas no MTSL desenvolvido para o estudo.
 Fonte: Produção do próprio autor.

O fluxo de ar de secagem que será modelado apresenta como referência de propriedades, extensivas e intensivas, o ar atmosférico que fica localizado na parte externa do galpão dos sopradores – pátio da ETE Araçás, sendo que o referido ar passa por 9 etapas entre a entrada e a saída do MTSL, conforme a Figura 33 e a relação em ordem de ocorrência a seguir.

- Entrada passiva do ar atmosférico da parte externa para a parte interna do galpão dos sopradores;
- Sucção do ar interno ao galpão pelos sopradores da ETE Araçás e pelo soprador do MTSL;
- Descarga do ar pelos sopradores da ETE Araçás e pelo soprador do MTSL;
- Preaquecimento do ar pelo contato indireto com o lodo seco produzido pelo secador de lodo (regenerador de calor 2 – Ar/Lodo Seco);
- Aquecimento final do fluxo de ar pelo contato indireto com o ar descarregado pelos sopradores da ETE Araçás (trocador de calor Ar/Ar);
- Entrada do ar no secador de lodo;
- Saída do ar do secador de lodo com redução de temperatura e aumento de massa pela evaporação de parcela da água presente no lodo;
- Resfriamento do ar e possível condensação de água pelo contato indireto com o lodo úmido produzido na estação (regenerador de calor 1 – Ar/Lodo Úmido);
- Saída do sistema na forma de ar úmido e, em alguns casos, de água condensada.

O fluxo de lodo úmido que será submetido a secagem térmica apresenta como referência as propriedades extensivas e intensivas do lodo úmido armazenado na caçamba que fica no pátio da ETE Araçás. Tal lodo úmido passa por 8 etapas entre a entrada e saída do MTSL, conforme a Figura 33 e a relação em ordem de ocorrência a seguir.

- Entrada no modelo do lodo úmido produzido no processo de centrifugação da ETE Araçás;
- Preaquecimento do lodo úmido pelo contato indireto com o ar de saída do reator de secagem de lodo (regenerador de calor 1 – Lodo Úmido/Ar);

- Mistura de lodo úmido preaquecido com o lodo seco recirculado para aumentar a concentração de ST e a temperatura da mistura;
- Entrada do lodo misturado no reator de secagem térmica;
- Saída do lodo do secador térmico com redução de umidade pela evaporação de parte da água líquida para o ar;
- Separação de parcela do lodo seco para recirculação e o restante segue para a etapa de resfriamento;
- Resfriamento do lodo seco produzido pelo contato indireto com o ar de saída do soprador do MTSL (regenerador de calor 2 – Lodo Seco/Ar);
- Saída do lodo seco produzido e resfriado do sistema.

As etapas de preaquecimento do lodo e do ar, além do aquecimento final do ar de secagem pelo ar dos sopradores da ETE Araçás, foram realizadas, teoricamente, por um trocador de calor de fluxo contracorrente e de contato indireto.

O objetivo dos trocadores de calor das etapas de preaquecimento foi realizar a regeneração de calor para aumentar a eficiência global do MTSL, pois os mesmos permitem recuperar e retornar ao sistema uma parcela da energia térmica que ficaria incorporada aos fluxos no momento de saída do reator de secagem.

O trocador de calor entre o ar de secagem e o ar dos sopradores (*fase de aquecimento final do ar de secagem*) tem como objetivo principal o aquecimento do ar de secagem para maximizar a capacidade de absorção de vapor d'água pelo fluxo e, por conseqüência, a evaporação da água líquida presente no lodo dentro do reator de secagem.

O secador de lodo deste modelo foi considerado como um secador do tipo soleiras múltiplas, pois o MTSL foi baseado na configuração do secador do tipo contracorrente, permitindo a maior eficiência nas transferências de calor e massa entre o fluxo de ar e o lodo, visando o alcance da temperatura de higienização e a transferência da quantidade de água desejada para o ar.

O modelo também apresentou uma etapa em que o *lodo úmido* gerado na estação foi submetido, antes da etapa de secagem, a uma mistura com parte do lodo seco de saída do reator de secagem (*lodo seco recirculado*) – gerando o lodo misturado - possibilitando o aumento da temperatura do lodo na entrada do secador e a

formação de um material com menor teor de água e, por conseqüência, menor plasticidade.

Nos próximos subtópicos serão detalhados os equacionamentos e os principais dados necessários para o MTSL. No entanto, em virtude da complexidade do referido modelo, a Figura 35 disponibiliza um fluxograma que reparte o MTSL em 4 submodelos principais e algumas parcelas menores que interagem, interna e externamente, com os mesmos.

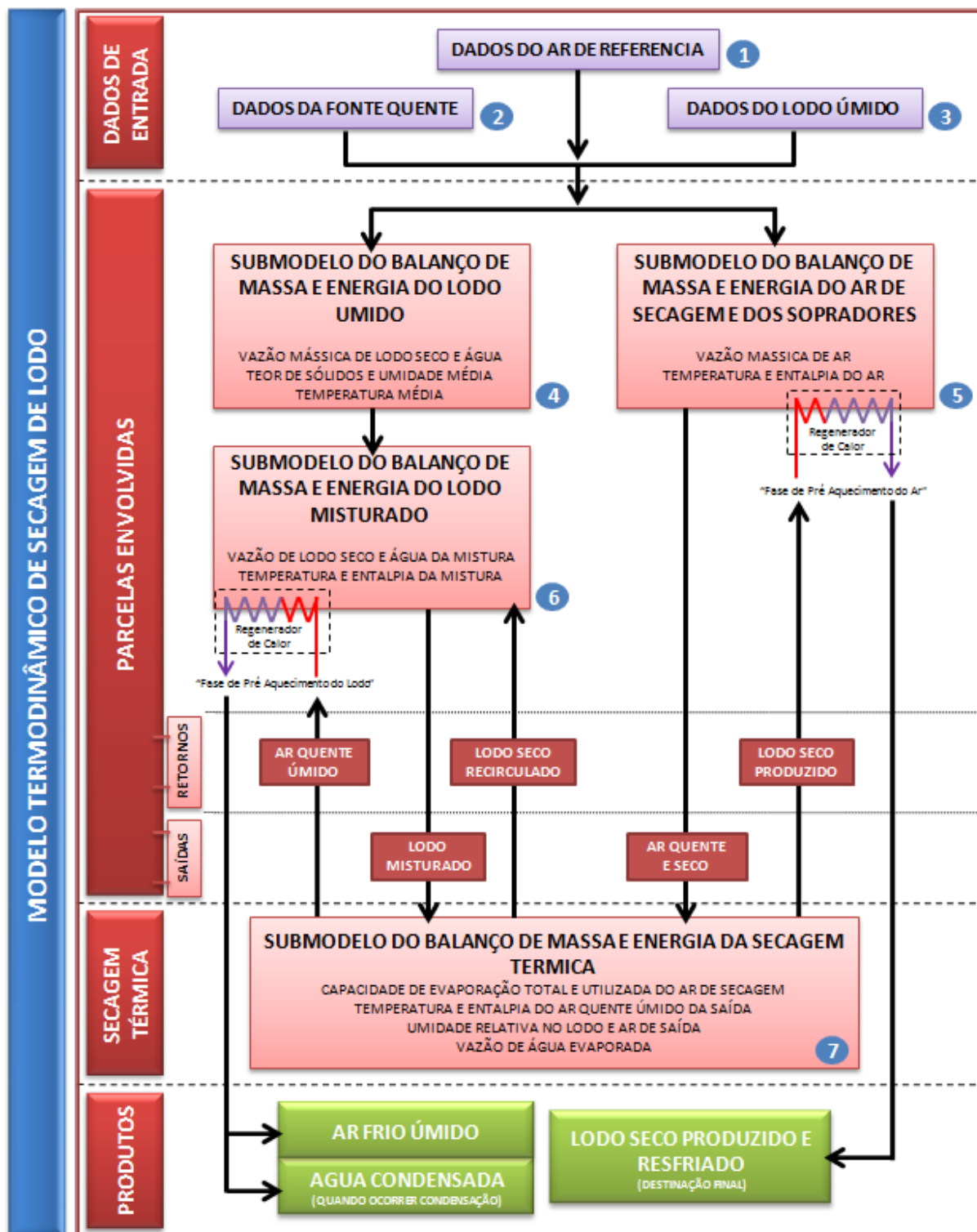


Figura 35 – Fluxograma didático dos submodelos e interações internas do MTSL

Fonte: Produção do próprio autor.

4.6.2 Dados de Entrada

Posterior a etapa de tratamento dos dados, descritos no tópico 4.5, valores específicos foram alimentados no MTSL, garantindo os dados básicos sobre a fonte quente, lodo úmido e propriedades de referência para ambos. Tais dados estão compreendidos nos seguintes itens:

- Umidade relativa média do ar de referência (%);
- Temperatura de bulbo seco média do ar de referência (°C);
- Pressão absoluta do ar de referência (bar);
- Vazão mássica de lodo úmido produzido na ETE Araçás (kg/s);
- Teor médio de sólidos totais no lodo úmido produzido na ETE Araçás (%);
- Vazão volumétrica de ar na aspiração dos sopradores (m³/s);
- Temperatura de bulbo seco média do ar na descarga dos sopradores (°C).

Conforme já mencionado, o ar de referência neste estudo foi considerado como o ar atmosférico externo ao galpão dos sopradores (pátio da ETE Araçás). Apesar de não existir uma variação de pressão entre o pátio e o galpão, pois ambos os locais estão localizados na mesma altitude, a temperatura interna do galpão, possivelmente, é diferente da externa. Sendo a fonte quente representada pelos sopradores da estação, e os mesmos realizam a sucção do ar no ambiente interno do referido galpão, foi necessário a entrada adicional do seguinte dado no MTSL.

- Temperatura de bulbo seco média do ar no galpão dos sopradores (°C);

Caso a sucção fosse realizada na parte externa do galpão, o dado acima não seria necessário.

A temperatura de referência do lodo úmido foi considerada igual a temperatura do ar de referência, pois no MTSL os dois materiais (lodo úmido e ar de referência) estão localizados no pátio externo da ETE Araçás, portanto, no mesmo ambiente.

4.6.3 Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Lodo Úmido

Neste submodelo foram modeladas, por meio de balanço de massa e energia, as entalpias específicas, taxas de energia e vazões mássicas de lodo em massa seca e água que compõem, juntas, o lodo úmido no estado 0 e 1 do MTSL.

O lodo úmido tem origem no processo de centrifugação da ETE Araçás, conforme pode ser observado na Figura 36, sendo que o mesmo representa, nesta condição, o estado 0 do lodo úmido.



Figura 36 – Centrifuga ao fundo, caçamba de armazenamento e lodo centrifugado na ETE Araçás.
Fonte: Produção do próprio autor.

Considerando o lodo como uma mistura de matéria seca e água líquida, neste trabalho o “lodo úmido” foi a denominação dada ao material constituído por matéria seca e água líquida; a “massa seca” é a denominação dada a parcela que representa a parte sólida do lodo na mistura, enquanto a denominação de “água líquida” representa a parcela de água que constitui o lodo úmido.

A Figura 37 ilustra as etapas que serão modeladas neste submodelo e a seguir foram detalhados os balanços de massa e energia do lodo úmido, lodo seco e água líquida que entraram no sistema no estado 0 e passaram para o estado 1.

Os dados originados neste submodelo foram utilizados para alimentar o Submodelo de Balanço de Massa e Energia do Lodo Misturado, abordado no subtópico 4.6.5.

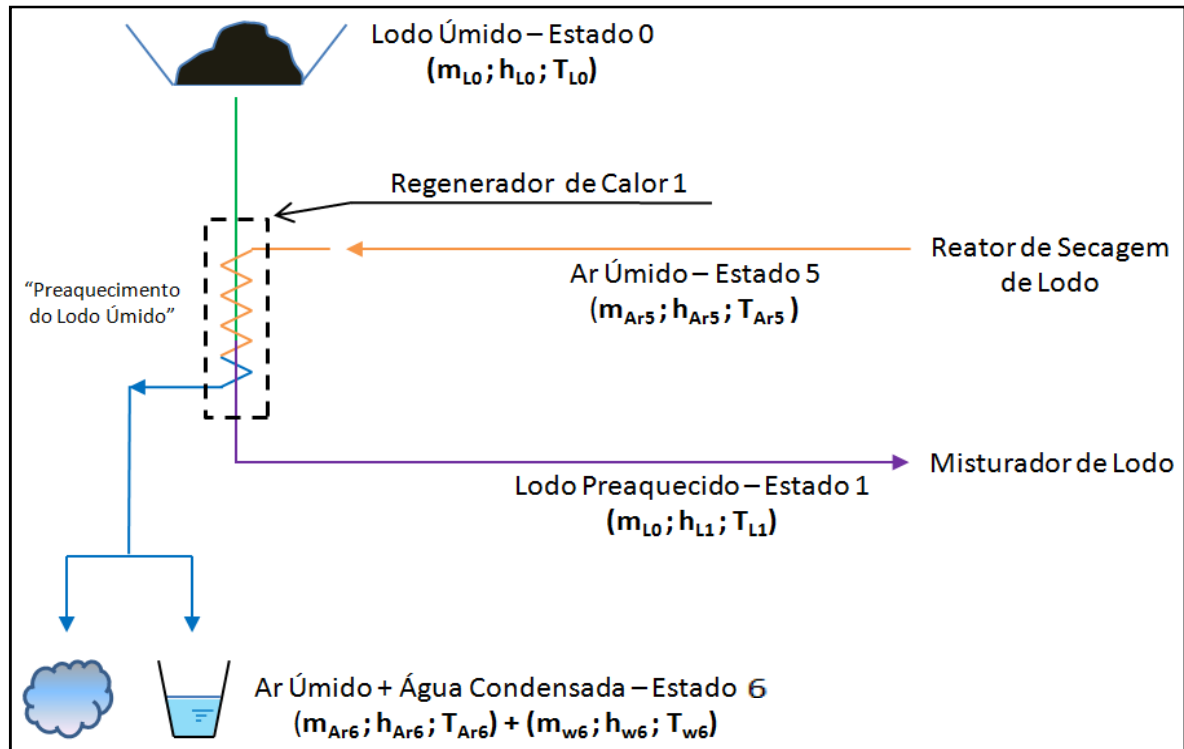


Figura 37 – Etapas envolvidas no submodelo de Balanço de Massa e Energia do Lodo Úmido.

Fonte: Produção do próprio autor.

4.6.3.1 Vazão Mássica de Lodo Úmido na Entrada do Modelo

A Equação 35 representa o cálculo da vazão mássica de lodo úmido originado do processo de centrifugação e que foi processado no MTSL em função dos dados de produção de lodo ao longo do ano de 2014 e de projeto.

(Equação 35)

$$m_{L0} = \left(\frac{C_L}{36dh} \right) \times 10$$

Sendo:

m_{L0} : Vazão mássica de lodo úmido na entrada do modelo $\left(\frac{kg}{s} \right)$;

C_L = Carga de lodo úmido produzido na ETE Araçás $\left(\frac{ton}{ano} \right)$;

d : número de dias que a C_{L0} foi contabilizada $\left(\frac{dias}{ano} \right)$;

h : período de horas que foi considerado para a secagem de lodo (horas).

Para o presente estudo o valor de h e d foi considerado, respectivamente, como 24 horas e 365 dias, pois a fonte quente tem origem nos sopradores de ar da ETE Araçás que são operados de forma contínua ao longo do ano.

4.6.3.2 Vazão Mássica de Lodo Seco na Entrada do Modelo

A Equação 36 estima, por meio do teor de ST do lodo úmido, a vazão mássica de lodo seco que constitui a mistura.

(Equação 36)

$$m_{L0_{seco}} = \left(\frac{m_{L0} X_{L0}}{100} \right)$$

Sendo:

$m_{L0_{seco}}$: Vazão mássica de lodo seco presente no lodo úmido na entrada do modelo $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

m_{L0} : Vazão mássica de lodo úmido na entrada do modelo $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

X_{L0} : teor de sólidos totais presentes no lodo úmido da entrada do modelo (%).

O teor de ST presente no lodo úmido (X_{L0}) foi um dado coletado no histórico de monitoramento de operação do processo de centrifugação da ETE Araçás com base no ano de 2014 e nas condições previstas em projeto.

4.6.3.3 Vazão Mássica de Água Líquida na Entrada do Modelo

A Equação 37 estima, por meio do teor de ST do lodo úmido, a vazão mássica de água líquida que constitui a mistura.

(Equação 37)

$$m_{L0_{\acute{a}gua}} = \frac{m_{L0}(100 - X_{L0})}{100}$$

Sendo:

$m_{L0_{\acute{a}gua}}$: Vazão mássica de água líquida presente no lodo úmido na entrada do modelo $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

m_{L0} : Vazão mássica de lodo úmido na entrada do modelo $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

X_{L0} : teor de sólidos totais presentes no lodo úmido da entrada do modelo (%).

4.6.3.4 Regenerador de Calor 1 – Etapa de Preaquecimento do Lodo Úmido

O MTSL é modelado em regime permanente, ou seja, os balanços de massa e energia são realizados com base na plena operação do sistema, não considerando as fases de partida, parada ou regime transitório na secagem do lodo. Portanto, a etapa de preaquecimento do lodo úmido consiste na recuperação de calor do ar no estado 5 – saída do reator de secagem de lodo – para aumentar a temperatura do lodo úmido e, conseqüentemente, a entalpia do material.

A regeneração foi considerada com um trocador de calor do tipo contracorrente e contato indireto, sendo as etapas de modelagem descritas a seguir.

O primeiro passo foi definir qual dos fluxos de entrada no regenerador, lodo úmido no estado 0 ou ar no estado 5, apresenta a menor capacidade térmica, permitindo, assim, identificar qual a troca de calor máxima que seria possível para o fluxo de menor capacidade térmica e, por consequência, entre os fluxos na consideração de um processo adiabático, conforme ilustra a Equação 38.

(Equação 38)

$$Q_{max_{L0-Ar5}} = C_{min_{reg1}}(T_{Ar5} - T_{L0})$$

Sendo:

$Q_{max_{L0-Ar5}}$: Máxima troca de calor entre o lodo úmido no estado 0 e o ar no estado 5 $\left(\frac{kJ}{s}\right)$;

$C_{min_{reg1}}$: Menor capacidade térmica entre os fluxos que entram no regenerador 1 $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}\right)$;

T_{Ar5} : Temperatura do ar no estado 5 – entrada do regenerador 1 ($^{\circ}C$);

T_{L0} : Temperatura do lodo no estado 0 – entrada no regenerador 1 ($^{\circ}C$).

Lembrando que a Capacidade Térmica é determinada pelo produto da vazão mássica pelo calor específico, sendo que o calor específico pode ser substituído pela razão entre a entalpia específica e a sua correspondente variação de temperatura, conforme mostra a Equação 39 para o ar no estado 5.

A variação de temperatura entre a entrada e a saída do ar não é conhecida, pois o objetivo desta etapa é determinar as condições de saída no regenerador 1. Portanto, foi considerado o cálculo do calor específico médio resultante da variação de entalpia e temperatura do estado 5 até um possível estado 6', considerando o último com a mesma temperatura do lodo úmido no estado 0. Tal consideração permite o emprego de um valor médio de calor específico que represente toda a faixa da possível variação de temperatura de saída do ar.

(Equação 39)

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

Sendo:

\bar{C}_{Ar5} : Capacidade térmica média do ar na entrada do regenerador 1 $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}; \frac{kJ}{s^{\circ}C}\right)$;

m_{Ar5} : Vazão mássica do ar no estado 5 – saída do secador de lodo $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

$\Delta h_{Ar5,6'}$: Variação de entalpia específica do ar do estado 5 para o estado 6' $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$\Delta T_{Ar5,6'}$: Variação de temperatura do ar do estado 5 até o estado 6' ($^{\circ}C$).

Os valores de entalpia específica do ar no estado 5, bem como a sua variação de temperatura em relação a referência, serão dados obtidos, retroativamente, pelo Submodelo de Balanço de Massa e Energia do Secador de Lodo. Enquanto a vazão mássica de ar no estado 5 – saída do reator de secagem – é constituída pela soma da vazão mássica gerada pelo soprador do MTSL com a vazão mássica de água evaporada do lodo durante a etapa de secagem, conforme mostra a Equação 40.

(Equação 40)

$$m_{Ar5} = m_{Ar2} + m_{W_{eva}}$$

Sendo:

m_{Ar5} : Vazão mássica do ar úmido no estado 5 – saída do reator de secagem $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

m_{Ar2} : Vazão mássica do ar de secagem no estado 2 – descarga do soprador MTSHL $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

$m_{W_{eva}}$: Vazão mássica de água líquida evaporada no reator de secagem $\left(\frac{kg}{s}\right)$.

A vazão mássica de água evaporada no reator de secagem 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, conforme mostra a Equação 41.

(Equação 41)

$$m_{W_{eva}} = \left[\frac{m_{L0_{seco}} \left(1 - \frac{X_{L3}}{100}\right)}{\left(\frac{X_{L3}}{100}\right)} \right]$$

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 e fixo para o modelo, pois foi fornecido durante os testes de cenários do MTSL para a ETE Araçás.

Análoga a consideração de um calor específico médio que foi descrito para o ar, a Equação 42 retrata a Capacidade Térmica Média do Lodo Úmido no estado 0 com base na variação de entalpia e temperatura do estado 0 do lodo até um possível estado 1', considerando o último com a temperatura do ar no estado 5.

(Equação 42)

$$\bar{C}_{L0} = m_{L0_{seco}} \left(\frac{\Delta h_{L1'_{seco}}}{\Delta T_{L0,1'}} \right) + m_{L0_{\acute{a}gua}} \left(\frac{\Delta h_{L1'_{\acute{a}gua}}}{\Delta T_{L0,1'}} \right)$$

Sendo:

\bar{C}_{L0} : Capacidade térmica média do lodo úmido na entrada do regenerador 1 $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}; \frac{kJ}{s^{\circ}C} \right)$;

$\Delta h_{L0,1'_{seco}}$: Variação de entalpia específica do lodo seco no estado 1 $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$;

$\Delta h_{L0,1'_{\acute{a}gua}}$: Variação de entalpia específica da água líquida no estado 1 $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$;

$\Delta T_{L0,1'}$: Variação de temperatura do lodo entre o estado 0 e 1 ($^{\circ}C$).

Para calcular a entalpia da água líquida não saturada, a mesma foi obtida pela diferença da entalpia específica da água líquida na temperatura do lodo no estado 1' pela entalpia específica de referência (estado 0), conforme ilustrado na Equação 43.

(Equação 43)

$$\Delta h_{L1'_{\acute{a}gua}} = h_{\acute{a}gua_{T_{Ar5}}} - h_{L0_{\acute{a}gua}}$$

Sendo:

$h_{L0_{\acute{a}gua}}$: Entalpia da água líquida não saturada na temperatura do lodo no estado 0 $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$;

$h_{\acute{a}gua_{T_{Ar5}}}$: Entalpia da água líquida não saturada na temperatura do ar no estado 5 $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$;

$\Delta h_{L1'_{\acute{a}gua}}$: Variação de entalpia da água líquida não saturada entre o estado 0 e 1' $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$.

Como a água líquida é um fluido com estudos consolidados para os diversos estados encontrados no ambiente, os dados de entalpia específica para cada temperatura foram obtidos diretamente pelo *software* termodinâmico *Steam Table®* que opera como suplemento do programa *Microsoft Office Excel®* e permitiu a entrada dos valores de entalpia para a equação acima.

Enquanto a entalpia da massa seca do lodo, conforme consta na Equação 44, foi obtida pela integral da equação linear de calor específico obtida pelos experimentos com calorímetro dos autores Arlabosse, Chavez e Prevot (2005). Tal equação foi integrada em função da variação de temperatura de referência do lodo até a temperatura do ar no estado 5. Um coeficiente de ordem 10^{-3} foi introduzido na referida equação para que o resultado da entalpia fosse obtida, diretamente, em $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$.

Desenvolvimento o conceito descrito:

$$\Delta h_{L1'_{seco}} = \frac{1}{10^3} \int_{T_{L0}}^{T_{Ar5}} (c_{pL_{seco}}) dT = \frac{1}{10^3} \int_{T_{L0}}^{T_{Ar5}} (1434 + 3,29T_{L0}) dT$$

$$\Delta h_{L1'_{seco}} = \frac{1}{10^3} (1434T + 3,29T^2) \Big|_{T_{L0}}^{T_{Ar5}}$$

(Equação 44)

$$\Delta h_{L1'_{seco}} = \frac{1434(T_{Ar5} - T_{L0}) + 3,29(T_{Ar5}^2 - T_{L0}^2)}{10^3}$$

Sendo:

$\Delta h_{L0,1'_{seco}}$: Variação de entalpia específica em base seca do estado 0 ao possível estado 1 ($\frac{kJ}{kg}$);

$c_{pL_{seco}}$: Calor específico do lodo seco ($\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$);

T_{L0} : Temperatura do lodo úmido no estado 0 – referência ($^\circ C$);

T_{Ar5} : Temperatura do ar no estado 5 ($^\circ C$).

De posse da troca de calor máxima entre os fluxos, aplicou-se o conceito de efetividade do método ε -NUT, conforme mostra a Equação 45, resultando na troca de calor possível entre os fluxos com base na efetividade. Sendo o valor de efetividade aplicado neste regenerador de 0,8 – condizente com os típicos valores de efetividade encontrados na revisão bibliográfica no subtópico 3.20.

(Equação 45)

$$Q_{L0-Ar5} = \varepsilon_{reg} C_{min_{reg1}} (T_{Ar5} - T_{L0})$$

Sendo:

Q_{L0-Ar5} : Troca de calor possível entre o lodo no estado 0 e o ar no estado 5 ($\frac{kJ}{s}$ ou kW);

ε_{reg} : efetividade no regenerador 1 (adimensional);

Diante da troca de calor possível entre os fluxos pelo emprego do conceito da efetividade, foi estimada a temperatura do lodo no estado 1 – saída do regenerador – pela Equação 46 que correlaciona a temperatura do lodo no estado 0 com o aumento de temperatura decorrente da transferência de calor do ar no estado 5.

(Equação 46)

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

Sendo:

T_{L1} : Temperatura do lodo úmido no estado 1 – saída do regenerador 1 ($^\circ C$).

Com a temperatura do lodo úmido na saída do regenerador determinada, foi estimada a taxa de energia do lodo úmido em função da Equação 47.

$$H_{L1} = \left[(m_{L0_{seco}} h_{L1_{seca}}) + (m_{L0_{\acute{a}gua}} h_{L1_{\acute{a}gua}}) \right] \quad \text{(Equação 47)}$$

Sendo:

H_{L1} : Taxa de energia do lodo úmido no estado 1 – saída do regenerador 1 $\left(\frac{kJ}{s} \text{ ou } kW\right)$;

$h_{L1_{seco}}$: Entalpia do lodo em base seca no estado 1 $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$h_{L1_{\acute{a}gua}}$: Entalpia da água líquida no estado 1 $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

A entalpia da base seca do lodo foi estimada pela integração do calor específico em função da variação de temperatura até o estado 1, conforme mostra a Equação 48.

$$h_{L1_{seca}} = \frac{1434(T_1 - T_0) + 3,29(T_1^2 - T_0^2)}{10^3} \quad \text{(Equação 48)}$$

O calculo de entalpia para o lodo em massa seca e para a água líquida foram realizados, nas próximas etapas, com os mesmos métodos descritos nas equações 43 e 48, variando apenas a propriedade da temperatura no estado final.

Ressalta-se que alguns dados deste submodelo estão conectados com o Submodelo de Balanço de Massa e Energia da Secagem de Lodo, necessitando, assim, de uma elevada interatividade durante o uso do MTSL.

4.6.4 Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Ar de Secagem e dos Sopradores

Neste submodelo foram feitas as considerações e modelagem do ar de referência, ar interno do galpão dos sopradores, ar de secagem e demais partes envolvidas como a geração do fluxo de ar de secagem por um soprador teórico e os trocadores de calor que foram considerados para aquecer o mesmo ar.

As etapas envolvidas neste submodelo permitem que o ar passe do estado 0 (ar de referência) para o estado 1 (ar interno ao galpão dos sopradores), estado 2 (descarga do soprador do MTSL), estado 3 (saída do regenerador de calor 2) e estado 4 (saída do trocador de calor), conforme apresenta a Figura 38.

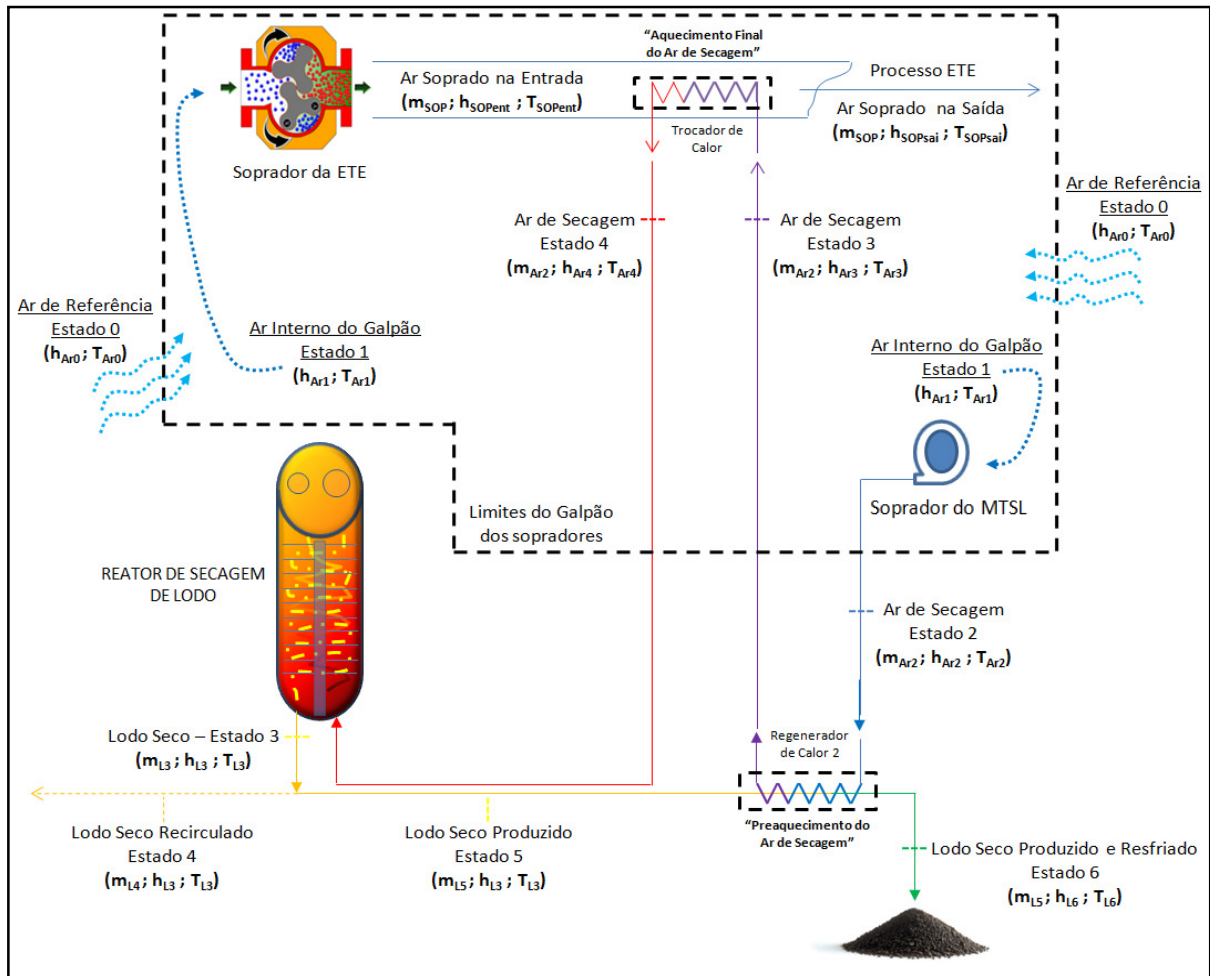


Figura 38 – Etapas envolvidas no submodelo de Balanço de Massa e Energia do Ar de Secagem e Sopradores

Fonte: Produção do próprio autor.

Foram feitas as seguintes considerações neste submodelo:

- O ar de referência foi o ar atmosférico externo ao galpão dos sopradores, sendo ele a referência zero para o estudo, ou seja, a constituição física e temperatura desse ar foram utilizadas como as propriedades de referência;
- O comportamento do ar na entrada até a saída do MTSL foi considerado como igual a um gás ideal, seguindo, portanto, a mesma modelagem;
- O soprador de ar teórico ou soprador do MTSL que gera o fluxo de ar de secagem estaria instalado e operando no interior do galpão dos sopradores da ETE Araçás. Portanto, o ar de sucção de tal equipamento foi considerado como o ar interno ao galpão dos sopradores que, por sua vez, apresenta condições termodinâmicas (temperatura e entalpia) diferentes do ar de referência. Ainda,

neste soprador teórico, foi considerada uma eficiência isentrópica durante a geração do fluxo de ar de secagem, pois no MTSL são consideradas as pressões de trabalho do ar para cada etapa, haja vista que a pressão do fluxo de ar de secagem é uma importante propriedade intensiva que influencia diretamente a capacidade de absorção de água pelo ar de secagem;

- Foram considerados dois trocadores de calor de contato indireto e contracorrente, mas com funções específicas distintas, sendo o primeiro tipo um regenerador de calor para preaquecer o ar de secagem com o calor transferido do lodo seco produzido no reator de secagem, tal regenerador é descrito como “regenerador de calor 2” e foi concebido depois da saída do soprador teórico do MTSL. Enquanto o segundo tipo foi concebido para aquecer o fluxo de ar, depois do preaquecimento, com o calor transferido do ar descarregado pelos sopradores da ETE Araçás;
- As perdas energéticas que poderiam ocorrer em virtude de trocas de calor com a vizinhança do sistema termodinâmico, variação de energia cinética ou potencial, realização de trabalho ou regime transiente não foram consideradas, haja vista que essa avaliação envolve um estudo mais específico sobre o dimensionamento e emprego de tecnologias existentes e disponíveis no mercado para realizar a transferência e transporte de energia. Entretanto, nos trocadores de calor e soprador teórico de ar, equipamentos com maior potencial de perdas e irreversibilidades, foram considerados os valores típicos de efetividade para o primeiro e eficiência isentrópica para o segundo, garantindo, assim, resultados mais próximos da realidade.

Os dados originados neste submodelo foram utilizados para alimentar o Submodelo de Balanço de Massa e Energia da Secagem Térmica de Lodo que será abordado no subtópico 4.6.6.

4.6.4.1 Propriedades do Ar de Referência

O ar de referência foi considerado como o ar atmosférico externo ao galpão dos sopradores e ainda com as propriedades de um gás ideal, conforme modelo de gás de Dalton. Com a consideração do vapor d'água presente no ar atmosférico, a composição do ar úmido é diferente do ar seco e a variação é função da quantidade

de água presente na mistura. Portanto, a fração molar de vapor d'água presente no ar atmosférico foi estimada com o auxílio da Equação 49.

(Equação 49)

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

Sendo:*y_v*: Fração molar do vapor d'água presente na mistura (%);*φ*: Umidade relativa na mistura (%);*p_g*: Pressão de saturação de vapor d'água na temperatura da mistura (bar);*p*: Pressão absoluta na mistura na temperatura *T* (bar).

Diante da fração molar de vapor d'água presente na mistura, as parcelas que representam o ar seco foram corrigidas para uma fração. A Equação 50 representa o método utilizado para corrigir as frações de cada componente da mistura.

(Equação 50)

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

Sendo:*y'_x*: Fração molar corrigida do componente *x* na mistura de ar úmido (%);*y_x*: Fração molar do componente *x* no ar seco (%);*y_v*: Fração molar do vapor d'água presente na mistura (%).

Considerando a composição do ar seco apresentada no subtópico 3.14.1 da revisão bibliográfica, a Tabela 3 descreve as frações molares utilizadas na equação acima e que representam a composição do ar seco deste estudo.

Tabela 3 – 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 e Shapiro, 2014.

Os gases traços que são constituídos em sua maior parcela por Neônio, Hélio e Metano, somando, aproximadamente, 0,01% da fração molar do ar seco. A referida fração foi incrementada na fração molar do Nitrogênio, elevando o nitrogênio de

78,08% para 78,09% na composição, simplificando a modelagem do ar seco e continuando, ainda, com boa exatidão.

A composição do ar de referência obtida, posterior a correção, não será alterado ao longo deste submodelo, pois nenhuma transferência de massa é considerada.

Os calculados das propriedades de entalpia e taxa de energia não são realizadas nesta etapa, pois as mesmas são consideradas nulas (referência do MTSL).

4.6.4.2 Propriedades do Ar no Interior do Galpão dos Sopradores

No estudo foi considerado que a pressão absoluta do ar úmido no ambiente interno do galpão dos sopradores é igual à pressão do ar de referência, pois não ocorrem variações de altitude entre os dois ambientes.

Considerando que a composição do ar úmido e a pressão interna do galpão são constantes e iguais ao do ar de referência, a única variação ocorrida é a temperatura. Portanto, a entalpia específica do ar úmido que esta presente no ambiente interno do galpão foi determinada pela adaptação da Equação 12, mostrada na revisão bibliográfico no subtópico 3.17, na forma da Equação 51, possibilitando o calculo da entalpia específica de cada componente presente no ar úmido em função da variação de temperatura em relação a referência (T_0).

(Equação 51)

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

Sendo:

h_{Ar1} : Entalpia específica do ar no ambiente interior do galpão – estado 1 ($\frac{kJ}{kg}$);

y'_x : Fração molar corrigida do componente x na mistura de ar úmido (%);

M_x : Massa molar do componente x na mistura de ar úmido ($\frac{kg}{kmol}$);

T_{Ar0} : Temperatura de referência do ar (K);

T_{Ar1} : Temperatura do ar úmido no estado 1 (K);

A, B, C, D : Constantes do componente x ($\frac{cal}{mol K}$).

Foi introduzido na equação acima a constante 4,18 para que o resultado da entalpia específica fosse expresso em $kJ.kg^{-1}$. A somatória de x foi ordenada, igualmente as constantes empregadas, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Componentes, ordens e constantes empregadas na Equação 51.

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.

Este mesmo método foi empregado para calcular a entalpia específica do ar nas demais etapas do MTSL.

4.6.4.3 Propriedades do Ar na Descarga dos Sopradores da ETE

A entalpia específica que está presente no ar da descarga dos sopradores de ar da ETE Araçás foi calculada pelo mesmo método descrito nas Equações 51, resultando na forma da Equação 52.

Sendo o ar descarregado pelos sopradores da ETE Araçás o mesmo que entrará no trocador de calor para realizar a etapa de aquecimento final do ar de secagem, a entalpia e a temperatura do ar na descarga dos sopradores da ETE Araçás foram apresentadas com a notação “ent” subscrita a propriedade calculada.

(Equação 52)

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

Sendo:

$h_{SOP_{ent}}$: Entalpia específica no ar úmido na descarga do soprador da ETE Araçás ($\frac{kJ}{kg}$);

$T_{SOP_{ent}}$: Temperatura do ar úmido na descarga do soprador da ETE Araçás (K).

Como o MTSL trabalha com fluxos de massa e energia, propriedades extensivas como a Taxa de Energia (H) transportada ao longo do tempo devem ser determinadas. Para o caso avaliado, a taxa de energia foi calculada pelo produto da entalpia específica pela vazão mássica de ar na descarga dos sopradores, conforme é apresentado na Equação 53.

(Equação 53)

$$H_{SOP_{ent}} = m_{SOP} h_{SOP_{ent}}$$

Sendo:

$H_{SOP_{ent}}$: Taxa de energia na descarga dos sopradores da ETE Araçás $\left(\frac{kJ}{s} \text{ ou } kW\right)$;

m_{SOP} : Vazão mássica de ar úmido na descarga dos sopradores da ETE Araçás $\left(\frac{kg}{s}\right)$.

A vazão mássica do ar na descarga do soprador foi pode ser calculada, partindo da conservação de massa entre a entrada e saída do soprador, pelo produto da vazão volumétrica com a densidade do ar, conforme mostra a Equação 54.

(Equação 54)

$$m_{SOP} = v_{SOP} \rho_1$$

Sendo:

v_{SOP} : Vazão volumétrica do ar úmido na sucção dos sopradores na ETE Araçás $\left(\frac{m^3}{s}\right)$;

ρ_1 : Densidade do ar úmido no estado 1 $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

A densidade da mistura foi calculada pela Equação 55 que correlaciona a pressão absoluta, massa molar e temperatura da mistura na sucção do equipamento.

(Equação 55)

$$\rho_1 = \left(\frac{p_1 M_1}{T_{Ar1} R}\right) 10^3$$

Sendo:

ρ : Densidade do ar úmido no estado 1 $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$;

p_1 : Pressão absoluta no estado 1 (Pa);

M_1 : Peso molecular no estado 1 (kmol).

R : Constante universal dos gases ideais $\left(\frac{m^3 Pa}{K kmol}\right)$.

A vazão mássica resultante é a vazão total da operação dos sopradores – ou seja – foi considerada a soma das vazões volumétricas dos sopradores em operação para cada cenário de teste da ETE Araçás para alimentar a Equação 55.

4.6.4.4 Propriedades do Ar de Secagem na Descarga do Soprador Teórico

O fluxo de ar de secagem é um dos principais componentes do MTSL, sendo o fluxo gerado a partir de um soprador de ar que estaria, teoricamente, instalado no mesmo

galpão dos sopradores da ETE Araçás. Portanto, as propriedades do ar na sucção do soprador teórico são idênticas as características do ar no galpão.

PRESSÃO DE DESCARGA E PERDAS DE CARGA AO LONGO DO MODELO

A primeira etapa para modelar o ar na saída do soprador do MTSL é determinar a pressão de descarga do equipamento. Para tanto, foi necessário estimar as perdas de carga que ocorrem no fluxo de ar de secagem e a pressão de saída do sistema.

Diante da revisão bibliográfica, foi considerado que as perdas de carga entre a entrada e saída dos regeneradores e trocadores de calor foram de 2,5%, haja vista que as perdas são projetadas em função do escoamento do ar. Na saída do sistema o ar foi considerado com pressão absoluta igual a pressão de referência do modelo.

Em virtude da falta de informação na revisão bibliográfica pesquisada sobre as pressões de operação de secadores mecânicos de lodo do tipo soleiras múltiplas, foi definida, arbitrariamente, a perda de carga de 10% entre a entrada e saída do reator de secagem, garantindo, assim, um valor conservador neste parâmetro do MTSL.

Diante do exposto, a pressão de descarga do soprador do MTSL foi calculada pela Equação 56.

(Equação 56)

$$p_2 = p_0 + \Delta p_{f5,6} + \Delta p_{f4,5} + \Delta p_{f3,4} + \Delta p_{f2,3}$$

Sendo:

p_2 : pressão absoluta do ar de secagem no estado 2 – saída do soprador do MTSHL (bar);

p_0 : Pressão absoluta do ar de referência – estado 0 (bar);

$\Delta p_{f5,6}$: Variação de pressão do ar entre o estado 5 e 6 – regenerador de calor 1 (bar);

$\Delta p_{f4,5}$: Variação de pressão do ar entre o estado 4 e 5 – reator de secagem de lodo (bar);

$\Delta p_{f3,4}$: Variação de pressão do ar entre o estado 3 e 4 – trocador de calor (bar);

$\Delta p_{f2,3}$: Variação de pressão do ar entre o estado 2 e 3 – regenerador de calor 2 (bar).

A Equação 57 mostra como foi calculada a variação de pressão entre o estado 3 e 4, sendo válido o mesmo equacionamento para as demais variações de pressões.

(Equação 57)

$$\Delta p_{f3,4} = p_3 - p_4 = p_3 \left(\frac{f_{3,4}}{100} \right)$$

Sendo:

p_3 : Pressão absoluta no estado 3 – saída do regenerador de calor 2 (bar);

$f_{3,4}$: Perda de carga estimada do ar entre o estado 3 e 4 (%).

EFICIÊNCIA ISENTRÓPICA

Diante da determinação da pressão de descarga do soprador, a segunda etapa foi encontrar, com base na revisão bibliográfica realizada e apresentada no subtópico 3.23, a temperatura de descarga do soprador pelas Equações 58 e 59 que levam em consideração a eficiência isentrópica aplicada a compressores.

(Equação 58)

$$\frac{T_{IS}}{T_{Ar1}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Sendo:

T_{IS} : Temperatura isentrópica do ar úmido na descarga do soprador do MTSHL (°C; K);
 k : Constante com base na temperatura de entrada do ar (adimensional).

A constante k para ar trabalhando numa temperatura de 300 Kelvin (26,85 °C) é de 1,4000, sendo esse o valor utilizada na equação acima (WARK, 1983, *apud* MORAN, SHAPIRO, 2014).

A Equação 59 permite estimar a temperatura de descarga do ar na saída do soprador do MTSL, considerando a eficiência isentrópica de um compressor de ar que engloba na mesma concepção os sopradores estudados neste trabalho

(Equação 59)

$$\eta_{is} = \frac{T_{IS} - T_{Ar1}}{T_{Ar2} - T_{Ar1}}$$

Sendo:

T_{Ar2} : Temperatura do ar de secagem no estado 2 – saída do soprador do MTSL (°C; K).

Para não utilizar valores extremos e que possam ser discrepantes com a realidade, foi utilizada a eficiência isentrópica de 0,8, valor intermediário ao encontrado na revisão bibliográfica para compressores de ar.

ENTALPIA ESPECÍFICA E TAXA DE ENERGIA DO AR NO ESTADO 2

Diante do conhecimento da temperatura de descarga do ar, a terceira e última etapa para determinar as propriedades do ar no estado 2 foi calcular a entalpia específica e a taxa de energia no fluxo de ar com base nas Equações 60 e 61.

(Equação 60)

$$h_{Ar2} = \frac{4,18}{\sum_{x=1}^5 y'_x M_x} \sum_{x=1}^5 \int_{T_{Ar0}}^{T_{Ar2}} (A + BT + CT^2 + DT^3)_x dT$$

Sendo:

h_{Ar2} : Entalpia específica do ar no estado 2 – descarga soprador do MTSHL ($\frac{kJ}{kg}$);

T_{Ar2} : Temperatura do ar no estado 2 – descarga do soprador do MTSHL (K).

A taxa de energia na descarga do soprador do MTSL é o produto direto da entalpia específica pela vazão mássica de ar no estado 2, conforme mostra a Equação 61.

(Equação 61)

$$H_{Ar2} = m_{Ar2} h_{Ar2}$$

Sendo:

H_{Ar2} : Taxa de energia do ar de secagem no estado 2 – descarga sop. MTSHL ($\frac{kJ}{s}$ ou kW);

m_{Ar2} : Vazão mássica do ar de secagem no estado 2 – descarga do sop. do MTSHL ($\frac{kg}{s}$).

A vazão mássica do ar de secagem, descarregado pelo soprador teórico, é a principal variável do MTSL, pois a variação na vazão de ar implica na mudança, não proporcional, da capacidade de secagem e higienização de lodo. Portanto, a vazão de ar será regulada em função da temperatura e teor de sólidos que são desejados no lodo seco na saída do reator de secagem.

4.6.4.5 Regenerador de calor 2 – Etapa de preaquecimento do Ar de Secagem

O MTSL é modelado em regime permanente, ou seja, os balanços de massa e energia são realizados com base na plena operação do sistema, não considerando as fases de partida, parada ou outros regimes transientes na secagem do lodo.

Neste cenário, esta etapa de preaquecimento do ar consiste na transferência de calor do lodo seco produzido pelo secador no estado 5 para o ar de secagem no estado 2, permitindo que o último sofra um incremento na entalpia específica e, conseqüentemente, aumente a temperatura antes da fase de aquecimento final.

A regeneração foi modelada com os fluxos de ar e lodo seco passando por um trocador de calor do tipo contracorrente e contato indireto, sendo as etapas de modelagem descritas a seguir.

A primeira etapa foi definir qual dos fluxos de entrada no regenerador, lodo seco ou ar de secagem, apresenta a menor capacidade térmica, permitindo, assim, identificar qual a troca de calor máxima que seria possível com o fluxo de menor capacidade térmica e, por consequência, entre os fluxos na consideração de um processo adiabático, conforme ilustra a Equação 62.

As propriedades de entalpia e temperatura do lodo seco no estado 5 são iguais as propriedades do lodo seco no estado 3 – saída do reator de secagem – pois ao sair do reator o material é dividido em duas parcelas em que as propriedades extensivas, por exemplo a vazão, serão distintas, mas as propriedades intensivas como a temperatura e a entalpia específica serão idênticas quando levada em consideração a condição adiabática do MTSL.

(Equação 62)

$$Q_{max_{Ar2-L5}} = C_{min_{reg2}}(T_{L3} - T_{Ar2})$$

Sendo:

$Q_{max_{Ar2-L5}}$: Máxima troca de calor entre o ar no estado 2 e o lodo seco no estado 5 $\left(\frac{kJ}{s}\right)$;

T_{L3} : Temperatura do lodo seco no estado 3 ($^{\circ}C$);

T_{Ar2} : Temperatura do ar no estado 2 – entrada do regenerador 2 ($^{\circ}C$).

$C_{min_{reg2}}$: Menor capacidade térmica entre os fluxos que entram no regenerador 2 $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}\right)$.

Lembrando que a Capacidade Térmica é determinada pelo produto da vazão mássica pelo calor específico, sendo que o calor específico pode ser substituído pela razão entre a entalpia específica e a sua correspondente variação de temperatura, conforme retrata a Equação 63.

Semelhante ao caso do regenerador 1, foi determinado o calor específico médio com base na variação de temperatura entre o ar no estado 2 e um possível estado 3' que apresenta a mesma temperatura do lodo seco.

(Equação 63)

$$\bar{C}_{Ar2} = m_{Ar2} \left(\frac{\Delta h_{Ar2,3'}}{\Delta T_{Ar2,3'}} \right)$$

Sendo:

\bar{C}_{Ar2} : Capacidade térmica média do ar do estado 2 ao possível estado 3' $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}; \frac{kJ}{s^{\circ}C}\right)$;

$\Delta h_{Ar2,3'}$: Variação de entalpia específica do ar do estado 2 ao possível estado 3' $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$\Delta T_{Ar2,3'}$: Variação de temperatura do ar do estado 2 ao possível estado 3' ($^{\circ}C$).

A Equação 64 retrata, semelhante ao caso acima, a Capacidade Térmica Média do lodo – entrada do regenerador de calor 2.

(Equação 64)

$$\bar{C}_{L5} = m_{L5} \left(\frac{\Delta h_{L3,6'}}{\Delta T_{L3,6'}} \right)$$

Sendo:

\bar{C}_{L5} : Capacidade térmica média do lodo do estado 5 ao possível estado 6' – $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}; \frac{kJ}{s^{\circ}C} \right)$;

m_{L5} : Vazão mássica de lodo no estado 5 – entrada do regenerador 2 $\left(\frac{kg}{s} \right)$;

$\Delta h_{L3,6'}$: Variação de entalpia específica do lodo do estado 3 ao possível estado 6' $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$;

$\Delta T_{L3,6'}$: Variação de temperatura do lodo do estado 3 ao possível estado 6' ($^{\circ}C$).

Os valores de entalpia específica e temperatura do lodo no estado 3, iguais ao estado 5, são dados obtidos, retroativamente, do Submodelo de Balanço de Massa e Energia do Secador de Lodo. Enquanto a vazão mássica de lodo no estado 5 é constituída pela vazão mássica em massa seca no estado 0, acrescido da diferença de vazão mássica de água líquida no estado 0 pela vazão mássica de água evaporada no reator de secagem, conforme mostra a Equação 65.

(Equação 65)

$$m_{L5} = m_{L0_{seco}} + \left(m_{L0_{\acute{a}gua}} - m_{W_{eva}} \right)$$

Diante da troca de calor máxima, a segunda etapa foi caracterizada pela aplicação do conceito de efetividade do método ε -NUT, conforme mostra a Equação 66, resultando na troca de calor possível entre os fluxos.

O valor de efetividade aplicada neste regenerador foi de 0,8, condizente com os típicos valores encontrados na revisão bibliográfica no subtópico 3.20.

(Equação 66)

$$Q_{Ar2-L5} = \varepsilon_{reg} C_{min_{reg2}} (T_{L3} - T_{Ar2})$$

Sendo:

Q_{Ar2-L5} : Troca de calor possível entre o ar no estado 2 e o lodo no estado 5 $\left(\frac{kJ}{s}; kW \right)$;

ε_{reg} : efetividade no regenerador (adimensional).

Diante da troca de calor possível entre os fluxos, obtida pela introdução do conceito da efetividade, a terceira etapa consistiu no calculo da temperatura de saída do ar

no estado 3 – depois do regenerador de calor 2 – pela Equação 67 que correlaciona a temperatura do ar no estado 2 com o aumento de temperatura proporcionado pela transferência de calor do lodo no estado 5.

(Equação 67)

$$T_{Ar3} = \left[\frac{\varepsilon_{reg} C_{min_{reg2}} (T_{L3} - T_{Ar2})}{\bar{C}_{Ar2}} \right] + T_{Ar2}$$

Sendo:

T_{Ar3} : Temperatura do ar no estado 3 – saída do regenerador 2 (°C).

ENTALPIA ESPECÍFICA E TAXA DE ENERGIA DO AR NO ESTADO 3

Diante da temperatura do ar no estado 3, foi calculada a entalpia específica e a taxa de energia no fluxo de ar para o referido estado com base nas Equações 68 e 69.

(Equação 68)

$$h_{Ar3} = \frac{4,18}{\sum_{x=1}^5 y'_x M_x} \sum_{x=1}^5 \int_{T_{Ar0}}^{T_{Ar3}} (A + BT + CT^2 + DT^3)_x dT$$

Sendo:

h_{Ar3} : Entalpia específica do ar no estado 3 – saída do regenerador 2 ($\frac{kJ}{kg}$);

T_3 : Temperatura do ar no estado 3 – saída do regenerador 2 (K).

A taxa de energia do ar no estado 3 foi calculada pelo produto direto da entalpia específica pela vazão mássica na saída do regenerador, sendo a vazão mássica de entrada e saída iguais, pois nenhuma transferência de massa ocorreu, mantendo a composição constante e as quantidades invariáveis ao longo do tempo. Neste contexto, a taxa de energia foi expressa pela Equação 69.

(Equação 69)

$$H_{Ar3} = m_{Ar2} h_{Ar3}$$

Sendo:

H_{Ar3} : Taxa de energia do ar de secagem no estado 3 – saída regenerador 2 ($\frac{kJ}{s}$ ou kW);

A vazão mássica de ar na saída do soprador do MTSL continua sendo a principal variável durante a modelagem.

4.6.4.6 Trocador de Calor – Etapa de Aquecimento Final do Ar de Secagem

A etapa de aquecimento final do ar de secagem é a última modelagem antes da entrada do mesmo no reator de secagem de lodo. Sendo o equacionamento desta etapa é igual à anterior, entretanto, o preaquecimento do ar no estado 2 apresentava o objetivo específico de recuperar uma parcela da energia térmica que sairia do sistema com o lodo no estado 5 para aquecer o ar de secagem no estado 2, aumentando a eficiência global do sistema e garantindo o melhor aproveitamento da troca de calor nesta etapa de aquecimento final. Enquanto, na etapa de aquecimento final do ar de secagem, o objetivo principal é aquecer o ar de secagem, por meio da troca de calor com o ar na saída dos sopradores da ETE Araçás, para maximizar a capacidade de absorção de água no ar de secagem e garantir a evaporação desejada da água presente no lodo.

Novamente, a primeira etapa foi definir qual dos fluxos de entrada no trocador de calor, ar de secagem ou ar da descarga dos sopradores, apresenta a menor capacidade térmica, permitindo, assim, identificar qual a troca de calor máxima que seria possível pelo fluxo de menor capacidade térmica e, conseqüentemente, entre os dois fluxos para um processo adiabático, conforme ilustra a Equação 70.

(Equação 70)

$$Q_{max_{Ar3-SOP}} = C_{min_{tc}} (T_{SOP_{ent}} - T_{Ar3})$$

Sendo:

$Q_{max_{Ar3-SOP}}$: Máxima troca de calor entre o ar de secagem no estado 3 e o ar dos sopradores da ETE Araçás – trocador de calor $\left(\frac{kJ}{s}\right)$;

$T_{SOP_{ent}}$: Temperatura do ar dos sopradores ETE – entrada do trocador de calor ($^{\circ}C$);

$C_{min_{tc}}$: Menor capacidade térmica entre os fluxos que entram no trocador de calor $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}\right)$.

A Capacidade Térmica Média do ar de secagem na entrada do trocador de calor foi calculada, semelhante aos regeneradores, considerando a variação de entalpia e temperatura máxima entre os fluxos, conforme é apresentado na Equação 71.

(Equação 71)

$$\bar{C}_{Ar3} = m_{Ar2} \left(\frac{\Delta h_{Ar3,4'}}{\Delta T_{Ar3,4'}} \right)$$

Sendo:

\bar{C}_{Ar3} : Capacidade térmica média do ar no estado 3 – trocador de calor $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}\right)$;

$h_{Ar3,4'}$: Variação de entalpia específica do ar do estado 3 ao possível estado 4' $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$\Delta T_{3,4'}$: Variação de temperatura do ar do estado 3 ao possível estado 4' ($^{\circ}C$).

A Equação 72 retrata, igual ao contexto acima, a Capacidade Térmica Média do ar na descarga dos sopradores da ETE Araçás.

(Equação 72)

$$\bar{C}_{SOP_{ent}} = m_{SOP} \left(\frac{h_{SOP_{ent,sai'}}}{\Delta T_{SOP_{ent,sai'}}} \right)$$

Sendo:

$\bar{C}_{SOP_{ent}}$: Capacidade térmica média do ar na descarga sopradores ETE Araçás $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}\right)$;

$h_{SOP_{ent,sai'}}$: Variação de entalpia específica do ar na descarga do soprador do estado de entrada ao possível estado de saída $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$\Delta T_{SOP_{ent,sai'}}$: Variação de temperatura do ar na descarga dos sopradores da ETE Araçás do estado de entrada ao possível estado de saída $(^{\circ}C)$.

Diante da troca de calor máxima, aplicou-se o conceito de efetividade do método ε -NUT, conforme mostra a Equação 73, resultado na troca de calor possível entre os fluxos. O valor de efetividade aplicado neste trocador de calor também foi de 0,8, condizente com os típicos valores de efetividade encontrados na revisão bibliográfica no subtópico 3.20 e padronizando todos os trocadores de calor, regenerativos ou não, com a mesma efetividade dentro do MTSL.

(Equação 73)

$$Q_{Ar3-SOP} = \varepsilon_{tc} C_{min_{tc}} (T_{SOP_{ent}} - T_{Ar3})$$

Sendo:

$Q_{Ar3-SOP}$: Troca de calor possível entre o fluxo de ar no estado 3 e o ar na descarga dos sopradores da ETE $\left(\frac{kJ}{s}\right)$ ou kW);

ε_{tc} : efetividade no trocador de calor (adimensional).

Semelhante aos regeneradores modelados, foi determinada a temperatura de saída do ar de secagem no estado 4 – depois do trocador de calor – pela Equação 74 que correlaciona a temperatura ar no estado 3 com o aumento de temperatura decorrente da transferência de calor pelo ar dos sopradores da ETE Araçás.

(Equação 74)

$$T_{Ar4} = \left[\frac{\varepsilon_{tc} C_{min_{tc}} (T_{SOP_{ent}} - T_{Ar3})}{C_{Ar3}} \right] + T_{Ar3}$$

Sendo:

T_{Ar4} : Temperatura do ar de secagem na estado 4 – saída do trocador de calor $(^{\circ}C)$.

ENTALPIA ESPECÍFICA E TAXA DE ENERGIA DO AR NO ESTADO 4

Diante da temperatura do ar na saída do trocador de calor, foi calculada a entalpia específica e a taxa de energia no fluxo de ar no estado 4 pelas Equações 75 e 76.

(Equação 75)

$$h_{Ar4} = \frac{4,18}{\sum_{x=1}^5 y'_x M_x} \sum_{x=1}^5 \int_{T_{Ar0}}^{T_{Ar4}} (A + BT + CT^2 + DT^3)_x dT$$

Sendo:

h_{Ar4} : Entalpia específica do ar de secagem no estado 4 – saída trocador de calor $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

A taxa de energia no ar de secagem no estado 4 foi calculada pelo produto direto da entalpia específica pela vazão mássica na saída do equipamento, sendo a vazão mássica de entrada e saída iguais, pois nenhuma transferência de massa foi realizada. Desta forma, a taxa de energia é expressa na forma da Equação 76.

(Equação 76)

$$H_{Ar4} = m_{Ar2} h_{Ar4}$$

Sendo:

H_{Ar4} : Taxa de energia do ar de secagem no estado 4 – saída trocador de calor $\left(\frac{kJ}{s}; kW\right)$.

A vazão mássica de ar na saída do soprador teórico continua sendo a principal variável da modelagem, sendo que o mesmo no estado 4 antecede a entrada do mesmo no secador de lodo. Na próxima etapa foi modelado o lodo misturado que representa o segundo e último fluxo de entrada do reator de secagem de lodo.

4.6.5 Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Lodo Misturado

Neste submodelo foram feitas as considerações e o balanço de massa e energia do lodo úmido preaquecido, lodo recirculado e lodo misturado. A alimentação de dados neste submodelo foi proveniente do Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Lodo Úmido e, retroativamente, do Reator de Secagem de Lodo.

As etapas envolvidas neste submodelo permitiram que o lodo úmido no estado 1 fosse misturado com o lodo seco recirculado no estado 4 para produzir, posterior a homogeneização dos materiais, o lodo misturado no estado 2 que foi alimentado no reator de secagem, conforme é apresentado na Figura 39.

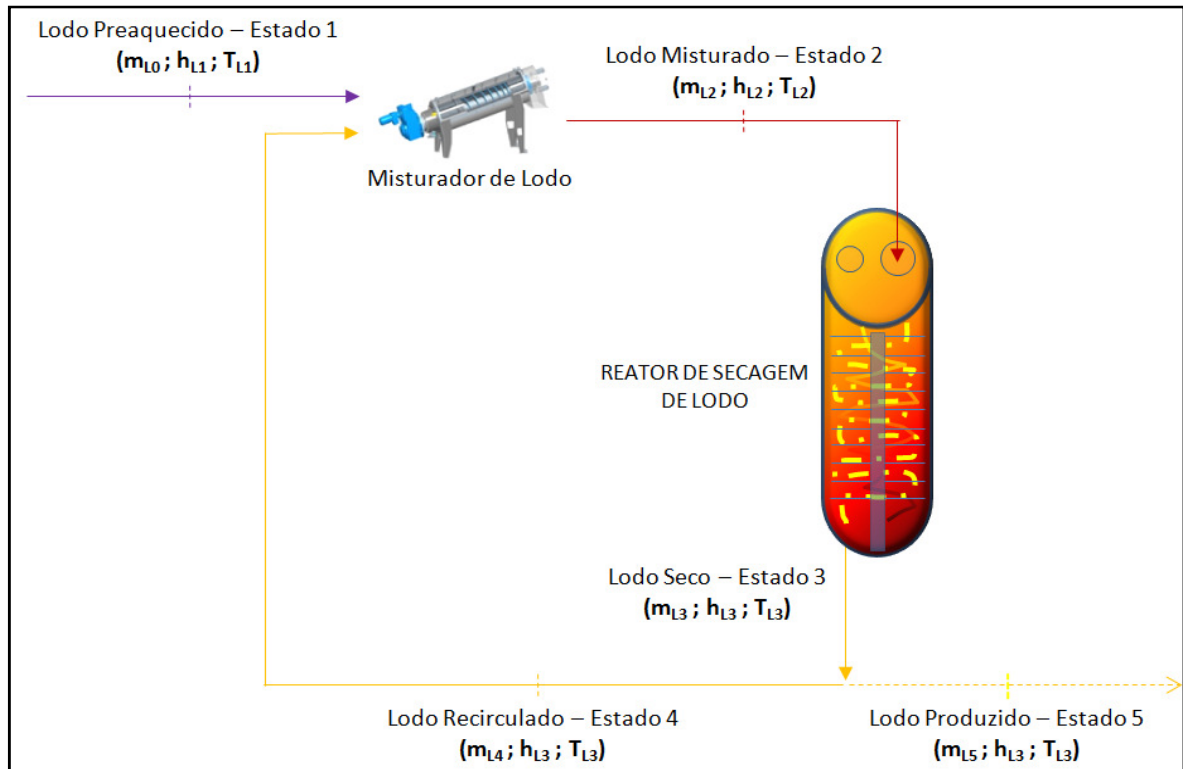


Figura 39 – Etapas envolvidas no submodelo de Balanço de Massa e Energia do Lodo Misturado.
 Fonte: Produção do próprio autor.

A mistura de lodo, úmido no estado 1 com o recirculado no estado 4, tem por objetivo aumentar o teor de ST da mistura que vai alimentar o reator de secagem, eliminando, assim, as características de plasticidade e aderência que o lodo apresenta para alguns teores de sólidos.

Tal mistura vai permitir o ganho de características de sólido duro ao lodo misturado, além de favorecer, em comparação ao lodo úmido, a maior passagem de ar que decorre em ganho de eficiência sobre a velocidade de evaporação da água durante o processo de secagem.

Apesar do teor de umidade do lodo reduzir com a mistura, a quantidade de água a ser evaporada, em massa, será igual e independente do teor de sólidos que foi definido para o lodo misturado. Da mesma forma ocorre com o balanço de energia global da secagem do lodo 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 definido para o lodo seco produzido seja maior em relação ao lodo misturado.

Ressalta-se, ainda, que este balanço de massa e energia apresenta a importância de contabilizar a parcela de energia térmica que é incorporada ao lodo úmido, reduzindo, assim, o gradiente de temperatura entre o ar e o lodo durante a secagem.

As condições consideradas neste submodelo são expostas a seguir:

- A vazão mássica de lodo recirculado é uma variável calculada em função do teor de ST desejado no lodo misturado e do próprio teor de ST do lodo recirculado;
- O teor de ST do lodo misturado foi fixado em 50%, superior ao valor de 40% que apresenta a máxima característica de aderência superficial. A definição de teores de ST diferentes ao definido não influencia no balanço global de massa e energia do MTSL, mas sim no dimensionamento físico dos equipamentos de secagem. No entanto, a avaliação deste último aspecto não faz parte do objetivo deste estudo;
- Conforme nos demais submodelos, as perdas energéticas que poderiam ocorrer em virtude de trocas de calor com a vizinhança pelo sistema termodinâmico, variação de energia cinética e potencial, realização de trabalho ou regime transiente não foram consideradas.

4.6.5.1 Balanço de Massa do Lodo Misturado

O lodo misturado é composto pela união do lodo no estado 2 – saída do regenerador 1 – com o lodo seco recirculado no estado 4 que é proveniente de uma parcela do lodo de saída do reator de secagem, conforme mostra a Equação 77.

(Equação 77)

$$m_{L2} = m_{L0} + m_{L4}$$

Sendo:

m_{L2} : Vazão mássica do lodo no estado 2 $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

m_{L0} : Vazão mássica do lodo úmido no estado 0 – referência $\left(\frac{kg}{s}\right)$;

m_{L4} : Vazão mássica do lodo seco recirculado no estado 4 $\left(\frac{kg}{s}\right)$.

A vazão mássica de lodo recirculado no estado 4 que deve ser misturado ao lodo úmido no estado 1 para atingir o teor de sólidos desejado no lodo misturado foi encontrado com o auxílio da Equação 78 que correlaciona o teor de sólidos desejado no lodo misturado com as características dos demais lodos.

(Equação 78)

$$m_{L4} = \frac{m_{L1}(X_{L0} - X_{L2})}{(X_{L2} - X_{L3})}$$

Sendo: X_{L2} : Teor de ST desejado no lodo misturado no estado 2 (%); X_{L3} : Teor de ST do lodo recirculado no estado 4 (%).

Para o presente estudo o lodo recirculado no estado 4 foi originado pelo próprio lodo de saída do reator de secagem no estado 3, tornando o teor de sólidos iguais em ambos os materiais ($X_{L4} = X_{L3}$). Desta forma, a alimentação deste dado parte, retroativamente, do Submodelo de Balanço de Massa e Energia da Secagem de Lodo, mostrando, novamente, que o MTSL necessita de elevada interatividade durante a manipulação dos submodelos.

Caso o lodo recirculado apresente outra origem ou passe por algum processo que altere as suas características, o teor de sólidos do lodo recirculado deve ser determinado e utilizado na Equação 80 de forma independente do valor do lodo de saída do reator, pois os teores a principio serão diferentes entre si ($X_{L4} \neq X_{L3}$).

Foram definidas as vazões mássicas de lodo seco e de água líquida que constituem o lodo misturado, pois as mesmas apresentam propriedades distintas e devem ser modeladas separadamente no balanço de massa e energia.

VAZÃO MÁSSICA DE LODO SECO NO LODO MISTURADO

A parcela que corresponde a massa seca foi estimada com o auxílio da Equação 79.

(Equação 79)

$$m_{L2_{seco}} = m_{L2} \left(\frac{X_{L2}}{100} \right)$$

Sendo: $m_{L2_{seco}}$: Vazão mássica da base seca presente no lodo misturado no estado 2 $\left(\frac{kg}{s}\right)$; X_{L2} : Teor de ST no lodo misturado no estado 2 (%).

VAZÃO MÁSSICA DE ÁGUA LÍQUIDA NO LODO MISTURADO

A parcela referente a água líquida no lodo misturado foi estimada em função da diferença entre o teor de ST e a unidade, conforme é representado na Equação 82.

(Equação 80)

$$m_{L2\text{água}} = m_{L2} \left(1 - \frac{X_{L2}}{100} \right)$$

Sendo:

$m_{L2\text{água}}$: Vazão mássica de água líquida presente no lodo misturado no estado 2 $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$;

4.6.5.2 Balanço de Massa e Energia do Lodo Misturado

O lodo recirculado no estado 4 apresenta a temperatura diferente do lodo úmido no estado 1, portanto, foi considerado que a mistura permitiu a transferência de calor entre os materiais até que um novo equilíbrio térmico fosse estabelecido.

Adotando a premissa que o processo ocorre em condições adiabáticas, foi considerado que a quantidade de calor trocado entre os fluxos foram iguais, então:

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$\begin{aligned} H_{L2} &= H_{L1} + H_{L4} \\ H_{L2} &= m_{L1} h_{L1} + m_{L4} h_{L4} \end{aligned}$$

Entretanto, sabendo que o lodo é uma mistura de água e massa seca, as vazões e as entalpias foram desmembradas para contabilizar, dentro do balanço de massa e energia, cada parcela do lodo de forma individual, pois a água e a massa seca do lodo apresentam entalpias específicas distintas e proporções diferentes na mistura.

Portanto, o desmembramento das parcelas que envolvem o lodo resultou na Equação 81 que descreve de forma completa a massa seca e a água líquida presentes na mistura. A referida equação também considerou que a vazão mássica entre o estado 0 e o estado 1 do lodo úmido foi conservativa – ou seja – manteve os mesmos valores nos dois estados por não ocorrer transferência de massa.

(Equação 81)

$$H_{L2} = \left(m_{L0\text{seco}} h_{L1\text{seco}} + m_{L0\text{água}} h_{L1\text{água}} \right) + \left(m_{L4\text{seco}} h_{L4\text{seco}} + m_{L4\text{água}} h_{L4\text{água}} \right)$$

Sendo:

$h_{L4\text{seco}}$: Entalpia específica do lodo em base seca no estado 4 $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$;

$h_{L4\text{água}}$: Entalpia específica da água líquida presente no lodo no estado 4 $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$.

Rearranjando a equação 81, foi determinada a temperatura de equilíbrio do lodo misturado, posterior a completa homogeneização do material, pela Equação 82.

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$m_{L2}h_{L2} = m_{L1}h_{L1} + m_{L4}h_{L4}$$

$$h_{L2} = \frac{m_{L1}h_{L1} + m_{L4}h_{L4}}{m_{L2}}$$

$$h_{L2_{seco}} + h_{L2_{\acute{a}gua}} = \frac{m_{L1}h_{L1} + m_{L4}h_{L4}}{m_{L1} + m_{L4}}$$

$$\left[\frac{1434(T_2 - T_0) + 3,29(T_2^2 - T_0^2)}{10^3} \right] + (h_{\acute{a}gua_{T_{L2}}} - h_{\acute{a}gua_{T_{L0}}}) = h_{L1} + \frac{m_{L1}h_{L1}}{m_{L4}} + h_{L4} + \frac{m_{L4}h_{L4}}{m_{L1}}$$

$$\left[\frac{(1434T_2 + 3,29T_2^2)}{10^3} \right] + h_{\acute{a}gua_{T_{L2}}} = \left[h_{L1} \left(1 + \frac{m_{L1}}{m_{L4}} \right) \right] + \left[h_{L4} \left(1 + \frac{m_{L4}}{m_{L1}} \right) \right] + \left[\frac{(1434T_0 + 3,29T_0^2)}{10^3} \right] + h_{\acute{a}gua_{T_{L0}}}$$

(Equação 82)

$$\left[\frac{T_2(1434 + 3,29T_2)}{10^3} \right] + h_{\acute{a}gua_{T_{L2}}} = \left[h_{L1} \left(1 + \frac{m_{L1}}{m_{L4}} \right) \right] + \left[h_{L4} \left(1 + \frac{m_{L4}}{m_{L1}} \right) \right] + \left[\frac{(1434T_0 + 3,29T_0^2)}{10^3} \right] + h_{\acute{a}gua_{T_{L0}}}$$

Sendo:

T_{L2} : Temperatura do lodo misturado no estado 2 – saída do misturador (°C);

$h_{\acute{a}gua_{T_{L2}}}$: Entalpia da água líquida não saturada presente no lodo no estado 2 $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$.

A solução da Equação 82 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 no lado direito são conhecidos. Ressalta-se, ainda, que as entalpias e vazões mássicas do lodo no estado 1 e no estado 4 devem ser desmembradas nas parcelas que correspondem a massa seca e água líquida de forma semelhante a realizada para o lodo no estado 2, entretanto, tal ação não será realizada neste momento.

O lodo misturado no estado 2 e o ar de secagem no estado 4 constituem, juntos, os dois fluxos de entrada no reator de secagem de lodo. Sendo a modelagem de tal reator detalhada na seguir.

4.6.6 Submodelo do Balanço de Massa e Energia do Secador de Lodo

Os dados disponibilizados pelos submodelos anteriores permitiram a alimentação deste submodelo que tem como principal objetivo realizar o balanço de massa e energia da secagem de lodo, demonstrando, quantitativamente, a viabilidade termodinâmica do aproveitamento da energia térmica de baixa temperatura dos sopradores de ar da ETE Araçás para realizar o objetivo descrito.

O secador considerado no MTSL apresenta a configuração de um secador de soleiras múltiplas de contato direto e fluxo contracorrente, conforme é representado na Figura 40, no entanto, o mesmo segue os princípios de transferência de massa e energia dos sistemas evaporativos que foram descritos na revisão bibliográfica.

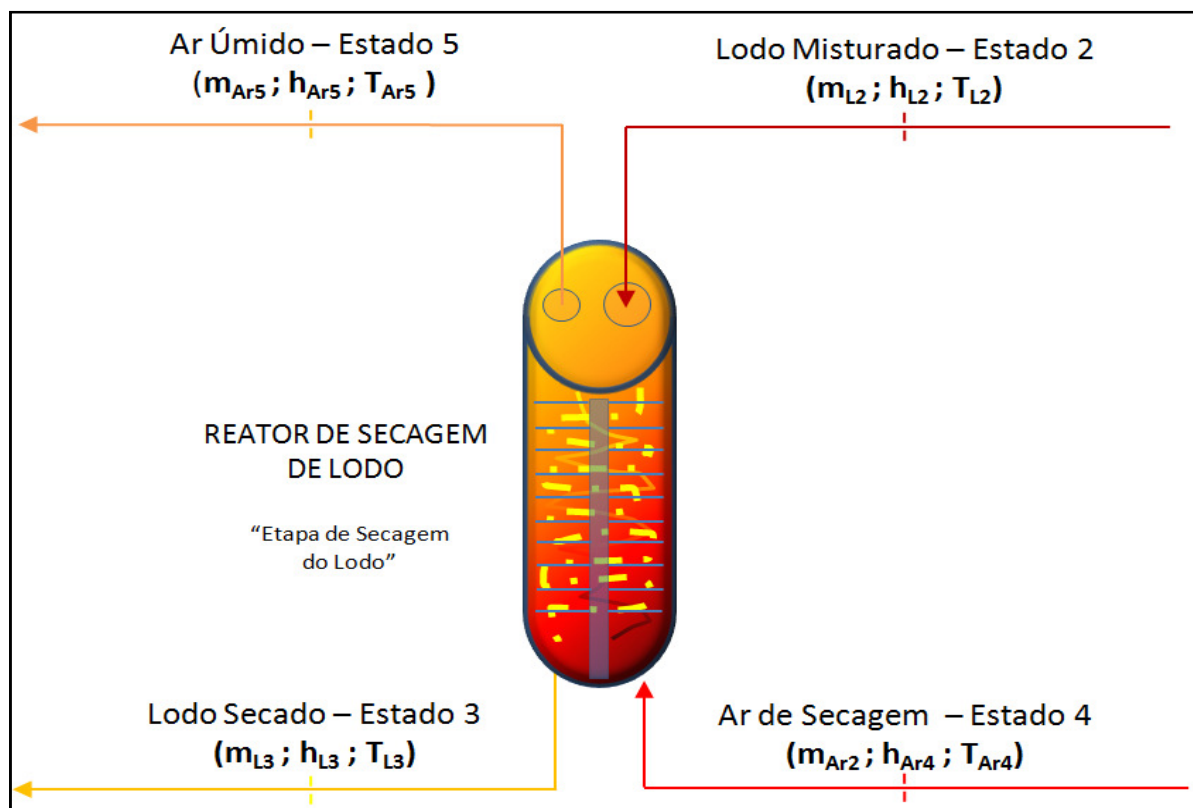


Figura 40 – Fluxos de entrada e saída do reator de secagem de lodo deste submodelo.

Fonte: Produção do próprio autor.

Este submodelo considerou as seguintes premissas e condições para a modelagem:

- Processo adiabático e o reator é um volume de controle em regime permanente;
- O tempo de detenção do ar no secador é suficiente para transferir apenas a vazão mássica de água que foi prevista para evaporar, desde que a umidade relativa do ar de secagem não atinja a condição de saturado;

- A energia necessária para a evaporação da água presente no lodo misturado é, invariavelmente, proveniente do ar de secagem que entra no reator, portanto, a temperatura do ar de secagem irá decrescer à medida que o mesmo percorre a extensão longitudinal do secador, sendo a temperatura do mesmo limitado pelo equilíbrio térmico com o lodo de entrada no reator, desta forma, o processo de evaporação também fica limitada até o referido equilíbrio térmico.
- A vaporização no interior do reator ocorre apenas para a substância água, que por sua vez, é integralmente incorporada ao ar de saída quando evaporada;
- Não há trabalho sendo realizado no interior do secador pelos fluxos e as variações de energia cinética e potencial são consideradas desprezíveis.

Diante do exposto, pode-se afirmar que a somatória das taxas de energia de entrada devem ser igual a somatória das taxas de energia de saída do reator, portanto:

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$\sum_{ent} H = \sum_{sai} H$$

$$H_{L2} + H_{Ar4} = H_{L3} + H_{Ar5}$$

Entretanto, existe a necessidade de incorporar ao balanço a taxa de energia necessária para a evaporação da parcela de água líquida que foi transferida do lodo para o ar, originando a Equação 83 que relaciona de forma resumida o balanço de massa e energia do reator de secagem de lodo.

Tal incremento da taxa de energia de vaporização ocorre em função do emprego da modelagem descrita por Lozano e Valero (1986) para o ar, pois o modelo apresentado pelos referidos autores não considera a entrada na mistura gasosa de massa proveniente de mudança de estado físico, portanto, a energia necessária para a evaporação deve ser modelada separadamente.

(Equação 83)

$$H_{L2} + H_{Ar4} = H_{L3} + H_{Ar5} + H_{W_{eva}}$$

Sendo:

$H_{W_{eva}}$: Taxa de energia para a vaporização d'água $\left(\frac{kJ}{s}; kW\right)$.

A energia para a evaporação da água é o produto da vazão mássica de água evaporada pelas variações de entalpia específica sofrida pela mesma massa entre a entrada e a saída do reator de secagem, seja essa variação no momento da evaporação ou nas mudanças de temperatura nos estados de líquido e vapor. Portanto, a entalpia específica de evaporação pode ser expressa pela Equação 84.

(Equação 84)

$$H_{W_{eva}} = m_{W_{eva}} (\Delta h_{W_{2,T}} + h_{eva_T} + \Delta h_{v_{T,5}})$$

Sendo:

$\Delta h_{W_{2,T}}$: variação de entalpia específica da água líquida entre a entrada no reator de secagem e a evaporação $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$h_{eva_{T_{L2}}}$: Entalpia específica de evaporação d'água líquida na temperatura do lodo no estado 2 $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$\Delta h_{v_{T,5}}$: Variação de entalpia específica do vapor d'água entre a evaporação e a saída do reator de secagem $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Para tal equação, não importa a temperatura T de evaporação que foi escolhida entre a temperatura do lodo de entrada no estado 2 e o ar de saída no estado 5, pois a variação da entalpia específica de evaporação será compensada pelas variações da entalpia específica da água na forma líquida e de vapor.

Portanto, para facilitar os cálculos, foi considerada que toda a água líquida evaporou na temperatura do lodo no estado 2, conforme mostra a equação 85.

(Equação 85)

$$H_{W_{eva}} = m_{W_{eva}} \left[h_{eva_{T_{L2}}} + \left(h_{v_{T_{Ar5}}} - h_{v_{T_{L2}}} \right) \right]$$

Sendo:

$h_{eva_{T_{L2}}}$: Entalpia específica de evaporação na temperatura do lodo no estado 2 $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$h_{v_{T_{Ar5}}}$: Entalpia específica do vapor d'água na temperatura do ar no estado 5 $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

$h_{v_{T_{L2}}}$: Entalpia específica do vapor d'água na temperatura do lodo no estado 2 $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Sendo conhecidos, previamente, os valores de entalpia e taxa de energia do lodo misturado no estado 2 e do ar de secagem no estado 4, bem como as propriedades do lodo no estado 3, pois a temperatura deste último foi fixada de acordo com os testes de cenários, a Equação 85 foi rearranjada e desmembrada da seguinte forma:

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$H_{Ar5} = H_{L2} + H_{Ar4} - H_{L3} - H_{eva}$$

$$H_{Ar5} = H_{L2} + H_{Ar4} - m_{L3} h_{L3} - m_{W_{eva}} \left[h_{eva_{TL2}} + (h_{v_{T_{Ar5}}} - h_{v_{TL2}}) \right]$$

Sendo a taxa de energia do ar no estado 5 o resultado do produto da entalpia específica pela vazão mássica, somado ao conhecimento que a vazão mássica e a entalpia do lodo são formados pela base seca e água líquida, pode-se desmembrar, novamente, o balanço de massa e energia da seguinte forma:

$$h_{Ar5} m_{Ar5} = H_{L2} + H_{Ar4} - (m_{L3_{seco}} h_{L3_{seco}} + m_{L3_{\acute{a}gua}} h_{L3_{\acute{a}gua}}) - m_{W_{eva}} \left[h_{eva_{TL2}} + (h_{v_{T_{Ar5}}} - h_{v_{TL2}}) \right]$$

$$h_{Ar5} = \frac{H_{L2} + H_{Ar4} - (m_{L3_{seco}} h_{L3_{seco}} + m_{L3_{\acute{a}gua}} h_{L3_{\acute{a}gua}}) - m_{W_{eva}} \left[h_{eva_{TL2}} + (h_{v_{T_{Ar5}}} - h_{v_{TL2}}) \right]}{m_{Ar5}}$$

Sendo a vazão mássica do ar na saída do reator composta pela vazão mássica de ar da entrada com o acréscimo da vazão mássica de água evaporada, a entalpia específica no estado 5 pode ser expressa, finalmente, na forma da Equação 86.

(Equação 86)

$$h_{Ar5} = \frac{\left\{ H_{L2} + H_{Ar4} - (m_{L3_{seco}} h_{L3_{seco}} + m_{L3_{\acute{a}gua}} h_{L3_{\acute{a}gua}}) - m_{W_{eva}} \left[h_{eva_{TL2}} + (h_{v_{T_{Ar5}}} - h_{v_{TL2}}) \right] \right\}}{m_{Ar2} + m_{W_{eva}}}$$

Portanto, a única parcela não conhecida é a entalpia específica do ar na saída do reator e a vazão de ar na descarga do soprador do MTSL, sendo as demais parcelas estimadas, previamente, nos submodelos anteriores e a temperatura do lodo seco na saída do reator foi um dado informado durante os testes de cenários em virtude da temperatura desejada para o material. Desta forma, a variação dos valores de vazão mássica possibilitaram a determinação da entalpia do ar no estado 5.

Diante da entalpia específica do ar no estado 5 foi determinada a temperatura para o respectivo estado pela regressão da Equação 51 até que a entalpia específica da mesma fosse igual a encontrada na Equação 86 e a temperatura fosse revelada.

4.6.6.1 Índice Térmico do Secador

A temperatura do ar no estado 5 é um importante dado para avaliar a capacidade de secagem de lodo pela fonte quente no MTSL, pois a referida temperatura deve ficar entre a temperatura do ar no estado 4 e do lodo no estado 2.

$$T_{L2} \leq T_{Ar5} < T_{Ar4}$$

Desta forma, foi desenvolvido o Índice Térmico do Secador (*ITS*), que faz referência na relação de temperatura do lodo no estado 2 com o ar no estado 5, conforme é descrito na Equação 87.

(Equação 87)

$$ITS = \frac{T_{L2}}{T_{Ar5}}$$

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 elevada taxa 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 opera nas proximidades da máxima capacidade térmica ou do limite termodinâmico da secagem do lodo, portanto, a partir deste ponto qualquer incremento na demanda por calor para a secagem do lodo ou redução na taxa de energia do ar de secagem, implicará, inevitavelmente, no não alcance da temperatura definida para o lodo na saída do reator de secagem (estado 3), porque o lodo na entrada do reator (estado 2) e o ar na saída do reator (estado 5) estão no limiar de atingirem o equilíbrio térmico.

ITS $>$ 1: significa que a máxima capacidade de secagem ou o limite termodinâmico foi ultrapassado e a temperatura do lodo na saída do secador (estado 3) não atingirá o valor predefinido (será inferior), portanto, tal resultado indica que a secagem

simulada, nas condições definidas pelo no cenário de teste, não foram satisfatórias e, por conseqüência, os dados gerados não são consistentes termodinamicamente.

4.6.6.2 Índice Energético do Secador

Conforme visto na revisão bibliográfica, trocadores de calor de contato indireto apresentam a propriedade da efetividade para indicar a parcela de energia que foi trocada entre dois fluxos. A partir deste conceito foi desenvolvido o Indicador Energético do Secador (IES) que relaciona a quantidade de calor trocada pelo ar de secagem pelo máximo valor possível nas condições do teste.

O Índice Energético do Secador, considerando o mesmo como um volume de controle adiabático, pode ser calculado pela Equação 88 que correlaciona a variação de temperatura ocorrida no ar de secagem com a máxima variação possível.

Desenvolvendo o conceito descrito:

$$IES = \frac{\bar{C}_{Ar4}(\Delta T_{Ar4,5})}{\bar{C}_{Ar4}\Delta T_{Ar_{max}}} = \frac{\bar{C}_{Ar4}(T_{Ar4} - T_{Ar5})}{\bar{C}_{Ar4}(T_{Ar4} - T_{L2})}$$

(Equação 88)

$$IES = \frac{T_{Ar4} - T_{Ar5}}{T_{Ar4} - T_{L2}}$$

Sendo:

IES: Índice Energético do Secador (adimensional);

C_{Ar4} : Capacidade térmica do ar no estado 4 $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}; \frac{kJ}{s^{\circ}C}\right)$;

C_{L2} : Capacidade térmica do lodo no estado 2 $\left(\frac{kW}{^{\circ}C}; \frac{kJ}{s^{\circ}C}\right)$.

O *IES* representa a parcela da energia que foi 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.

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:

$$0 < IES \leq 1$$

$IES \approx 0$: significa que a quantidade de energia disponibilizada para realizar a secagem e higienização é muito superior a demandada pelo lodo, indicando que a

taxa de energia aplicada é excessiva e o processo opera na condição ótima termodinamicamente;

$IES \approx 1$: significa que toda a energia disponível no ar de secagem foi utilizada pelo lodo durante o processo de secagem, indicando que o processo alcançou a capacidade máxima em relação a energia disponível no reator ou o limite termodinâmico do sistema.

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

Portanto, esse índice permitiu avaliar, em conjunto com a *ITS*, a viabilidade termodinâmica da secagem de lodo úmido da ETE Araçás pelo calor dissipado pelos sopradores de ar da própria estação.

4.7 TESTES DE CENÁRIOS E RESULTADOS FINAIS

Com base nos dados obtidos da ETE Araçás em relação aos sopradores e o lodo úmido, foram propostos 6 cenários, 2 baseados nas condições de operação de 2014 e 4 baseados nas condições de projeto, permitindo avaliar a capacidade de secar e higienizar o lodo úmido produzido na referida estação com o aproveitamento da energia térmica dissipada pelos seus próprios sopradores de ar.

Os cenários propostos foram definidos em função dos dois principais objetivos do tratamento térmico de lodo que são secar o material e higienizá-lo. Portanto, posterior a revisão bibliográfica, os testes de cenários foram propostos pela combinação das condições de temperatura de 40, 60 e 80°C e secagem de 55 a 90% de ST no lodo de saída do reator de secagem. Valores inferiores aos 55% de ST no lodo não foram modelados, pois o valor mínimo, em virtude da mistura de lodo úmido com lodo seco recirculado, foi fixado em 50%.

4.6.7 Testes nas Condições do ano de 2014

O cenário proposto, para as condições de operação de 2014, avaliou a capacidade de secagem com higienização do lodo produzido da ETE Araçás nas condições mais severas, deste estudo, que são 80°C e 90% de ST no lodo de saída do reator de secagem. Sendo o cenário 1 construído para avaliar a capacidade térmica e energética máxima, definida como o ponto ótimo termodinâmico, além das regiões que representam os limites termodinâmicos da operação do sistema para quando o IES e ITS tendem a unidade.

A vazão mássica de ar no soprador do MTSL foi a única variável alterada para todos os dois cenários descritos, sendo a capacidade máxima e o ponto otimizado de operação identificados e avaliados em função dos ITS e IES, além da UR do ar na saída do reator de secagem, conforme é descrito na Figura 41 que mostra o fluxograma detalhado das condições de cada cenário testado.

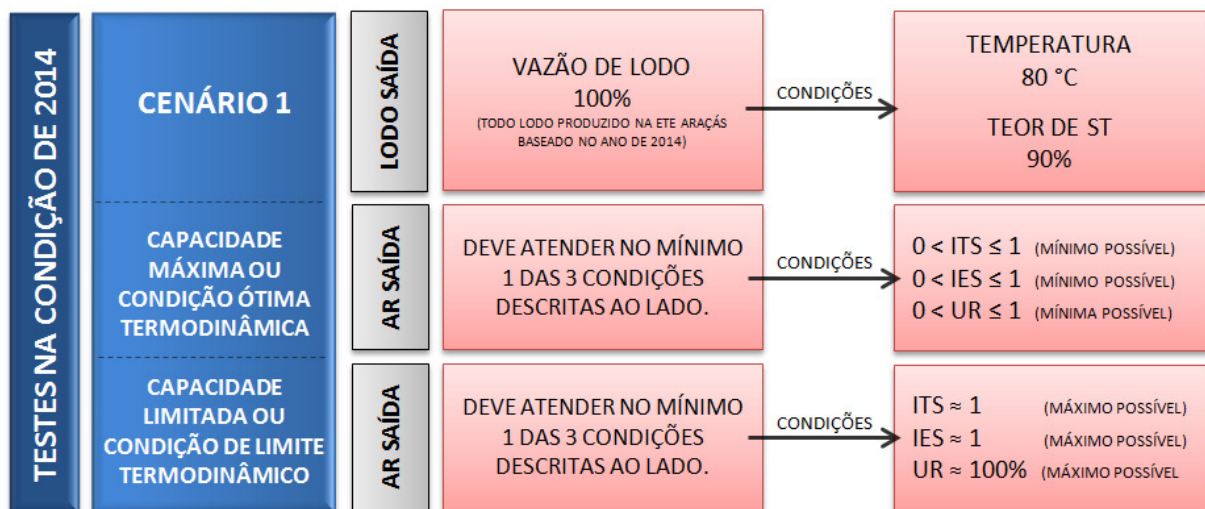


Figura 41 – Fluxograma representando os testes sobre o ar de secagem e o lodo no cenário 1.

Fonte: Produção do próprio autor.

A identificação do ponto ótimo do teste foi identificado com o auxílio da ferramenta *Solver* do *Software Microsoft Excel®*.

4.6.8 Testes nas Condições Previstas em Projeto

Os cenários propostos para as condições de operação previstas em projeto, também denominadas de “condições de projeto”, avaliaram a capacidade de secar o lodo produzido da ETE Araçás.

O cenário 2 avalia, igualmente ao cenário 1, o ponto ótimo e os limites termodinâmicos da operação do secador para as condições de projeto.

Como medida preventiva, foram propostos os cenários alternativos 3, 4 e 5, que devem ser testados, unicamente, quando os cenários 1 e/ou 2 não apresentam viabilidades termodinâmicas favoráveis para processar o lodo da ETE Araçás.

Tais cenários alternativos visam avaliar a viabilidade termodinâmica em condições diferentes das previstas para os primeiros cenários, variando, para isso, a vazão de lodo processada no MTSL para o cenário 3 e, ainda, reduzindo a temperatura de trabalho do lodo no reator de secagem no cenário 4 para 60°C.

Para o cenário 5 o objetivo principal foi apenas a secagem, baseando puramente no princípio do resfriamento evaporativo, pois a temperatura de trabalho definida foi de 40°C e o teor de ST de 90% para o lodo na saída do reator.

A vazão mássica de ar do soprador do MTSL continuou sendo a única variável alterada, exceto para os cenários 3 e 4 que permitiram variar a quantidade de lodo submetido a secagem até alcançar a viabilidade na operação do sistema.

Todos os cenários descritos foram avaliados em função dos ITS e IES, além da UR do ar na saída do reator, conforme é descrito na Figura 42 que mostra o fluxograma detalhado das condições de cada cenário proposto.

Ressalta-se, ainda, que para cada cenário, individualmente, foram calculadas as umidades absolutas e relativas do ar de saída, além das temperaturas do ar e do lodo para compor o perfil dos fluxos durante a modelagem de cada cenário.

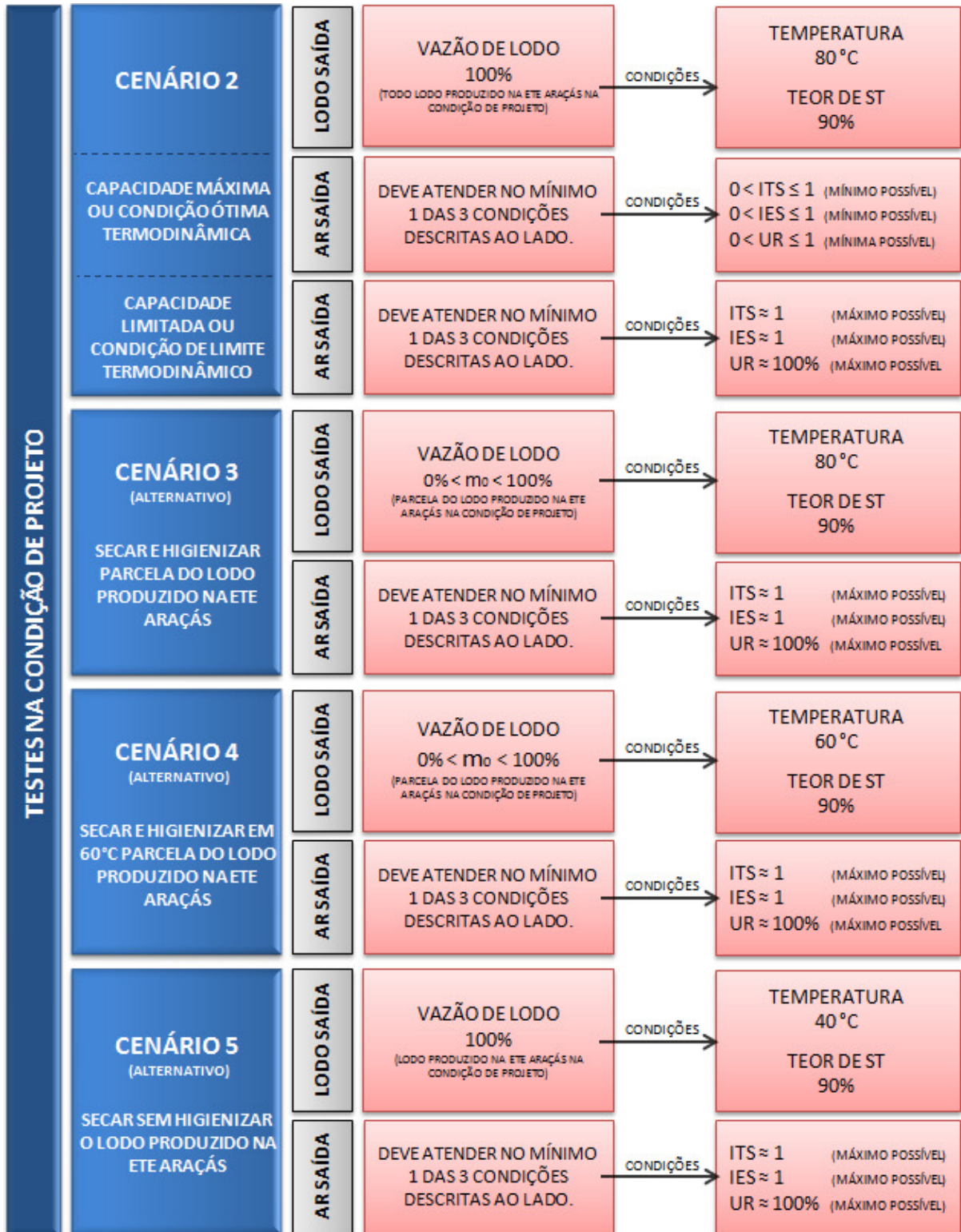


Figura 42 – Testes de cenário para a condição de projeto da ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA FONTE TÉRMICA E DO LODO ÚMIDO

A fonte quente e o lodo úmido estudados são provenientes da ETE Araçás, que opera com um sistema de Lodo Ativado com tecnologia UNITANK. A capacidade da referida estação é de $34.488 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ – $399 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ de vazão média – conforme mostra a Tabela 5 com os principais dados técnicos sobre as capacidades médias da estação em relação ao projeto e a realizada ao longo do ano de 2014.

Tabela 5 – Resumo das capacidades utilizadas no ano de 2014 e de projeto da ETE Araçás.

CONDIÇÃO	VAZÃO ^I		MO CARBONÁCEA ^{II}		LODO DESAGUADO ^{III}		
	Média (L/s)	Diária (m ³ /d)	DBO _{5,20} (mg/L)	COC (kg/d)	ST (%)	MS (kg/d)	Lodo Úmido (kg/d)
ANO 2014 ^{IV}	308	26.611	253	6.732	17,73	1.713	9.657
PROJETO ^V	399	34.474	296	10.204	25,00	7.226	28.904
VARIAÇÃO	-23%	-23%	-15%	-34%	-29%	-76%	-67%

Fonte: Produção do próprio autor.

Notas:

I: Baseado na vazão média de esgoto bruto;

II: Materia Orgânica (MO) Carbonácea apresenta a Carga Orgânica Carbonácea (COC) baseada no produto da vazão média diária com a DBO_{5,20} do esgoto bruto;

III: Lodo desaguado pelo processo de centrifugação - Massa Seca (MS) baseado nos teores de ST do lodo;

IV: Valores reais, obtidos através de medições e análises;

V: Premissas do projeto.

Observa-se que a estação, ao longo do ano de 2014, operou com 77% da capacidade volumétrica prevista em projeto e, devido também a redução de 15% das concentrações de DBO_{5,20}, com apenas 66% da carga orgânica carbonácea prevista no projeto da ETE.

Desvios consideráveis também foram encontrados na produção de lodo de 2014, uma vez que foi gerada apenas 24% da quantidade em massa seca prevista no projeto, não proporcional aos 66% da carga orgânica carbonácea que foi tratada para o mesmo período.

5.1.1 Fonte Térmica da ETE Araçás

A fonte térmica adotada neste estudo foram os sopradores de ar do sistema de aeração da ETE Araçás, sendo a origem do aproveitamento da energia térmica, especificamente, no ar descarregado pelos referidos equipamentos.

Na ETE Araçás, o soprador é um dos componentes que formam o conjunto motor soprador, sendo o motor elétrico o responsável por fornecer a energia mecânica necessária para que o soprador, por meio de um conjunto de polias e correias, possa realizar a compressão e deslocamento do ar que foi succionado no interior do galpão, fornecendo ar para o sistema de aeração da estação.

A Figura 43 ilustra um conjunto motor soprador desacoplado e sem a grade de proteção durante uma manutenção corretiva na ETE Araçás.



Figura 43 – Conjunto motor soprador SO-01/E durante uma manutenção corretiva na ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

O sistema de aeração da ETE Araçás é do tipo ar difuso, apresentando nos seus principais componentes os conjuntos motores sopradores, válvulas e registros, tubulações de distribuição principal (tronco) e secundárias de ar soprado e, no final, os difusores de ar instalados no interior dos reatores de aeração.

A Figura 44 mostra o barrilete que recebe as descargas de ar dos sopradores e a Figura 45 os difusores durante uma manutenção corretiva na ETE Araçás.



Figura 44 – Na seqüência da direita para a esquerda, barrilete, registros e válvulas, conjuntos motores sopradores da ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 45 – Parte interna do reator de aerção “C” da ETE Araçás durante um período de manutenção corretiva com destaque para os difusores de ar instalados no fundo.

Fonte: Produção do próprio autor.

Os sopradores de ar são do tipo deslocamento positivo, modelo ROOTS e da fabricante OMEL. O sistema apresenta 5 conjuntos instalados, pois o projeto foi

concebido para que os mesmos fossem operados na forma 4+1 – ou seja – 4 conjuntos operando em paralelo e 1 de reserva, mas de acordo com a capacidade de tratamento utilizada na estação os conjuntos em operação poderiam ser reduzidos para disponibilizar apenas o ar necessário para tratar a carga orgânica afluyente do período.

Este cenário de operação do sistema de aeração, número reduzido de equipamentos, foi observado na ETE Araçás durante o ano de 2014, pois o sistema de aeração era operado de forma 3+2 e a vazão de esgoto bruto foi inferior ao valor médio de projeto, conforme mostra o Quadro 7 que retrata os principais dados dos conjuntos motores sopradores para o período de 2014 e em projeto.

Quadro 7 – Dados técnicos do projeto dos conjuntos motor sopradores da ETE Araçás.

CONDIÇÃO	SOPRADORES					MOTOR ELÉTRICO		INDICADOR ^{VI}	
	Modelo	Quantidade ^I (Unid)	Vazão ^{II} (m ³ /s)	Pressão ^{III} (Bar)	Rotação ^{IV}		Potência ^V (kW)	kW/m ³	kW/ kgDBO _{5,20}
					RPM	%			
2014	SRT2767	3	5,709	710	1370	72	485,76	0,0182	0,07211
PROJETO		4	7,612	610			588,80	0,0171	0,05768
VARIAÇÃO	-	-25%	-25%	-14%	-	-	-18%	7%	25%

Fonte: Produção do Próprio autor.

Notas:

I: Médias de equipamentos em operação ao longo de 2014 e previstas em projeto.

II: Vazão de sucção detalhada na folha de testes do equipamento com base na quantidade de sopradores operando.

III: Pressão Manométrica média registrada durante o monitoramento de temperatura do ar dos sopradores e na folha de testes.

IV: Rotação média dos sopradores detalhada na folha de testes dos equipamentos e a capacidade utilizada em relação a máxima permitida.

V: Potência do motor elétrica é a média obtida no monitoramento em campo em 2014 e o valor previsto em projeto pela quantidade de equipamentos em operação.

VI: Baseado nas quantidades diárias de esgoto bruto, DBO_{5,20} e potência utilizada.

Os indicadores de potência por volume de esgoto tratado ou DBO_{5,20} afluyente retratam que, apesar da vazão e carga orgânica afluyente serem inferiores a projetada para o ano de 2014, o uso do sistema de aeração foi superior a demandada para a referida carga afluyente, pois os dois indicadores apresentaram valores superiores no ano de 2014 em comparação ao projeto.

Em virtude do cenário exposto, os testes do MTSL foram previstos para a condição de operação de 2014 e a de projeto, possibilitando que a quantidade de sopradores

operados fique em igual proporção para a carga orgânica afluyente da ETE Araçás que, conseqüentemente, deve ser proporcional a produção de lodo.

5.1.1.1 Termografia dos Conjuntos Motor Sopradores

Com o uso de uma câmara termográfica foi realizada uma avaliação térmica dos conjuntos motores sopradores e dos componentes próximos aos mesmos para avaliar o local que poderia apresentar as condições mais propícias, relacionadas a superfície de contato e temperatura, para realizar o aproveitamento do calor dissipado pelo sistema.

A termografia revelou que os pontos de maior temperatura estavam localizados na descarga de ar dos sopradores, principalmente entre a válvula de segurança e o início do barrilete (46, 47 e 48). Ressalta-se que a Figura 47 foi realizada em conjunto com as demais imagens termográficas, mas o equipamento não foi parametrizado com a data correta.

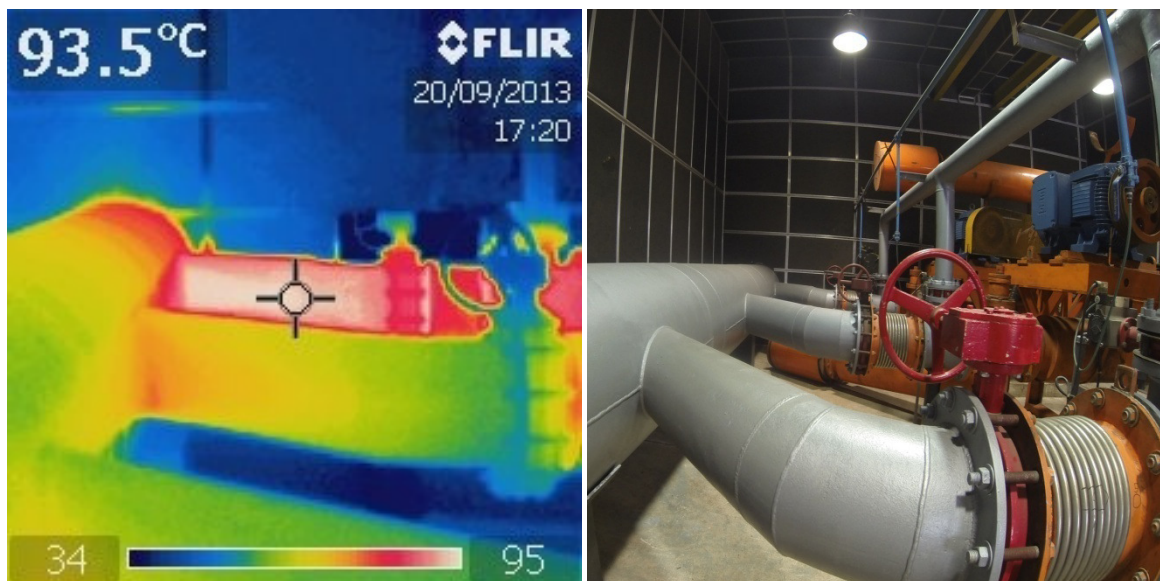


Figura 46 – Termografia da descarga e barrilete com o SO-01/A operando em plena carga.

Fonte: Produção do próprio autor.

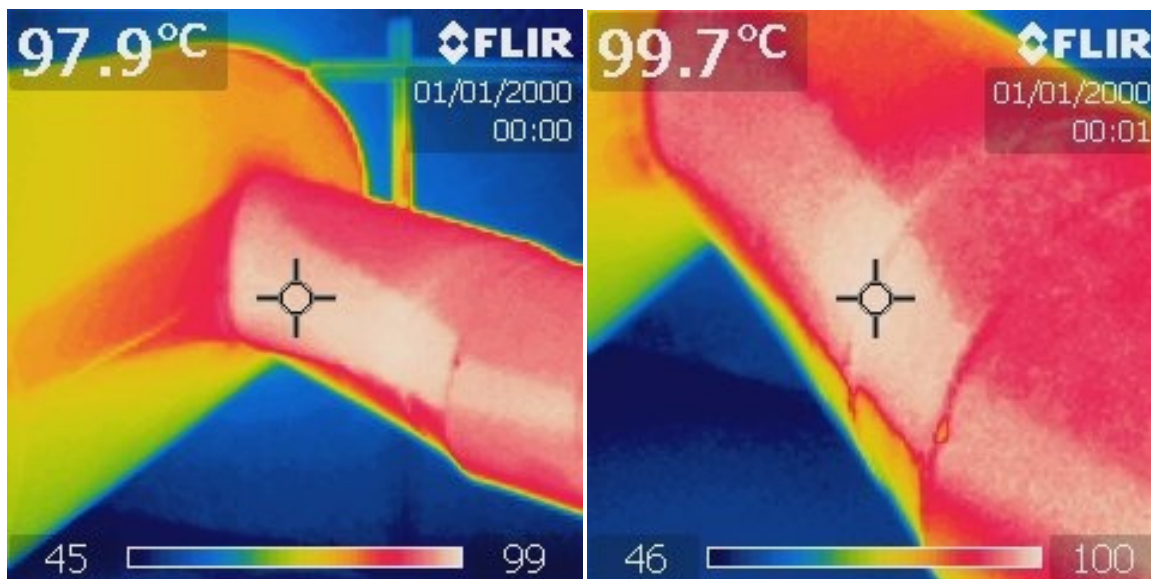


Figura 47 – Descarga e barrilete do SO-01/A em operação plena.

Fonte: Produção do próprio autor.

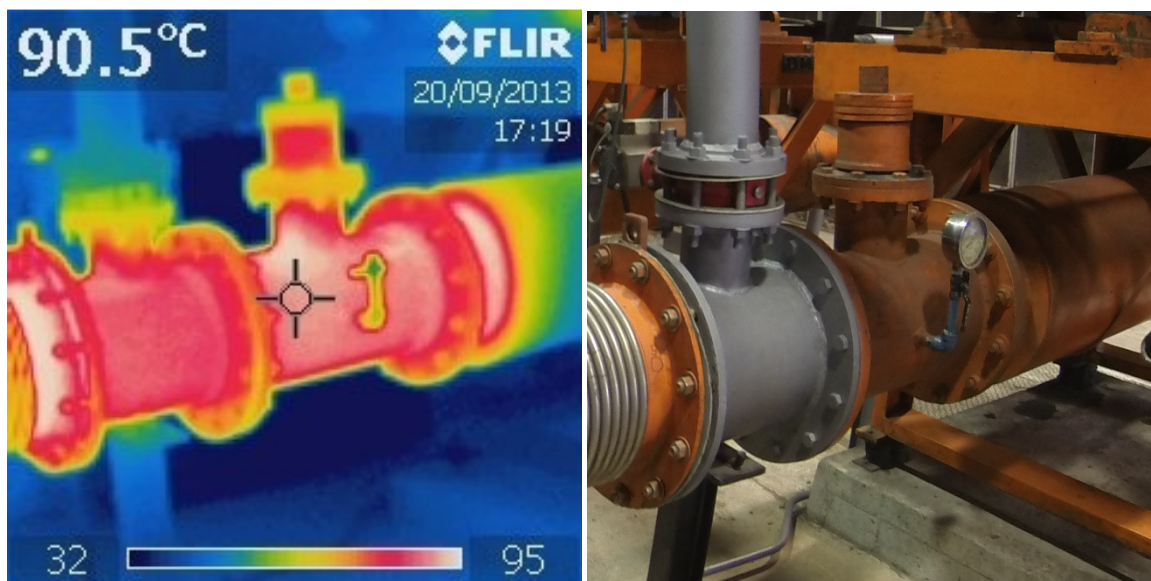


Figura 48 – Termografia da superfície da válvula de segurança do SO-01/A que operava em plena carga.

Fonte: Produção do próprio autor.

Outros pontos foram avaliados como, por exemplo, o início da tubulação tronco de distribuição de ar, e as temperaturas mostraram-se inferiores a encontrada na descarga dos sopradores (Figura 49).

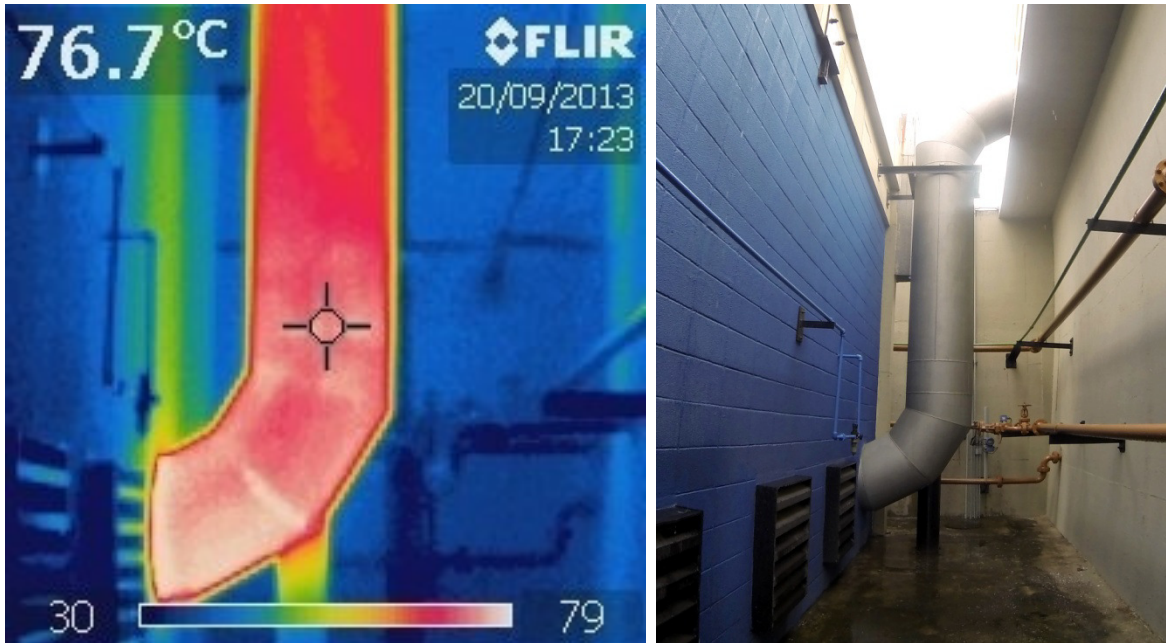


Figura 49 – Termografia do início da tubulação tronco de distribuição de ar que sai do galpão dos sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

Diante da avaliação realizada, foi identificado que o local de maior potencial de aproveitamento de energia térmica era a descarga de ar dos sopradores, definindo, assim, que a origem do calor dos sopradores (fonte térmica) seria considerada como o ar descarregado pelos mesmos.

As medições termográficas evidenciaram apenas a temperatura superficial da tubulação de aço carbono na descarga dos equipamentos, sendo uma medição de maior profundidade necessária para verificar a real temperatura do ar soprado no interior da tubulação. Portanto, medições de temperatura foram realizadas na descarga com o auxílio de um termômetro digital de haste e uma adaptação para acoplar o mesmo na descarga do soprador da ETE Araçás.

5.1.1.2 Monitoramento de Temperatura de Bulbo Seco

Ao contrário da avaliação termográfica realizada no ano de 2013, o período de monitoramento do ar com o termômetro foi realizado durante 10 dias consecutivos no ano de 2014 entre as datas de 18 e 27 de março. Os resultados do monitoramento de temperatura se encontram na Figura 50 e os dados gerados estão na Tabela 6.

O ano de 2013 foi caracterizado pelo aumento da vazão tratada na ETE Araçás em virtude da interligação de novas redes coletoras e, por conseqüência, passando a operar com 3 sopradores de ar em paralelo ao final do ano de 2013. Por este motivo o monitoramento de temperatura foi realizado no ano de 2014.

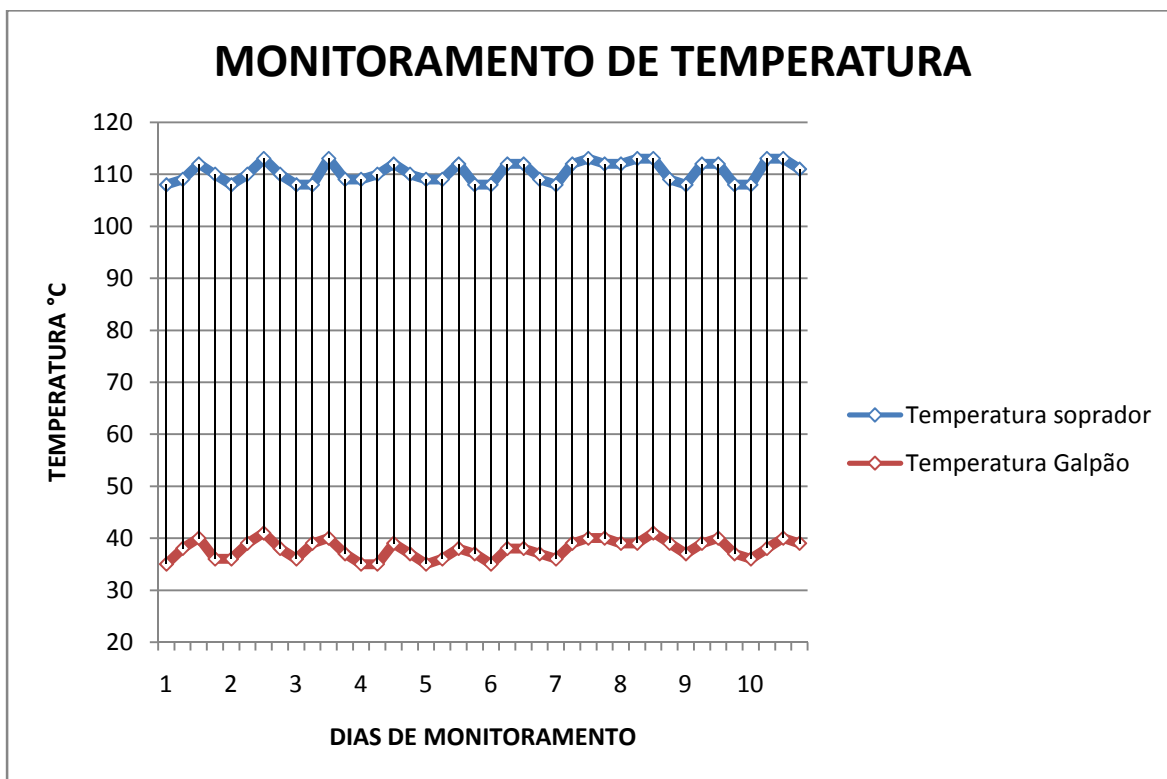


Figura 50 – Distribuição das temperaturas monitoradas no ar ambiente do galpão e ar na descarga do soprador SO-01/A da ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 – Média dos monitoramentos de temperatura na ETE Araçás.

LOCAL	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
Temperatura do Ar do Soprador (°C)	110	112	113	1,93
Temperatura do Ar do Galpão (°C)	35	38	41	1,79
Variação de Temperatura (°C)	75	74	75	-

Fonte: Produção do próprio autor.

O galpão dos sopradores é revestido internamente em toda a área superficial das paredes e teto por isolante acústico e térmico, o que resulta em uma temperatura média do ar ambiente no interior do recinto superior a temperatura externa. Considerando a temperatura média de 24,9°C e 78% de UR no ar de referência ou ar atmosférico externo ao galpão dos sopradores, a variação de temperatura é da ordem de 13,1°C.

Tais valores de temperatura e UR do ar atmosférico são do monitoramento climático do município de Vitória/ES, cidade vizinha e com características semelhantes a cidade de Vila Velha. O uso destes valores como os dados de referência para o estudo foi realizado, além da semelhança dos municípios, devido ao histórico climático existente em Vitória e referencialmente com base em Correa (2011) e Marchioro (2012).

A dissipação de calor na superfície dos motores, sopradores, tubulações e conexões, associada ao revestimento térmico, é a principal causa da diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo do galpão.

A temperatura do ar na descarga dos sopradores apresenta uma variação proporcional ao do ar ambiente do galpão na maioria dos dias monitorados (Figura 50 e a Tabela 6). Observa-se que a variação média foi de 74°C entre a temperatura do ar ambiente no galpão dos sopradores e o ar na descarga dos sopradores.

O aumento de temperatura é coerente ao se considerar a pressão manométrica média de operação de 0,710 bar com o percentual de rotação empregado nos sopradores de 72%, podem ser avaliados pelo diagrama da variação de temperatura do ar de saída dos sopradores da ETE Araçás que foi apresentado na Figura 6 e será rerepresentando agora na forma da Figura 51.

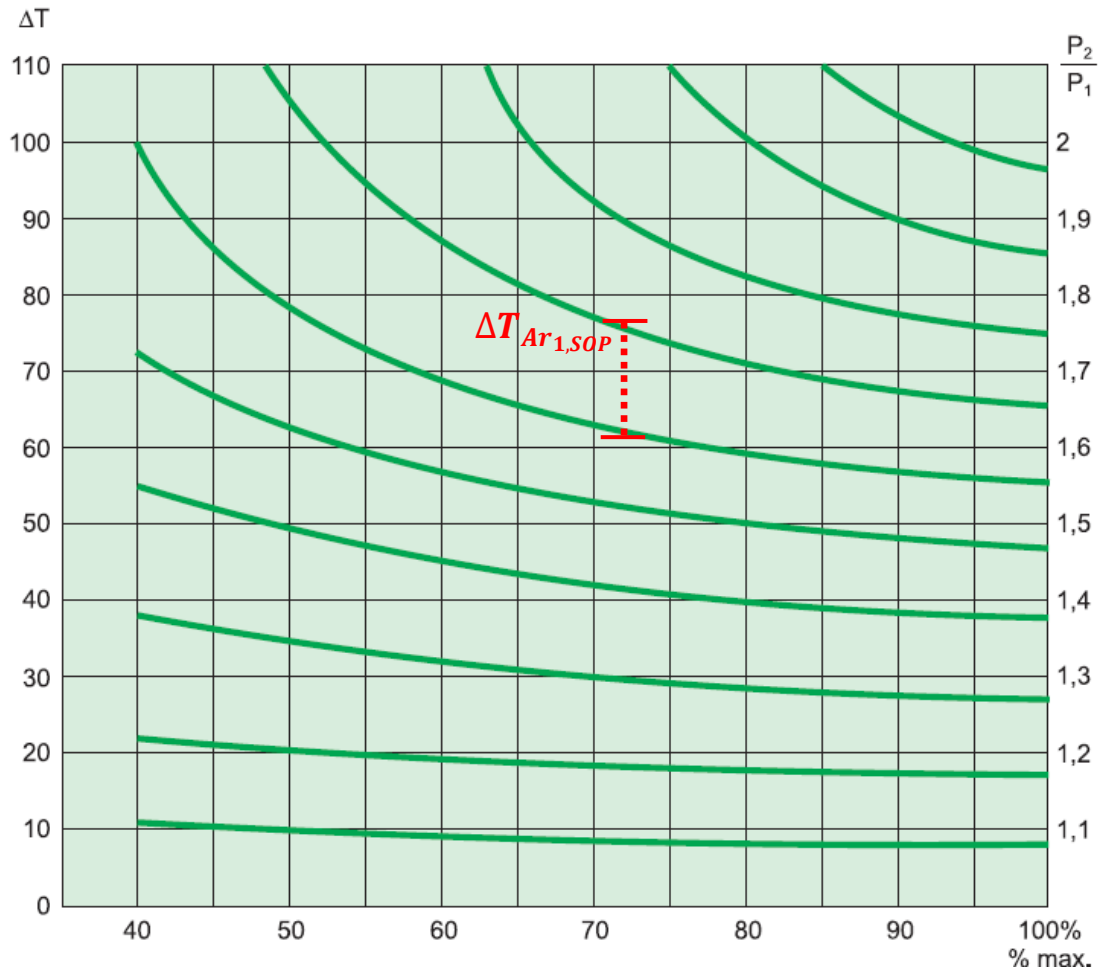


Figura 51 – Diagrama da variação de temperatura dos sopradores de deslocamento positivo da fabricante OMEL.

Fonte: Adaptado de OMEL, 2014.

5.1.1.3 Caracterização Final do Desempenho do Soprador de Ar da ETE Araçás

Diante dos dados apresentados e utilizando-se as equações descritas na metodologia e o ar externo ao galpão dos sopradores como referência, foram estimadas as vazões de ar, umidades, entalpias específicas e, por fim, a máxima energia térmica disponível no ar dos sopradores da ETE Araçás (Tabela 7).

Tabela 7 – Dados de entrada no MTSL e simulação Energética dos sopradores da ETE Araçás

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES TÉRMICAS		
		VAZÃO		UMIDADE		Tem. (°C)	Entalpia ^{II} (kJ/kg)	Energia Disponível ² (kJ/s)
		Vol. (m ³ /s)	Mássica (kg/s)	Relativa (%)	Absoluta ^I (kg v/ kg ar)			
-	Ar Referência	-	-	79,00		24,2	0,00	0,00
2014	Sucção Sop.	5,709	5,416	34,45	0,01501	38,0	14,04	90,89
	Descarga Sop.	-		0,30		112,0	89,84	581,65
PROJETO	Sucção Sop.	7,612	8,554	34,45		38,0	14,04	121,19
	Descarga Sop.	-		0,30	112,0	89,84	775,53	

Fonte: Produção do próprio autor.

Notas:

I: Baseada na temperatura de referência - Equações 51, 60, 68, 75 e 86.

II: Baseado na energia disponível e que poderia ser aproveitada para secar o lodo. Equação 61, 69, 76, 83.

A taxa de energia na tabela acima representa o valor disponível para ser recuperado do ar descarregado pelos sopradores na ETE Araçás. Entretanto, nem toda essa energia poderá ser utilizada em virtude das perdas e irreversibilidades existentes e que são, por exemplo, contabilizadas pela efetividade dos trocadores de calor, equipamento que foi dimensionado para recuperar essa parcela de energia.

5.1.2 Caracterização do Lodo Úmido

O lodo sedimentado no fundo dos tanques de decantação do sistema de Lodo Ativado é bombeado de forma contínua para a fase de tratamento de sólidos que apresenta as etapas de digestão aeróbia, adensamento por gravidade com duas unidades operando em paralelo e, posteriormente, uma última etapa de desaguamento, que é composta pelo processo de centrifugação e que emprega uma emulsão de polímero catiônico para aumentar a eficiência do desaguamento.

A Figura 52 ilustra os processos que o lodo produzido na ETE Araçás é submetido, com as respectivas variações de concentrações, até alcançar o estado de lodo úmido no processo de centrifugação. A Figura 53 ilustra uma visão aérea da planta real.

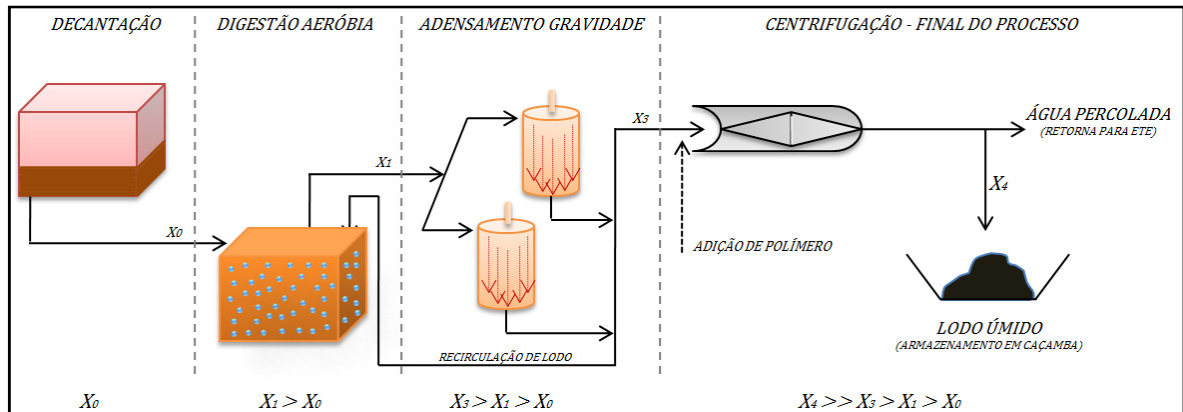


Figura 52 – Fluxograma das etapas de tratamento que o lodo é submetido até a formação da torta de lodo úmido pela centrifuga.

Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 53 – Polígono a esquerda delimita o digester e adensadores de lodo, enquanto o polígono a direita representa o galpão de centrifugação e a caçamba de armazenamento de lodo úmido.

Fonte: Produção do próprio autor.

Na concepção de projeto o lodo de excesso removido a partir dos decantadores seria digerido no digester aeróbio até a fração de sólidos suspensos voláteis representarem 51,22% sobre a parcela de sólidos suspensos totais. O teor de ST de 1,3% seria elevado em média para 3% nos adensadores de lodo e, em seguida, para o desaguamento final na centrifuga, que permitiria uma produção de lodo úmido com valores de 25% de ST. Entretanto, o monitoramento realizado ao longo do ano de 2014 revelou significativas variações no teor de ST, conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Monitoramento do lodo nas diversas etapas do tratamento em comparação ao projeto.

CONDIÇÃO	DECANTADOR ^I	DIGESTOR AERÓBIO ^{II}		ADENSADORES	CENTRIFUGAÇÃO
	Concentração (mg/L)	Concentração (mg/L)	Fração Volátil (%)	Teor de ST (%)	Teor ST Lodo Úmido (%)
2014	13.458	12.877	72,50	2,77	17,73
PROJETO	8.000	13.000	51,22	3,00	25,00
VARIAÇÃO	68,2%	-0,95%	41,6%	-7,8%	-29,0%

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Baseado no monitoramento analítico de SST.

Os teores de ST no lodo centrifugado são, em média, 28,1% inferiores ao previsto em projeto. Informações recebidas da equipe de operação local relatam que o custo envolvido no transporte e aterro de lodo com maior umidade ainda são viáveis em comparação ao custo de energia elétrica e polímero para digerir e desaguar o lodo até o valor de 25% de ST, mas nenhum balanço de custos foi apresentado.

A afirmação da equipe responsável pelo processo apresenta fundamento, pois a energia elétrica e o polímero são os dois principais insumos do processo de tratamento do lodo, sendo a energia empregada para promover a digestão aeróbia do lodo e o polímero no aumento da eficiência de captura de sólidos na centrifuga. Portanto, ao aumentar a produção de lodo úmido pela baixa eficiência na digestão aeróbia, elevando o custo da centrifugação e destinação final do lodo, a redução de energia elétrica pela baixa aeração do digestor compensa, financeiramente, o acréscimo de custo sobre a parcela referente à destinação final do lodo.

O comportamento da produção de lodo no ano de 2014 foi detalhada na Figura 54 pela exposição das produções de lodo úmido e as parcelas correspondentes de água e massa seca, além da vazão média de esgoto bruto na ETE Araçás.

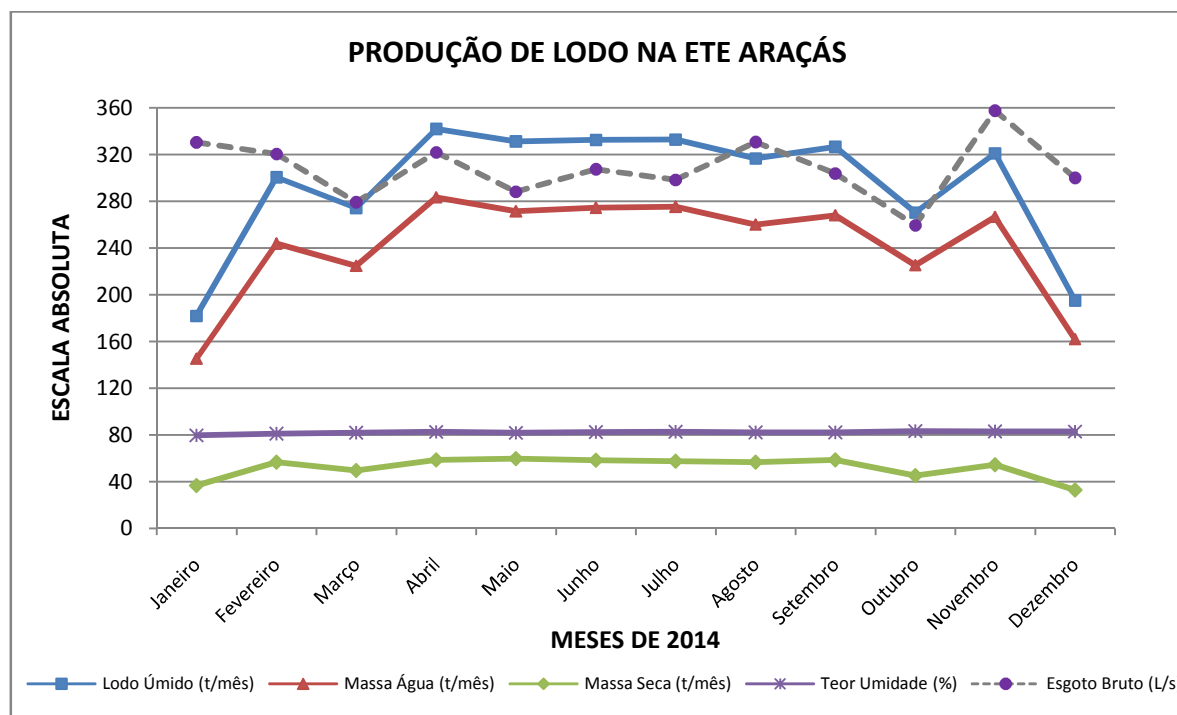


Figura 54 – Caracterização das frações do lodo produzido na ETE Araçás em 2014.

Fonte: Produção do próprio autor.

Avaliando o comportamento da produção de lodo ao longo do ano de 2014, pode ser observado que a umidade do lodo se manteve estável, sendo as variações na quantidade de água produzida por mês acompanhadas, proporcionalmente, com o aumento ou redução da produção de lodo úmido. Da mesma forma todas as parcelas seguem as variações das vazões médias de esgoto bruto na ETE Araçás.

Baseado nos dados acima, foram projetadas as vazões médias e indicadores da produção de lodo na ETE Araçás, possibilitando a avaliação da geração ocorrida em 2014 em comparação ao projeto, conforme é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Produção de lodo na ETE Araçás ao longo do ano de 2014 e na condição de projeto.

CONDIÇÃO	LODO DESAGUADO ^I				CARGAS AFLUENTES ^{II}		INDICADORES	
	ST (%)	VAZÃO MÁSSICA			Vazão (m ³ /d)	COC (kg DBO/d)	kg MS/m ³	kg MS/kg DBO
		Total kg/s	Massa Seca kg/s	Água kg/s				
2014	17,73	0,11177	0,01982	0,09195	26.620	6.737	0,064	0,254
PROJETO	25,00	0,33454	0,08363	0,25090	34.488	10.208	0,210	0,708
VARIAÇÃO	-29%	-67%	-76%	-63%	-23%	-34%	-69%	-64%

Fonte: Produção do próprio autor.

Notas:

I: Lodo desaguado durante o ano de 2014 e em projeto, considerando 365 dias no referido ano.

II: Baseado na vazão média de esgoto bruto e a sua DBO_{5,20} no ano de 2014.

A possibilidade de elevada digestão do lodo, em virtude da reduzida vazão afluyente em comparação à projetada, não apresenta base para justificar tal desvio, pois as frações de voláteis no digestor aeróbio, conforme apresentado na Tabela 8, são de 72,50%, superiores em 41,56% a fração de projeto para o lodo digerido.

Diante dos dados expostos, fica evidenciado que a ETE Araçás destinou uma quantidade de lodo, em base seca, inferior à prevista para o período, pois os indicadores de produção de massa seca de lodo, por volume de esgoto bruto ou DBO tratada, deveriam ser próximos ao projeto. Demonstrando, ainda, que a estação não vem apresentando boa eficiência para realizar a retenção do lodo no sistema secundário.

Ainda avaliando a produção de lodo prevista em projeto, não foi possível identificar o desvio ocorrido no ano de 2014, pois os valores previstos para a produção de lodo em massa seca por habitante são compatíveis com a literatura, conforme retrata a Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação da produção de lodo *per capita* da ETE Araçás e da literatura técnica.

CONDIÇÃO	ETE ARAÇÁS						LITERATURA	
	Vazão Diária (m ³ /d)	Lodo em Massa Seca (kg/d)		Poluição Atendida (hab)	Produção de Lodo (g MS/hab dia)		Produção de Lodo (g MS/hab dia)	
		Bruto	Digerido		Bruto	Digerido		
PROJETO	34.488	8.812	7.226	191.653	45,98	37,70	38-43 ^I	40-45 ^{II}

Fonte: Produção do próprio autor.

Notas:

I: Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2001.

II: Tsutiya *et al*, 2001.

Como o objetivo do presente trabalho não foi avaliar as causas da variação de produção de lodo na ETE Araçás, mas sim, caracterizar a produção para obter os dados necessários para alimentar o MTSL. Os cenários de testes utilizaram as produções de lodo ao longo do ano de 2014 e a produção prevista em projeto, garantindo, assim, a completa avaliação da capacidade de secagem do lodo da estação com o aproveitamento do calor presente no ar de saída dos sopradores.

5.1.2.1 Caracterização Final do Lodo Úmido da ETE Araçás

Sendo o lodo úmido armazenado posteriormente ao processo de centrifugação, numa caçamba metálica que fica exposta ao ar atmosfera que é o mesmo ar de referência, será considerado que a temperatura do lodo úmido é igual a temperatura do ar de referência, ou seja, que o mesmo apresente a entalpia zero na temperatura de 24,9°C.

Com base na metodologia exposta, foi estimada a demanda de energia necessária para realizar a secagem com higienização do lodo da ETE Araçás nas condições mais exigentes que foram propostas para este estudo, que são, respectivamente, 80°C com 90% de ST no lodo de saída do reator. Essa demanda de energia é a máxima necessária, pois os demais testes de cenários ocorreram em temperaturas e teores de ST inferiores, sendo a estimativa baseada na variação de entalpia do lodo e nas vazões mássicas do lodo produzido ao longo do ano de 2014 e nas condições de projeto (Tabela 11).

Tabela 11 – Balanço de Massa e Energia para a secagem com higienização do lodo na ETE Araçás

CONDIÇÃO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES TÉRMICAS				
	VAZÃO MÁSSICA		TEOR DE ST		Temperatura		Entalpia Inicial ^I (kJ/kg)	Entalpia Final ^{II} (kJ/kg)	Demanda de Energia Máxima ^{III} (kJ/s)
	Massa Seca (kg/s)	Água Líquida (kg/s)	Inicial (%)	Final (%)	Inicial (°C)	Final (°C)			
2014	0,01982	0,09195	17,73	90,00	24,2	80	0,00	317,87	230,29
PROJETO	0,08363	0,25090	25,00						623,29
VARIAÇÃO	-76%	-63%	-29%	-	-	-	-	-	-63%

Fonte: Produção do próprio autor.

Notas:

I: Baseada na temperatura inicial do lodo - Referência.

II: Baseada na variação de temperatura do lodo composto por massa seca e água. Equação 48, 82.

III: Baseada na demanda de energia para secar e higienizar o lodo da ETE Araçás nas condições mais exigentes em relação a temperatura e evaporação. Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia

O valor de 230,29 kJ.s⁻¹ e 623,29 kJ.s⁻¹ retratam a quantidade de calor que deve ser transferida ao lodo para que o mesmo alcance a temperatura de 80°C e evapore a água até atingir 90% de teor de ST com base nas vazões descritas.

Os dados de vazão mássica e temperatura do lodo no estado inicial serão os principais dados de alimentação do MTSL em relação a esse fluxo.

5.2 RESULTADOS DOS TESTES DE CENÁRIOS

5.2.1 Cenário 1

O cenário 1 foi modelado para secar e higienizar o lodo da ETE Araçás até atingir os valores de, respectivamente, 90% de ST e 80°C na saída do reator de secagem, tomando como base as condições de produção de lodo ($0,1117 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ e 17,73% de ST) e uso dos sopradores (3 unidades em operação) ao longo do ano de 2014 na estação estudada.

A Figura 55 apresenta o comportamento das principais propriedades do ar de secagem na saída do reator para variações de vazão de 5,09 a 8,59 kg/s.

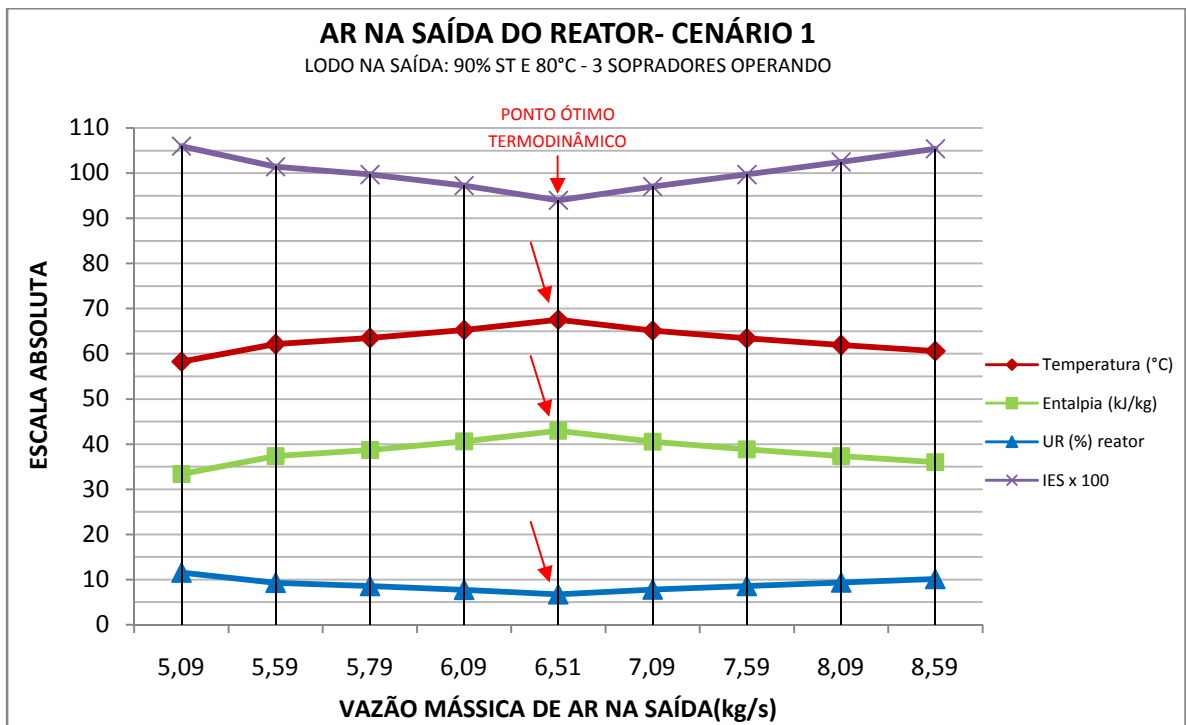


Figura 55 – Variação do ar na saída do reator em função da sua variação de vazão – valores fixados para o lodo na saída em 90% de ST e 80°C, além de 3 sopradores em operação no cenário 1.

Fonte: Produção do próprio autor.

O teste revelou que a energia térmica aproveitada dos sopradores é suficiente para secar e higienizar o lodo produzido na ETE Araçás para este cenário. Sendo que a avaliação do comportamento do ar na saída do reator revelou que a vazão de $6,51 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ representa o ponto de operação ótimo no aspecto termodinâmico, pois o IES corresponde ao menor valor dentro da faixa avaliada, demonstrando que o sistema opera com excedente de energia térmica.

A Figura 56 apresenta, para a faixa de vazão modelada neste cenário, o comportamento térmico e energético do reator de lodo por meio do IES e ITS.

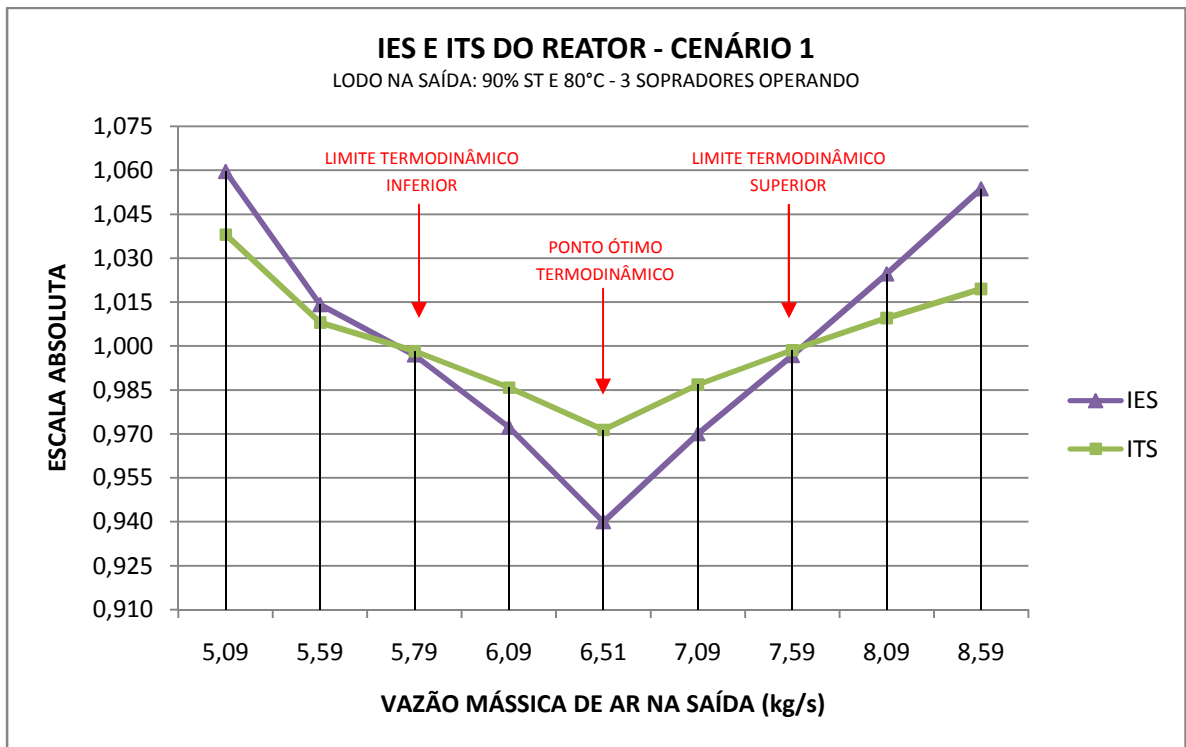


Figura 56 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação de vazão de ar – valores fixados para o lodo na saída do reator em 90% de ST e 80°C, além de 3 sopradores operando no cenário 1.

Fonte: Produção do próprio autor.

As vazões de 5,79 e 7,59 representam, respectivamente, a região do limite inferior e superior termodinâmico, pois apresentam os valores do IES e ITS tendendo à unidade, mostrando que o processo ocorre no limite da viabilidade termodinâmica para a secagem nas condições definidas para o lodo. Portanto, os valores apresentados na Figura 56, que correlacionam, para a mesma vazão de ar, índices superiores a unidade, devem ser desconsiderados por não apresentar consistência termodinâmica.

A secagem e higienização do lodo podem ser limitadas, considerando apenas as propriedades termodinâmicas, pela entalpia e taxa de energia. As duas, por sua vez, estão correlacionadas à temperatura e a vazão do fluxo de ar.

Com o aumento da vazão, a entalpia e a taxa de energia são elevadas em conjunto, entretanto, quando o sistema alcança o ponto ótimo termodinâmico, a taxa de energia continua aumentando, mas a entalpia reduz. Por esse motivo a temperatura do ar no MTSL apresenta um valor máximo que é correlacionado ao IES e ITS.

Em função da vazão, a Figura 57 mostra o comportamento da entalpia e da taxa de energia no fluxo de ar na saída do reator para este cenário, enquanto a Figura 58 ilustra como a temperatura do ar é alterada pela variação da vazão utilizada.

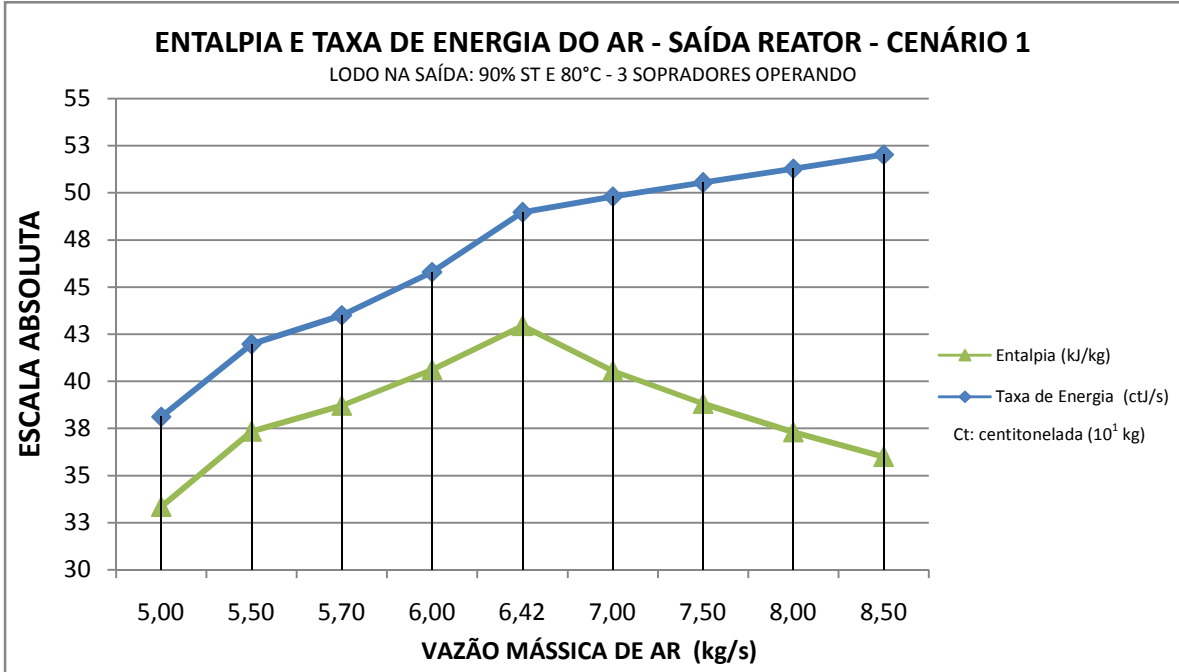


Figura 57 – Variação da entalpia e taxa de energia do ar na saída do reator em função da vazão – valores fixados do lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 3 sopradores no cenário 1.

Fonte: Produção do próprio autor

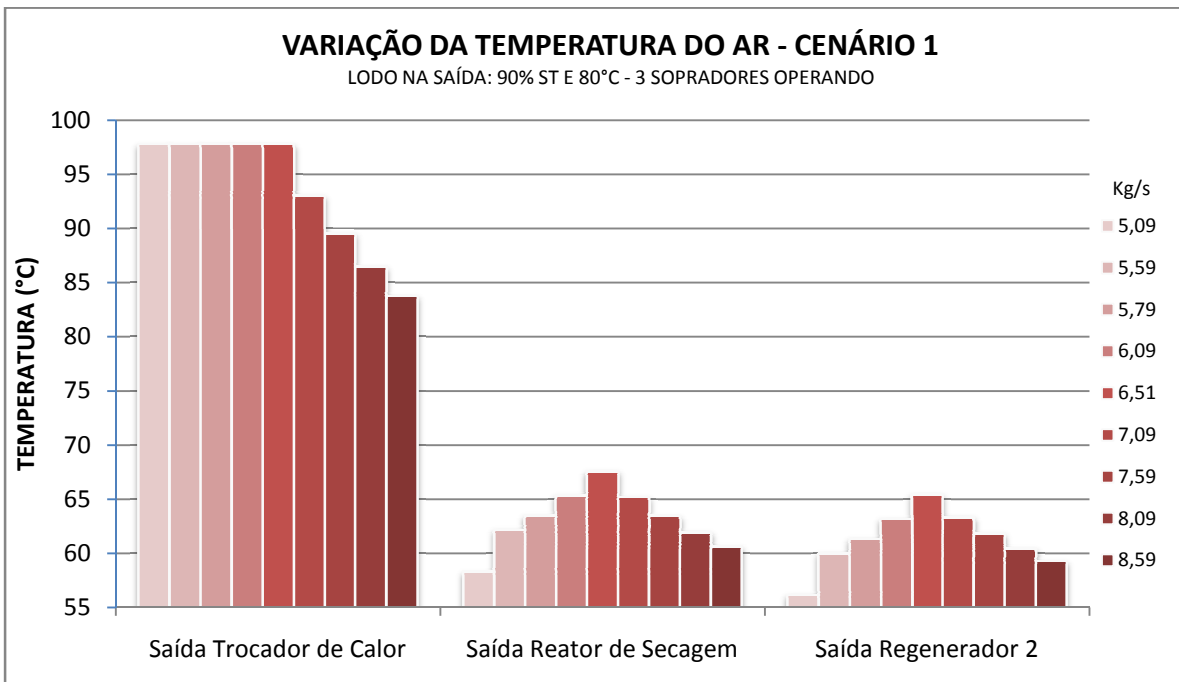


Figura 58 – Variação da temperatura do ar em função da sua própria vazão – valores fixados do lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 3 sopradores operando no cenário 1.

Fonte: Produção do próprio autor

Baseado no ponto ótimo termodinâmico, as Figuras 59 e 60 apresentam, respectivamente, o comportamento do ar de secagem e do lodo da ETE Araçás nos 7 estados modelados em função das suas principais propriedades.

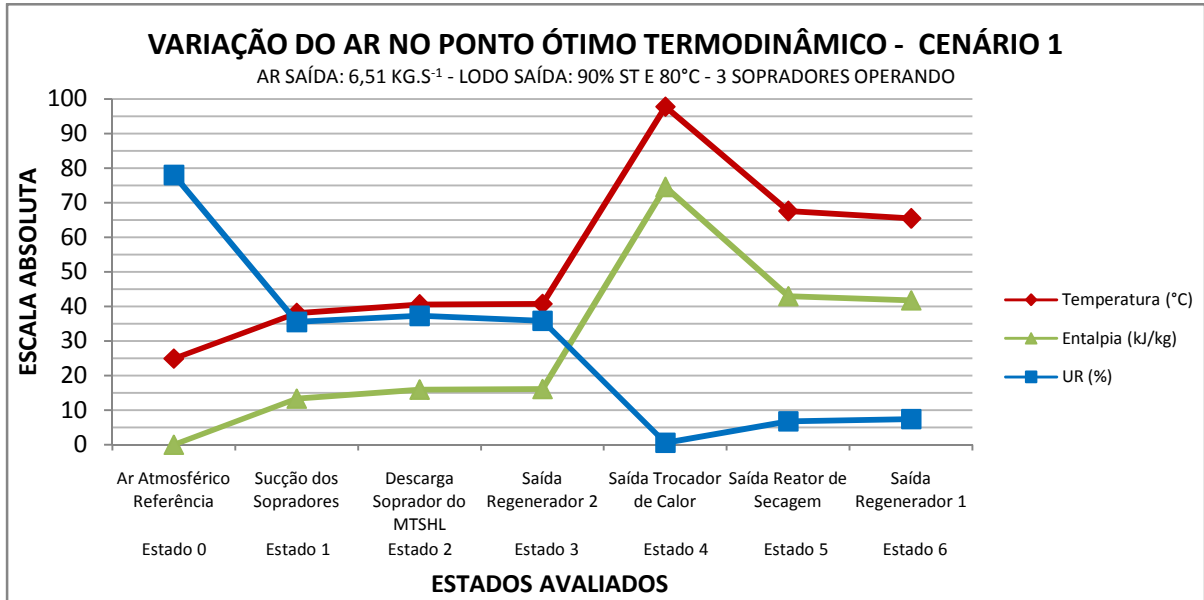


Figura 59 – Variação das propriedades do ar no ponto ótimo termodinâmico ao longo do MTSL no cenário 1 – fixado na saída do reator o ar em 6,51 kg.s⁻¹ e o lodo em 90% de ST e 80°C.

Fonte: Produção do próprio autor.

A UR apresentou variações significativas de 35,85% na entrada do trocador de calor, além de 0,59% na entrada e 6,74% na saída do reator de secagem de lodo. Comportamentos semelhantes da UR do ar entre a entrada e a saída do sistema de secagem foram encontrados por Ferreira, Gonçalves e Mais (2014), sendo a variação da temperatura como o principal responsável pela redução da UR, mesmo com o aumento da umidade absoluta.

O regenerador de calor 2, responsável pela transferência de energia térmica entre o lodo no estado 5 e o ar no estado 2, proporcionou um aumento de apenas 0,22°C e 0,223 kJ.kg⁻¹ para o ar de secagem, sendo a causa da baixa performance o fato da taxa de energia presente no lodo equivaler a apenas 2,40% do valor encontrado no ar na entrada do referido equipamento.

Ainda no regenerador 2, observa-se um pequeno aumento na UR entre a sucção dos sopradores e a saída do regenerador. Tal ocorrência será observada nos demais testes de cenário, pois a variação de pressão, decorrente da perda de carga considerada, ocasiona a redução na capacidade do ar seco em absorver o vapor

d'água e, por conseqüência, eleva a umidade relativa. Não obstante, a umidade absoluta continua sendo constante, pois o único ponto em que ocorre transferência de massa é no reator de secagem de lodo. A mesma consideração pode ser tecida para o regenerador 1.

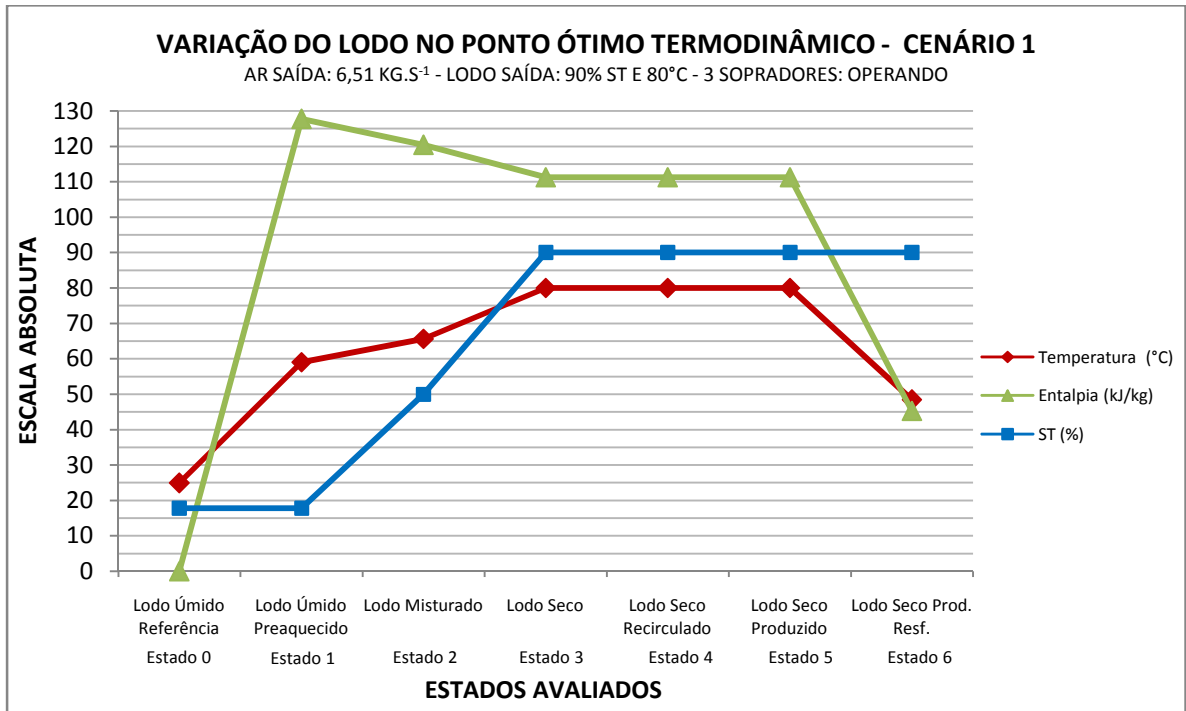


Figura 60 - Variação das propriedades do lodo no ponto ótimo termodinâmico ao longo do MTSL no cenário 1 – fixado na saída do reator o ar em 6,51 kg.s⁻¹ e o lodo em 90% de ST e 80°C.

Fonte: Produção do próprio autor.

O regenerador 1, em comparação ao regenerador 2, apresentou uma performance superior, gerando a variação de entalpia específica e temperatura do lodo de 127,69 kJ.kg⁻¹ e 34,11°C, representando um significativo aumento das propriedades intensivas da mistura de lodo.

A redução da entalpia específica do lodo entre os estados 1-2 e 2-3 são decorrentes da transferência de massa na mistura, sendo a variação dos estados 1-2 ocasionada pela entrada de significativa parcela de massa seca, que apresenta baixa entalpia específica em comparação a água, e entre os estados 2-3 pela evaporação da água líquida que estava presente no lodo.

As Tabelas 12 e 13 detalham o balanço de massa e energia, respectivamente, do ar e do lodo da ETE Araçás em cada etapa do MTSL nas condições de operação do ano de 2014 e para a vazão de ar que representa o ponto ótimo termodinâmico.

Tabela 12 – Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 1 – condição de operação do ano de 2014 na ETE Araçás.

COMPORTEAMENTO DO AR	PONTO	CAPACIDADE VAPOR D'ÁGUA			PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS				
		ω^I (kg v/kg ar)	Variação (%)	ϕ^{II} (%)	T_{Ar}^{III} (°C)	p^{IV} (Bar)	h_{Ar}^V (kJ/kg)	H_{Ar}^{VI} (kJ/s)	m_{Ar}^{VII} (kg/s)
	0 Ar Atmosférico – Referência	0,020	-	78,00	24,90	1,013	0,000	-	
	1 Sucção dos Sopradores	0,044	118,19	35,50	38,00	1,013	13,332	-	
	2 Descarga Soprador MTSL	0,041	107,80	37,27	40,51	1,213	15,888	101,937	6,42
	3 Saída Regenerador 2	0,043	116,02	35,85	40,73	1,183	16,111	103,370	
	4 Saída Trocador de Calor	2,641	13.129,74	0,59	97,75	1,154	74,483	477,895	
	5 Saída Reator de Secagem	0,229	1.049,21	6,74	67,53	1,039	42,938	489,717	
	6 Saída Regenerador 1	0,209	946,92	7,40	65,40	1,013	41,788	482,232	6,51

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 8; II: Equação 9; III: Equação 13, 59, 67, 74, 51 e dados levantados; IV: Equação 56 e dados levantados; V: Equação 51, 60, 68, 75 e 86; VI: Equação 61, 69, 76, 83; VII: Equação 40 e variável pelo sistema.

Tabela 13 – Comportamento do lodo nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 1 – condição de operação do ano de 2014 na ETE Araçás.

COMPORTEAMENTO DO LODO	PONTO	PROPRIEDADES FÍSICAS			PROPRIEDADES ENERGÉTICAS			
		m_L^I (kg/s)	$m_{L_{seco}}^{II}$ (kg/s)	$m_{L_{\text{água}}}^{III}$ (kg/s)	X_L^{IV} (%)	T_L^V (°C)	h_L^{VI} (kJ/kg)	H_L^{VII} (kJ/s)
	0 Lodo Úmido – Referência	0,1118	0,0198	0,0920	17,73	24,90	0,000	0,000
	1 Lodo Úmido Preaquecido	0,1118	0,0198	0,0920	17,73	59,01	127,690	14,272
	2 Lodo Misturado	0,2019	0,1010	0,1010	50,00	65,60	120,363	24,306
	3 Lodo Seco	0,1122	0,1010	0,0112				12,484
	4 Lodo Seco Recirculado	0,0902	0,0811	0,0090	90,00	80,00	111,281	10,033
	5 Lodo Seco Produzido	0,0220	0,0198	0,0022				2,451
	6 Lodo Seco Prod. Resfriado	0,0220	0,0198	0,0022		48,41	45,271	0,997

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 35, 65, 77 e 78; II: Equação 36 e 79; III: Equação 37 e 80; IV: Dados levantados e definidos na metodologia; V: Equação 46, 82 e dados levantados e definidos na metodologia; VI: Equação 48, 82 e dados definidos na metodologia; VII: Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia.

5.2.2 Cenário 2

No teste do cenário 2 foi definido que a secagem do lodo da ETE Araçás seria igual ao cenário 1 – 90% de ST e 80°C – mas para a produção de lodo ($0,3345 \text{ ks.s}^{-1}$ e 25% de ST) e uso dos sopradores (4 unidades em operação) que eram previstos nas condições de projeto da estação.

Foram empregadas vazões de ar de $8,05$ até $50,00 \text{ kg.s}^{-1}$ para secar o material, o que resultou na ausência de viabilidade termodinâmica para o processo (Figura 61).

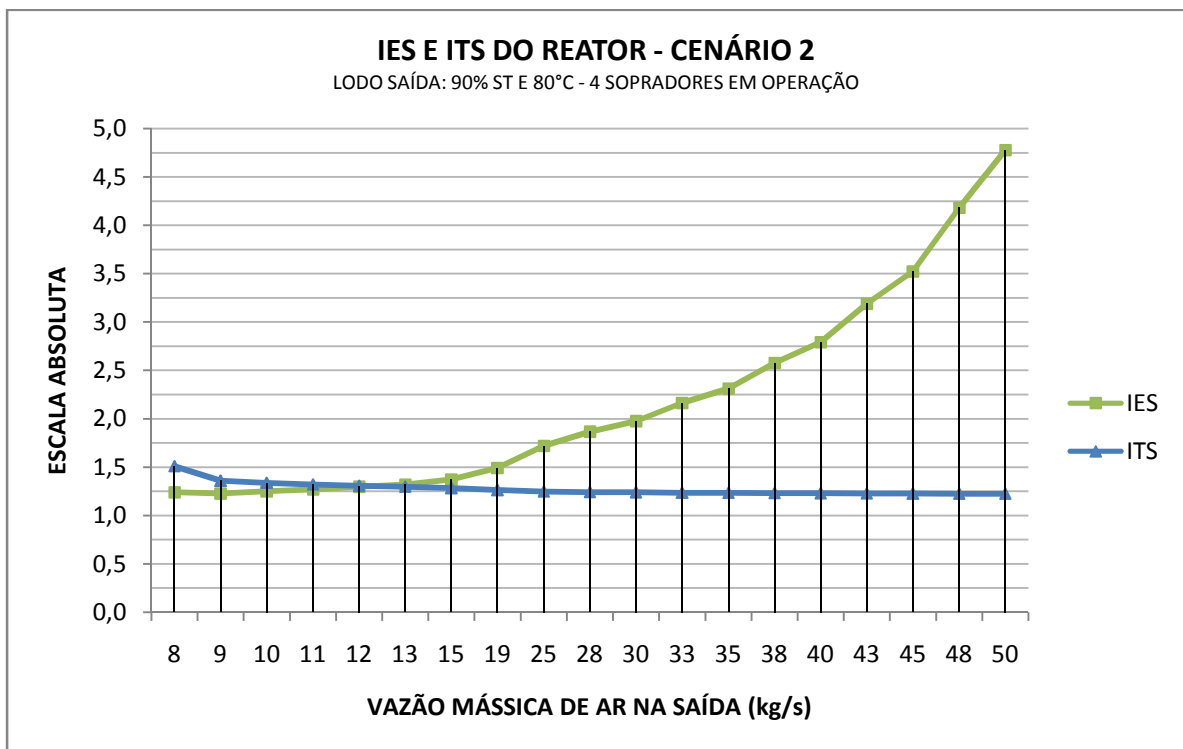


Figura 61 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da vazão de ar – valores fixados do lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 4 sopradores em operação no cenário 2.

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 62 mostra os resultados inconsistentes da modelagem do ar sobre o cenário 2 e como a temperatura do ar de saída aumenta até a vazão de 28 kg.s^{-1} e, posteriormente, estabiliza-se em valores na ordem de 38°C , mas ainda inferiores a temperatura do lodo de entrada no reator (estado 2), comprovando a inconsistência dos resultados para as condições modeladas.

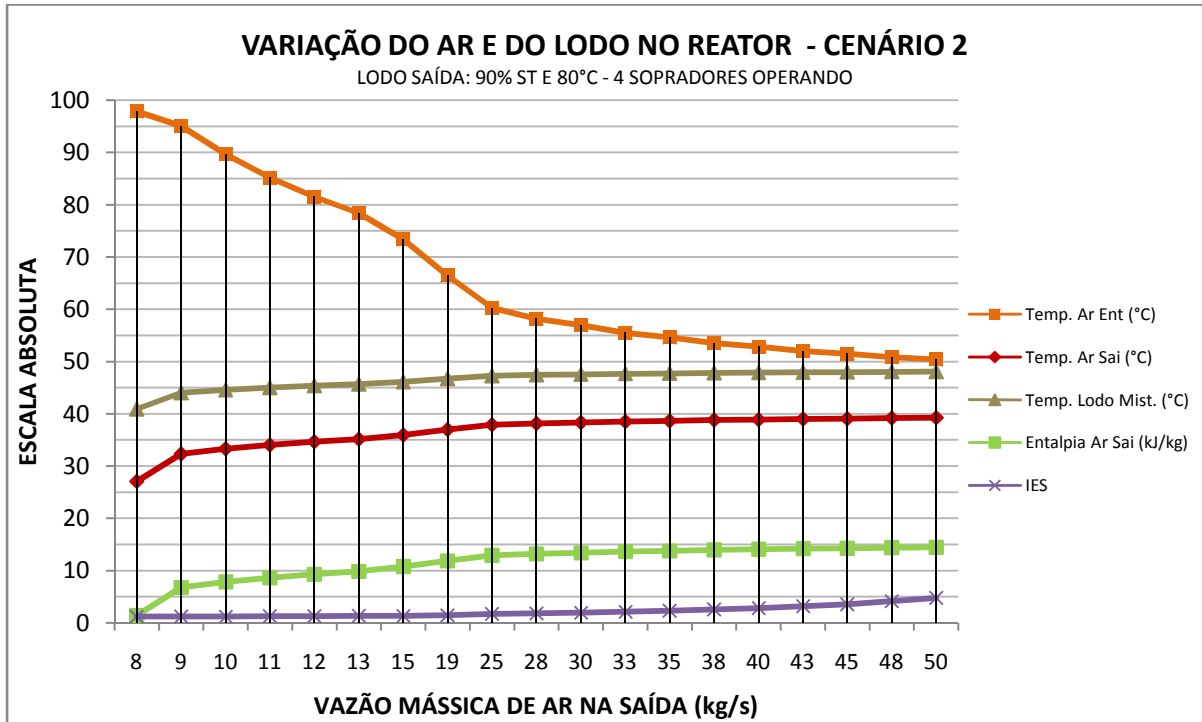


Figura 62 – Variações inconsistentes do ar e do lodo no reator em função da variação da vazão de ar – fixado o lodo na saída do reator em 90% ST e 80°C, além de 4 sopradores operando no cenário 2.

Fonte: Produção do próprio autor.

5.2.3 Cenário 3

O teste do cenário 3, igual ao cenário 4 e 5, foi empregado em virtude da capacidade insuficiente em secar e higienizar todo o lodo produzido da ETE Araçás pelo calor proveniente do ar dos próprios sopradores para a condição de projeto. Desta forma, foi modelado a secagem nas mesmas condições do cenário 2, mas com vazões de lodo inferiores a prevista em projeto para a ETE Araçás.

Diante do exposto, foi possível secar e higienizar, aproximadamente, 59% de todo o lodo produzido na ETE Araçás para as condições de projeto, conforme mostra a Figura 63 com o comportamento das principais propriedades do ar na saída do reator em função da parcela de lodo que foi submetido ao MTSL.

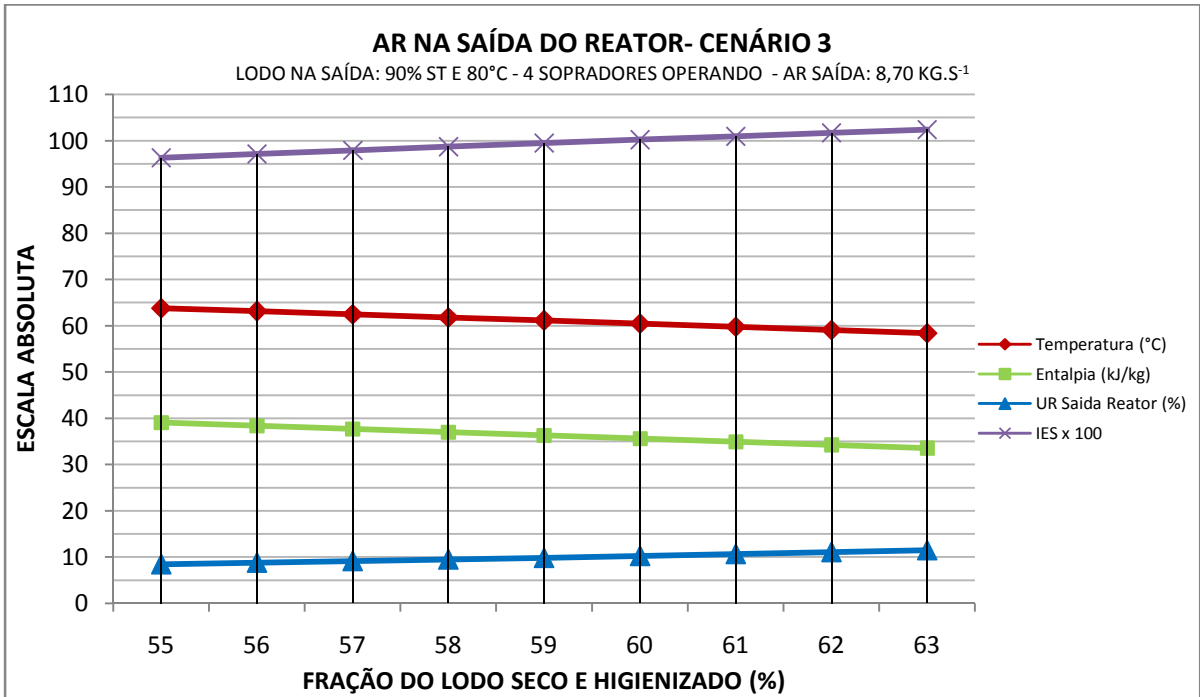


Figura 63 – Variação do ar na saída do reator em função da variação da fração de lodo – fixada no cenário 3, na saída do reator, o lodo com 90% ST e 80°C, vazão de ar de 8,70 kg.s⁻¹ e 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 64 detalha o IES e ITS em torno do ponto que o processo se torna viável para valores inferiores e próximos aos 59% da produção de lodo prevista em projeto.

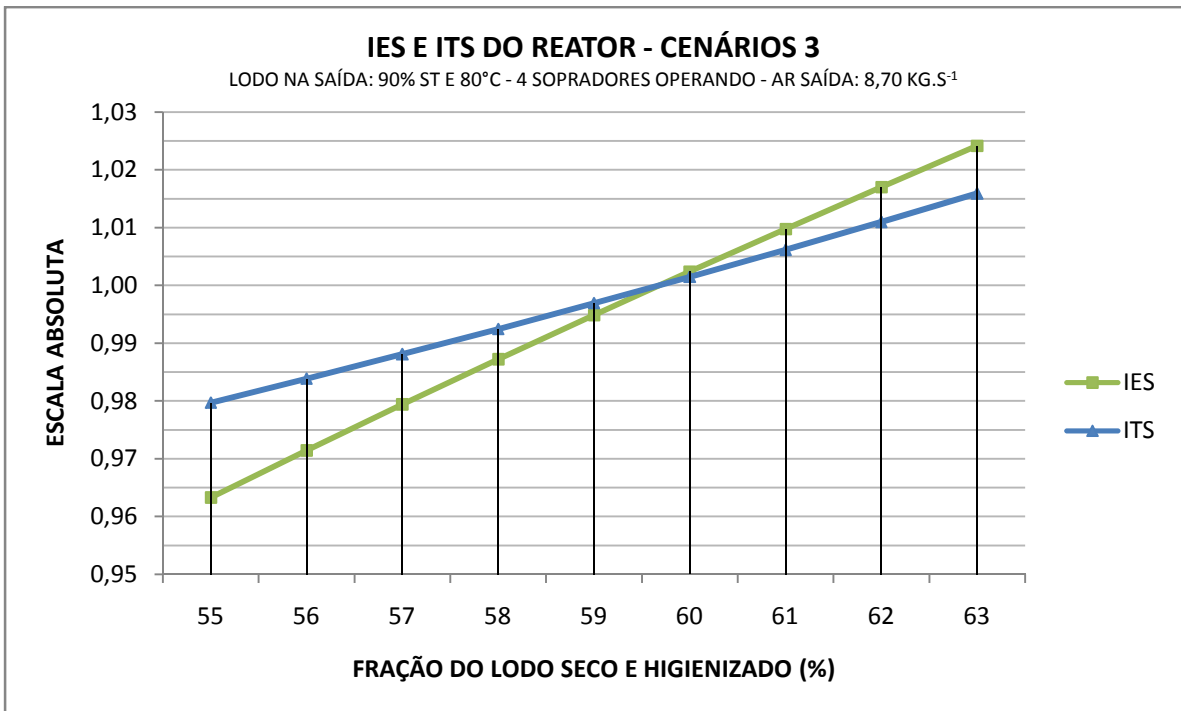


Figura 64 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da fração de lodo – fixada no cenário 3 na saída do reator o lodo com 90% ST e 80°C, vazão de ar de 8,70 kg.s⁻¹ e 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

O teste deste cenário foi realizado para a vazão de ar de $8,55 \text{ kg.s}^{-1}$ na entrada, gerando vazões de saída de $8,69$ até $8,71 \text{ kg.s}^{-1}$ em virtude da adição de água evaporada para cada quantidade de lodo testado. Para a produção de 59% de lodo, foram testadas outras vazões de ar, mas sem melhoras de desempenho, conforme é visualizado nas Figuras 65 e 66 pelas propriedades do ar e do reator.

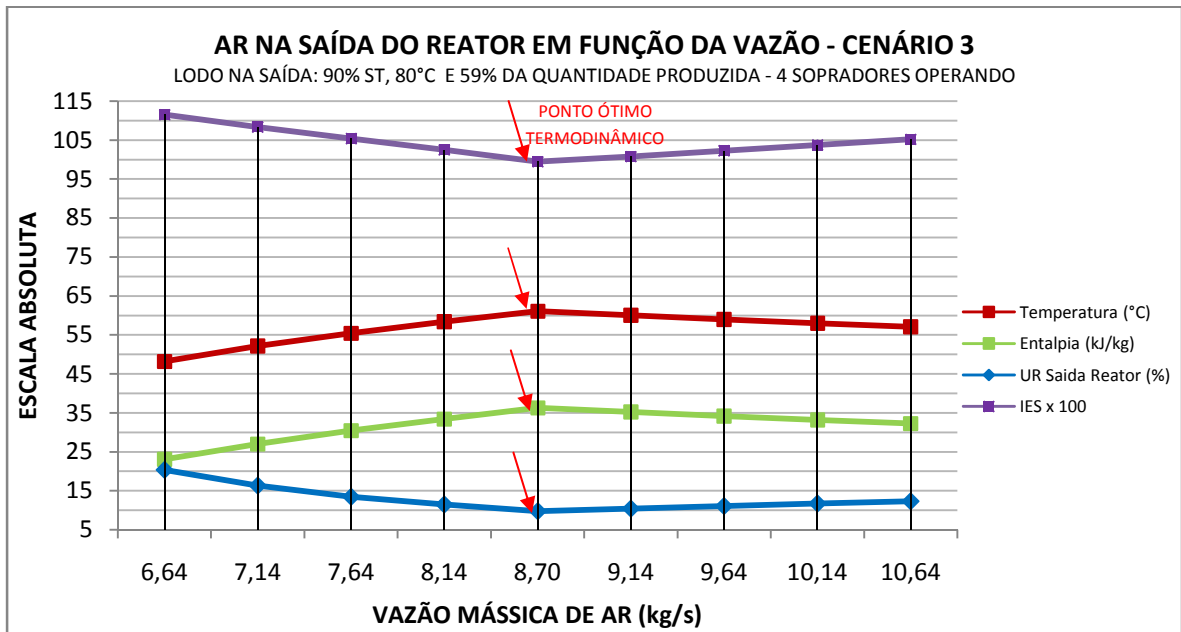


Figura 65 – Variação do ar na saída do reator em função da variação da vazão – fixada no cenário 3, na saída do reator, o lodo com 90% ST, 80°C e 59% da produção de projeto, além de 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

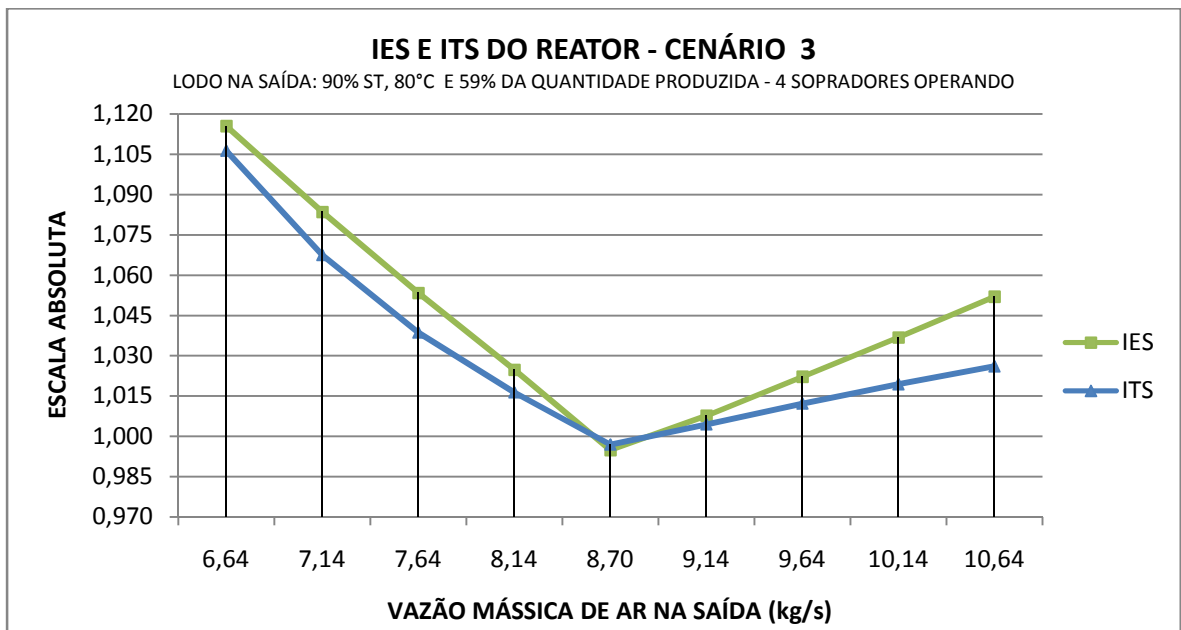


Figura 66 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da vazão – fixada no cenário 3, na saída do reator, o lodo com 90% ST, 80°C e 59% da produção de projeto, além de 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

Novamente, considerando a vazão de $8,70 \text{ kg.s}^{-1}$ de ar e 59% da produção de lodo prevista para a ETE Araçás, o comportamento do ar e do lodo ao longo dos 7 estados do MTSL são apresentadas nas Figuras 67 e 68.

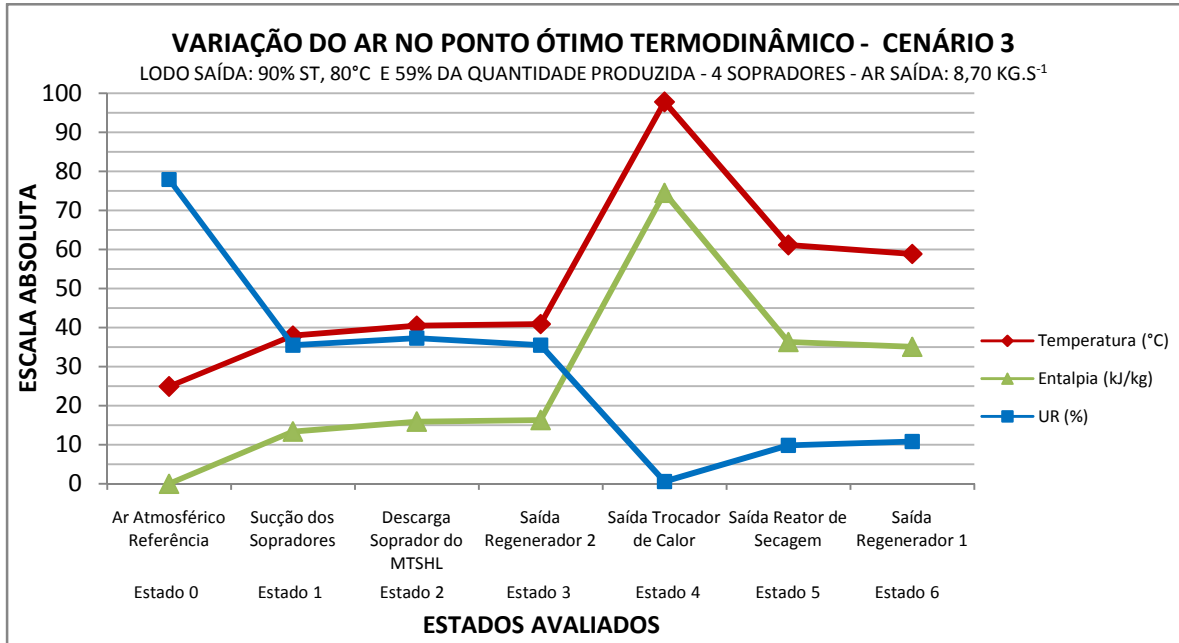


Figura 67 – Variação do ar no ponto ótimo termodinâmico ao processar 59% do lodo produzido em projeto e com vazão de ar na saída fixa em $8,70 \text{ kg.s}^{-1}$, além de 4 sopradores no cenário 3.

Fonte: Produção do próprio autor.

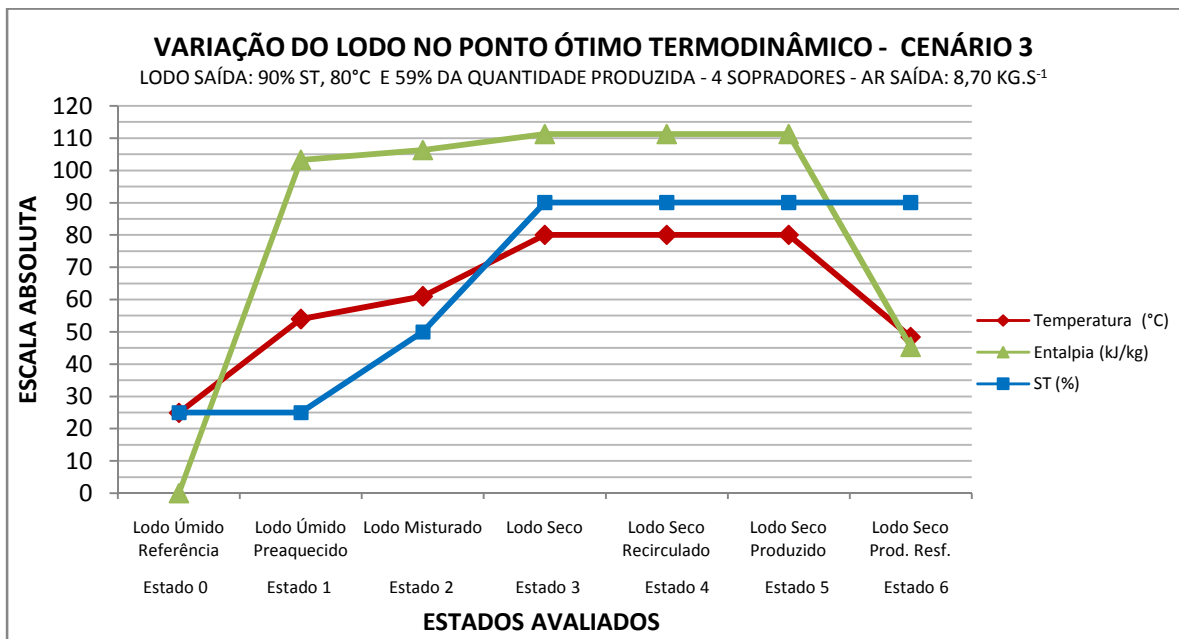


Figura 68 – Variação do lodo no ponto ótimo termodinâmico ao processar 59% da produção de projeto e com vazão de ar na saída em $8,70 \text{ kg.s}^{-1}$, além de 4 sopradores no cenário 3.

Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que o ar na saída do regenerador 2 apresentou o pequeno aumento de 0,41 °C na temperatura. Apesar do baixo rendimento do regenerador em aquecer o ar entre os estados 2 e 3, a redução de temperatura do lodo entre os estados 5 e 6 é elevada e de 31,59°C para este cenário de teste.

No regenerador 1, um grande ganho energético é proporcionado ao lodo úmido, possibilitando o alcance da temperatura de 53,88°C que corresponde a uma variação de 28,98°C entre o estado 0 e 1. No entanto, no ar na saída do regenerador a temperatura ainda é de 58,86°C, considerada elevada em comparação aos valores de referência.

A umidade relativa do ar na entrada do secador apresentou ganhos superiores aos 13.000% sobre a capacidade de absorver vapor d'água em relação ao ar de referência, reduzindo na saída do reator para valores de 689% em virtude da variação de temperatura de 97,78 °C para 61,15°C. Ganhos proporcionais foram observados por Louarn *et al.* (2014) que, ao secar lodo biológico, realizaram o aquecimento de um fluxo de ar de 20°C para 50°C e reduziram a UR de 57% para 11%.

As Tabelas 14 e 15 detalham o balanço de massa e energia, respectivamente, do ar de secagem e do lodo da ETE Araçás em cada etapa do MTSL. Esses resultados referem-se ao processamento de 59% do lodo produzido nas condições de projeto e para a vazão de ar que representa o ponto termodinâmico ótimo.

Tabela 14 - Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 3 para secar e higienizar 59% do lodo da ETE Araçás.

COMPORTAMENTO DO AR	PONTO	CAPACIDADE VAPOR D'ÁGUA			PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS				
		ω^I (kg v/kg ar)	Variação (%)	ϕ^{II} (%)	T_{Ar}^{III} (°C)	p^{IV} (Bar)	h_{Ar}^V (kJ/kg)	H_{Ar}^{VI} (kJ/s)	m_{Ar}^{VII} (kg/s)
	0 Ar Atmosférico – Referência	0,020	-	78,00	24,90	1,0130	0,000	-	
	1 Sucção dos Sopradores	0,044	118,19	35,50	38,00	1,0130	13,332	-	
	2 Descarga Soprador do MTSL	0,041	107,80	37,27	40,51	1,2129	15,888	135,916	8,55
	3 Saída Regenerador 2	0,044	118,36	35,47	40,92	1,1833	16,305	139,484	
	4 Saída Trocador de Calor	2,660	13.225,80	0,58	97,78	1,1544	74,522	637,528	
	5 Saída Reator de Secagem	0,158	689,10	9,82	61,13	1,0390	36,337	651,792	8,70
	6 Saída Regenerador 1	0,143	614,79	10,84	58,86	1,0130	35,093	640,974	

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 8; II: Equação 9; III: Equação 13, 59, 67, 74, 51 e dados levantados; IV: Equação 56 e dados levantados; V: Equação 51, 60, 68, 75 e 86; VI: Equação 61, 69, 76, 83; VII: Equação 40 e variável pelo sistema.

Tabela 15 – Comportamento dos 59% do lodo da ETE Araçás nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 3.

COMPORTAMENTO DO LODO	PONTO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES ENERGÉTICAS		
		m_L (kg/s)	$m_{L_{seco}}$ (kg/s)	$m_{L_{\text{água}}}$ (kg/s)	X_L (%)	T_L (°C)	h_L (kJ/kg)	H_L (kJ/s)
	0 Lodo Úmido Referência					24,90	0,000	0,000
	1 Lodo Úmido Preaquecido	0,1974	0,0493	0,1480	25,00	53,88	103,178	20,365
	2 Lodo Misturado	0,3207	0,1604	0,1604	50,00	60,94	106,294	34,093
	3 Lodo Seco	0,1782		0,0178				19,829
	4 Lodo Seco Recirculado	0,1234	0,1110	0,0123	90,00	80,00	111,281	13,728
	5 Lodo Seco Produzido	0,0548	0,0493	0,0055				6,101
	6 Lodo Seco Prod. Resfriado	0,0548	0,0493	0,0055		48,41	45,271	2,482

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 35, 65, 77 e 78; II: Equação 36 e 79; III: Equação 37 e 80; IV: Dados levantados e definidos na metodologia; V: Equação 46, 82 e dados levantados e definidos na metodologia; VI: Equação 48, 82 e dados definidos na metodologia; VII: Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia.

5.2.4 Cenário 4

O cenário de teste 4 foi concebido para modelar a situação de secagem com higienização do lodo na temperatura de 60°C e com o teor de 90% de ST, além da operação de 4 sopradores na ETE Araçás.

A viabilidade na secagem do lodo foi alcançada com valores próximos aos 78% da produção de lodo prevista em projeto e vazão de ar fixa em 8,74 kg.s⁻¹ na saída do reator, conforme consta na Figura 69.

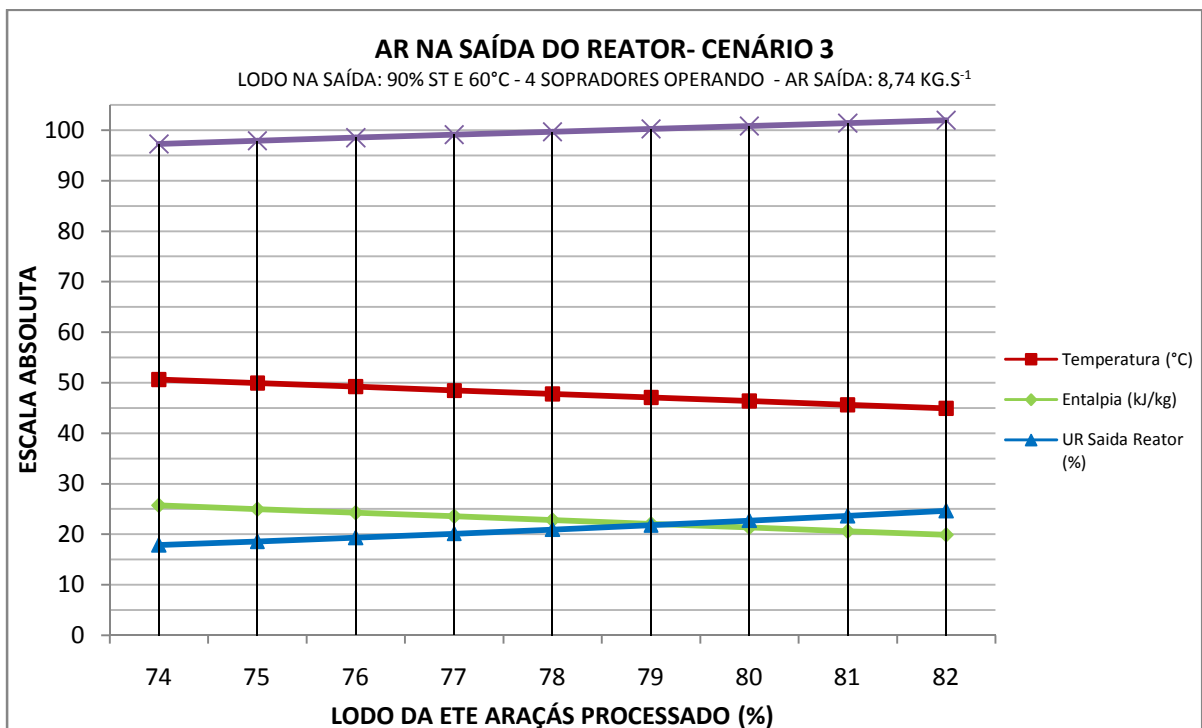


Figura 69 – Variação do ar na saída do reator em função da fração de lodo produzido nas condições de projeto para o cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.

Produção do próprio autor.

A umidade relativa no ar de saída do reator foi de 26,37% para este cenário, superior a encontrada de 6,74% no cenário 1 e 9,82% no cenário 2. Tal aumento é associado, na maior parcela, a redução na temperatura de trabalho do ar.

A Figura 70 detalha a variação, quase linear para o trecho apresentado, do IES e ITS em função da quantidade de lodo submetido ao MTSL.

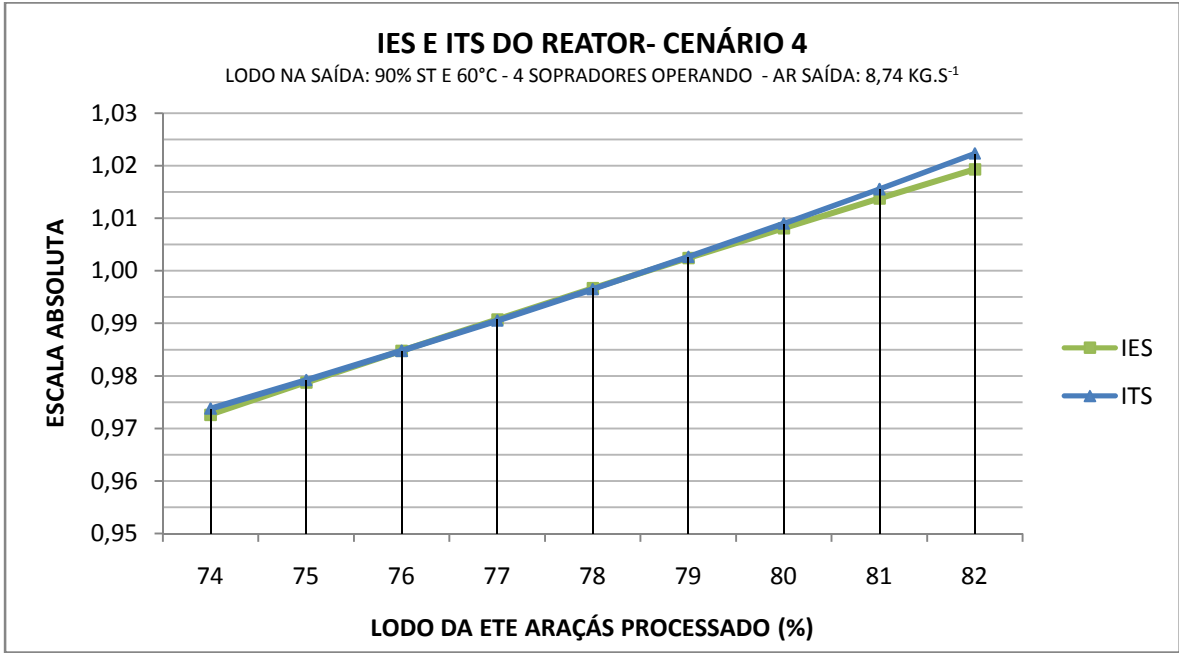


Figura 70 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação da fração de lodo produzido nas condições de projeto no cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

Com base na vazão de 8,74 kg.s⁻¹ de ar na saída e processamento de 78% da produção de lodo da ETE Araçás, o comportamento do ar e do lodo nas diversas etapas do MTSL pode ser observado, respectivamente, nas Figuras 71 e 72.

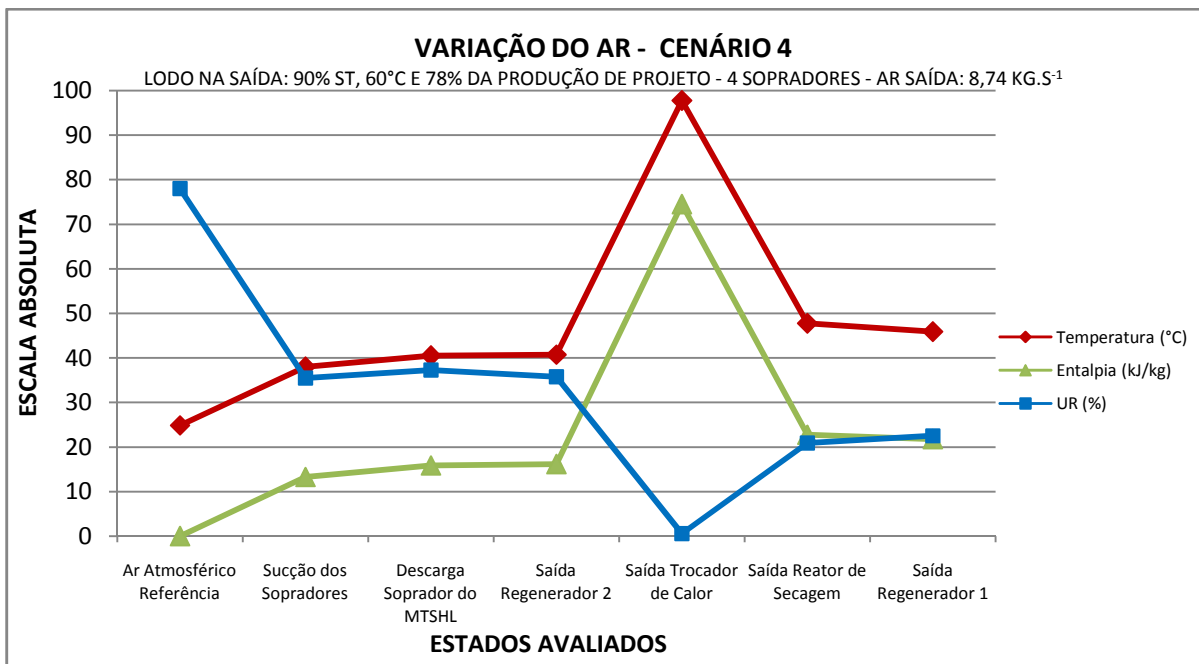


Figura 71 – Variação do ar ao processar 78% de lodo no cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

Diferente dos demais cenários, o ar na saída do sistema apresenta a temperatura de 45,89°C e entalpia específica de 21,76 kJ.kg⁻¹, valores mais próximos do ar de referência que apresenta a temperatura de 24,9°C e entalpia nula. Essa condição ocorre pela combinação de fatores, principalmente pelo ponto de operação apresentar o ITS próximo a unidade e a fixação da temperatura de 60°C para o lodo na saída do reator.

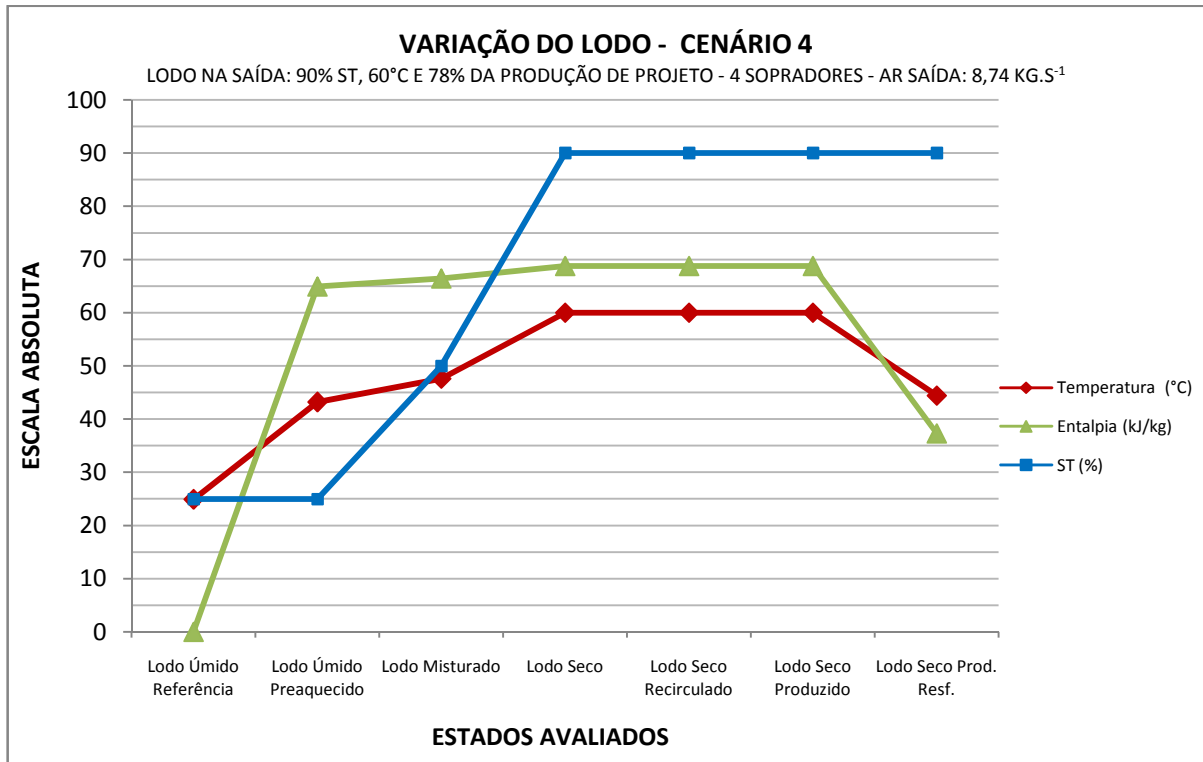


Figura 72 – Variação do lodo ao processar 78% da produção prevista em projeto no cenário 4 – fixada na saída do reator o lodo com 90% ST e 60°C, vazão de ar de 8,70 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

O lodo apresenta o comportamento semelhante aos cenários anteriores, pois a predeterminação das propriedades de temperatura e teor de sólidos na saída do reator de secagem torna, em determinado nível, previsível o comportamento do material ao longo do MTSL.

As Tabelas 16 e 17 detalham o balanço de massa e energia, respectivamente, do ar de secagem e do lodo da ETE Araçás em cada etapa do MTSL para processar 78% do lodo produzido nas condições de projeto.

Tabela 16 – Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL para o cenário 4 com secagem de 78% do lodo produzido na ETE Araçás.

COMPORTAMENTO DO AR	PONTO	CAPACIDADE DE VAPOR D'ÁGUA			PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS				
		ω^I (kg v/kg ar)	Variação (%)	ϕ^{II} (%)	T_{Ar}^{III} (°C)	p^{IV} (Bar)	h_{Ar}^V (kJ/kg)	H_{Ar}^{VI} (kJ/s)	m_{Ar}^{VII} (kg/s)
0	Ar Atmosférico – Referência	0,020	-	78,00	24,90	1,0130	0,000	-	
1	Sucção dos Sopradores	0,044	118,19	35,50	38,00	1,0130	13,332	-	
2	Descarga Soprador MTSL	0,041	107,80	37,27	40,51	1,2129	15,888	135,916	8,55
3	Saída Regenerador 2	0,043	116,52	35,77	40,77	1,1833	16,152	138,180	
4	Saída Trocador de Calor	2,645	13.150,14	0,58	97,75	1,1544	74,491	637,265	
5	Saída Reator de Secagem	0,074	270,33	20,91	47,76	1,0390	22,790	649,228	8,74
6	Saída Regenerador 1	0,068	242,68	22,60	45,89	1,0130	21,762	640,241	

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 8; II: Equação 9; III: Equação 13, 59, 67, 74, 51 e dados levantados; IV: Equação 56 e dados levantados; V: Equação 51, 60, 68, 75 e 86; VI: Equação 61, 69, 76, 83; VII: Equação 40 e variável pelo sistema.

Tabela 17 – Comportamento da secagem dos 78% do lodo produzido na ETE Araçás com vazão de ar de 8,74 kg.s⁻¹ na saída no cenário 5.

COMPORTAMENTO DO LODO	PONTO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES ENERGÉTICAS		
		m_L (kg/s)	$m_{L_{seco}}$ (kg/s)	$m_{L_{\acute{a}gua}}$ (kg/s)	X_L (%)	T_L (°C)	h_L (kJ/kg)	H_L (kJ/s)
0	Lodo Úmido – Referência	0,2609	0,0652	0,1957	25,00	24,90	0,000	0,000
1	Lodo Úmido Preaquecido					43,19	64,958	16,950
2	Lodo Misturado	0,4240	0,2120	0,2120	50,00	47,59	66,437	28,171
3	Lodo Seco	0,2356		0,0236				16,208
4	Lodo Seco Recirculado	0,1631	0,1468	0,0163	90,00	60,00	68,804	11,221
5	Lodo Seco Produzido	0,0725	0,0652	0,0072				4,987
6	Lodo Seco Prod. Resfriado	0,0725	0,0652	0,0072		44,41	37,336	2,706

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 35, 65, 77 e 78; II: Equação 36 e 79; III: Equação 37 e 80; IV: Dados levantados e definidos na metodologia; V: Equação 46, 82 e dados levantados e definidos na metodologia; VI: Equação 48, 82 e dados definidos na metodologia; VII: Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia.

5.2.4.1 Variando o Teor de ST Desejado no Lodo no Cenário 4

Para avaliar a variação do ITS e IES do reator em função da variação da parcela de água evaporado nos 78% da produção de lodo prevista em projeto, foi modelada a secagem na faixa de 55 até 95% de ST no lodo com base fixa na vazão de 8,74 kg.s⁻¹ de ar na saída (Figuras 73 e 74).

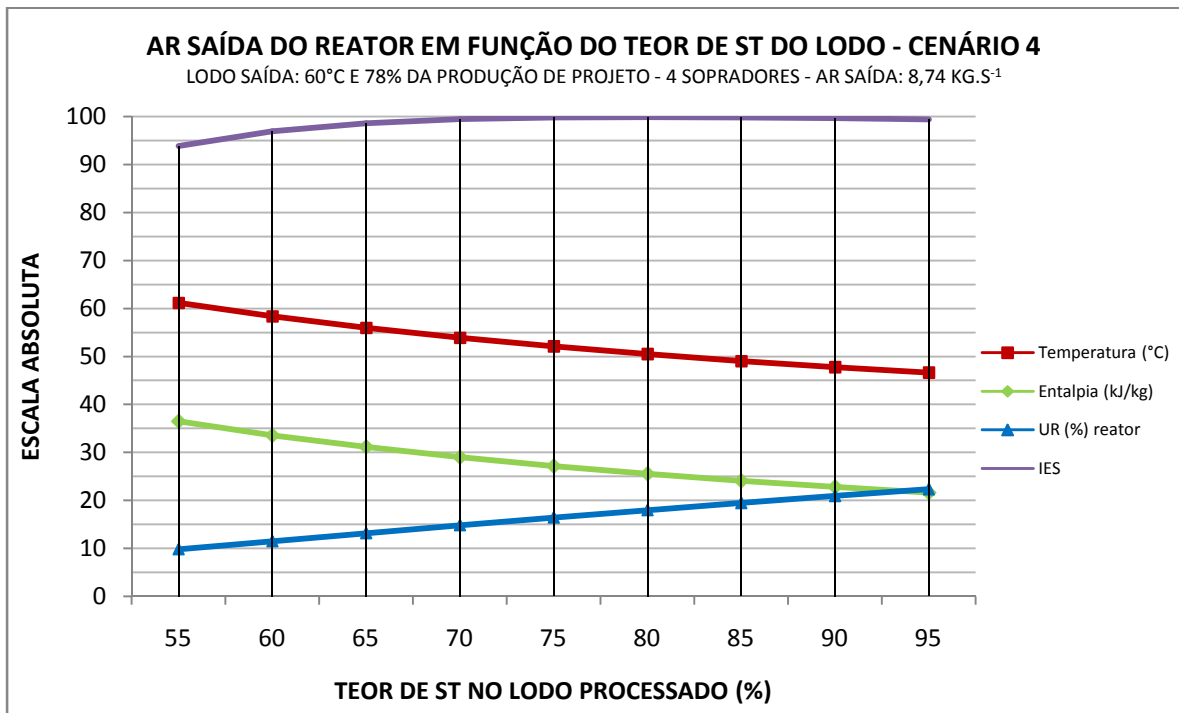


Figura 73 – Variação do ar na saída do reator em função da variação do teor de ST – fixados na saída do reator o lodo com 60°C e 78% da produção prevista em projeto, vazão de ar de 8,74 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás para o cenário 4.

Fonte: Produção do próprio autor.

A modelagem foi limitada para os valores de 55 e 95% de ST no lodo de saída do reator, tal limitação teve o intuito de garantir a ausência da condição plástica e valores próximos da umidade de equilíbrio do lodo.

Os resultados mostraram um ganho significativo na capacidade de secagem a partir do momento que os teores de ST na saída foram inferiores a 70%, além do discreto aumento na capacidade para teores acima de 90% (Figura 74).

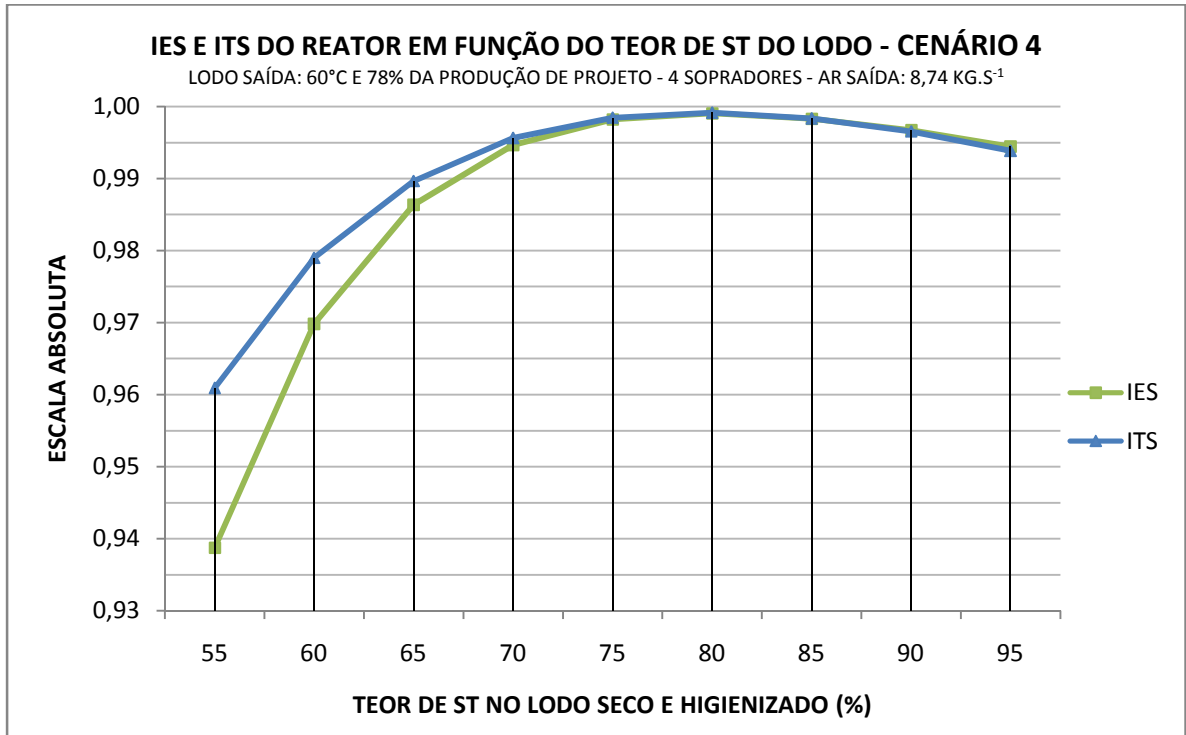


Figura 74 – Variação do IES e ITS do reator em função da variação do teor de ST – fixados na saída do reator o lodo com 60°C e 78% da produção prevista em projeto, vazão de ar de 8,74 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás para o cenário 4.

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados do IES e ITS mostram que é possível realizar a operação do reator com significativo excedente de energia em função da redução do teor de ST no lodo de saída de 90% para 55%, sendo o excedendo de energia ainda passível de aumento pelo incremento da vazão de ar.

O teor de ST de 55% pode ser considerado como o ponto ótimo termodinâmico para a operação do sistema de secagem nas condições deste cenário.

As tabelas 18 e 19 detalham o balanço de massa e energia, respectivamente, do ar de secagem e do lodo da ETE Araçás em cada etapa do MTSL para processar os 78% do lodo previsto nas condições de projeto e que foi modelado para secar até atingir os valores de 55% de ST e 60°C na saída do reator.

Tabela 18 – Comportamento do ar para o cenário 4 com secagem de 78% do lodo produzido na ETE Araçás até atingir 55% de ST.

TESTE NO CENÁRIO 4 55% ST E 60°C NO LODO SAÍDA REATOR	PONTO	CAPACIDADE DE VAPOR D'ÁGUA			PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS				
		ω^I (kg v/kg ar)	Variação (%)	ϕ^{II} (%)	T_{Ar}^{III} (°C)	p^{IV} (Bar)	h_{Ar}^V (kJ/kg)	H_{Ar}^{VI} (kJ/s)	m_{Ar}^{VII} (kg/s)
0	Ar Atmosférico - Referência	0,020	-	78,00	24,90	1,0130	0,000	-	
1	Sucção dos Sopradores	0,044	118,19	35,50	38,00	1,0130	13,332	-	
2	Descarga Soprador MTSL	0,041	107,80	37,27	40,51	1,2129	15,888	135,916	8,55
3	Saída Regenerador2	0,044	120,79	35,08	41,11	1,1833	16,503	141,184	
4	Saída Trocador de Calor	2,680	13.325,68	0,58	97,82	1,1544	74,562	637,871	
5	Saída Reator de Secagem	0,158	691,51	9,79	61,18	1,0390	36,459	653,077	
6	Saída Regenerador 1	0,137	587,41	11,27	58,18	1,0130	34,385	635,040	8,70

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 8; II: Equação 9; III: Equação 13, 59, 67, 74, 51 e dados levantados; IV: Equação 56 e dados levantados; V: Equação 51, 60, 68, 75 e 86; VI: Equação 61, 69, 76, 83; VII: Equação 40 e variável pelo sistema.

Tabela 19 – Comportamento durante a secagem dos 78% de lodo produzido na ETE Araçás até atingir 55% no cenário 4.

TESTE NO CENÁRIO 4 55% ST E 60°C NO LODO SAÍDA REATOR	PONTO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES ENERGÉTICAS		
		m_L (kg/s)	$m_{L_{seco}}$ (kg/s)	$m_{L_{\acute{a}gua}}$ (kg/s)	X_L (%)	T_L (°C)	h_L (kJ/kg)	H_L (kJ/s)
0	Lodo Úmido – Referência					24,90	0,000	0,000
1	Lodo Úmido Preaquecido	0,2609	0,0652	0,1957	25,00	53,93	103,333	26,964
2	Lodo Misturado	1,5656	0,7828	0,7828	50,00	58,79	99,835	156,305
3	Lodo Seco	1,4233		0,6405				141,100
4	Lodo Seco Recirculado	1,3047	0,7176	0,5871	55,00	60,00	99,135	129,341
5	Lodo Seco Produzido	0,1186	0,0652	0,0534				11,758
6	Lodo Seco Prod. Resfriado	0,1186	0,0652	0,0534		44,41	54,545	6,470

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 35, 65, 77 e 78; II: Equação 36 e 79; III: Equação 37 e 80; IV: Dados levantados e definidos na metodologia; V: Equação 46, 82 e dados levantados e definidos na metodologia; VI: Equação 48, 82 e dados definidos na metodologia; VII: Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia.

5.2.5 Cenário 5

O cenário 5 foi desenvolvido sobre o aspecto da secagem sem a higienização do lodo, portanto, foi definido para este cenário o teor de ST de 90% e temperatura de 40°C para o lodo na saída do reator, além de 4 sopradores em operação na ETE Araçás.

O processamento de secagem de todo o lodo produzido na ETE Araçás para a condição de projeto apresentou viabilidade termodinâmica a partir do momento que a vazão na saída do reator alcançou 12,84 kg.s⁻¹ (Figura 75 e 76).

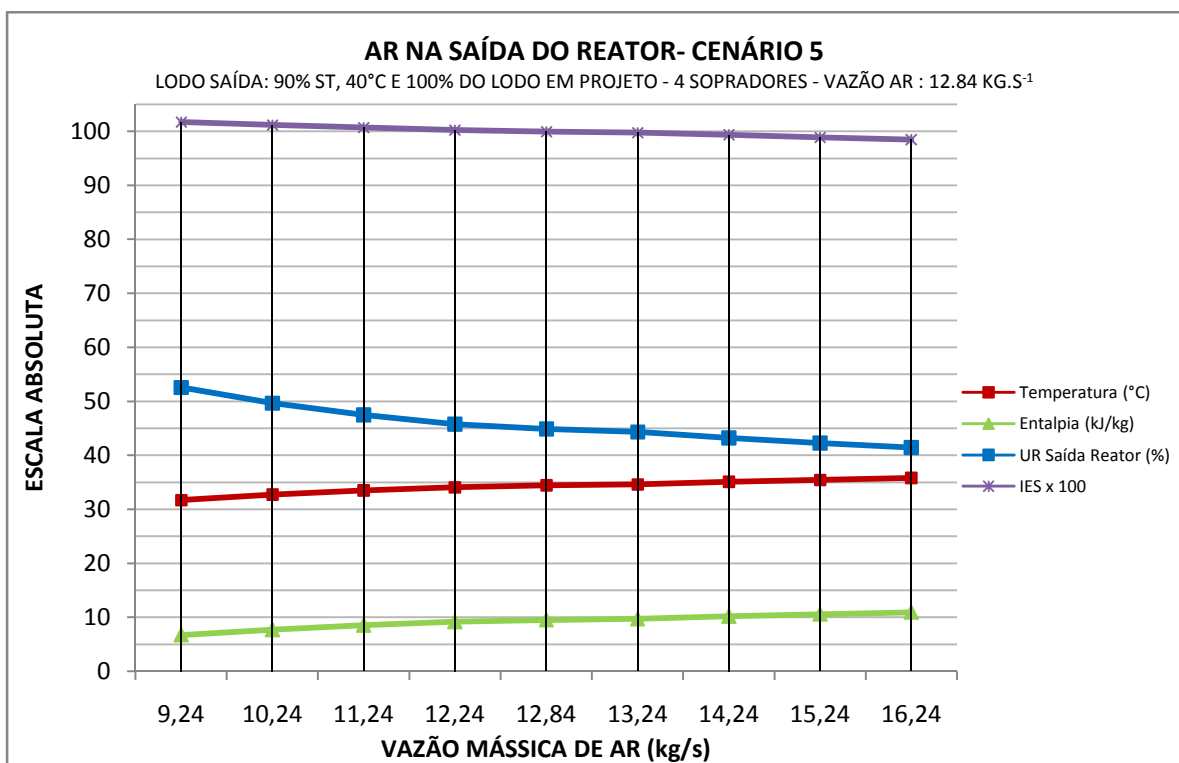


Figura 75 – Variação do ar na saída do reator em função da vazão – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores operando na ETE Araçás no cenário 5.

Fonte: Produção do próprio autor.

A umidade relativa apresentou os maiores valores na saída do reator em comparação aos demais testes, resultando em 44,89% para a vazão de 12,84 kg.s⁻¹, que representa o início da viabilidade na secagem de 100% do lodo previsto nas condições de projeto da ETE Araçás. Tal fato ocorre em virtude da associação da baixa temperatura de 34,43°C no ar com a quantidade elevada de lodo processado para o cenário.

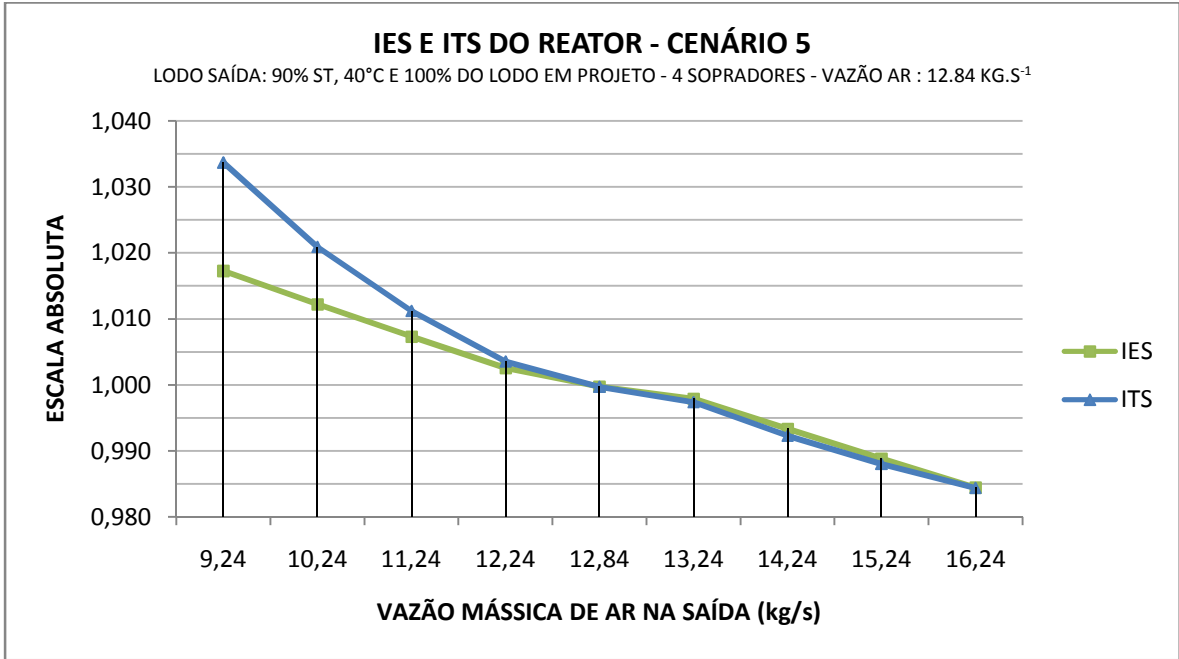


Figura 76 – Variação do IES e ITS do reator em função da vazão de ar de saída – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores operando na ETE Araçás no cenário 5.

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 77 ilustra o comportamento do ar no MTSL para secar a quantidade total de lodo previsto em projeto com a vazão de ar de 12,84 kg.s⁻¹.

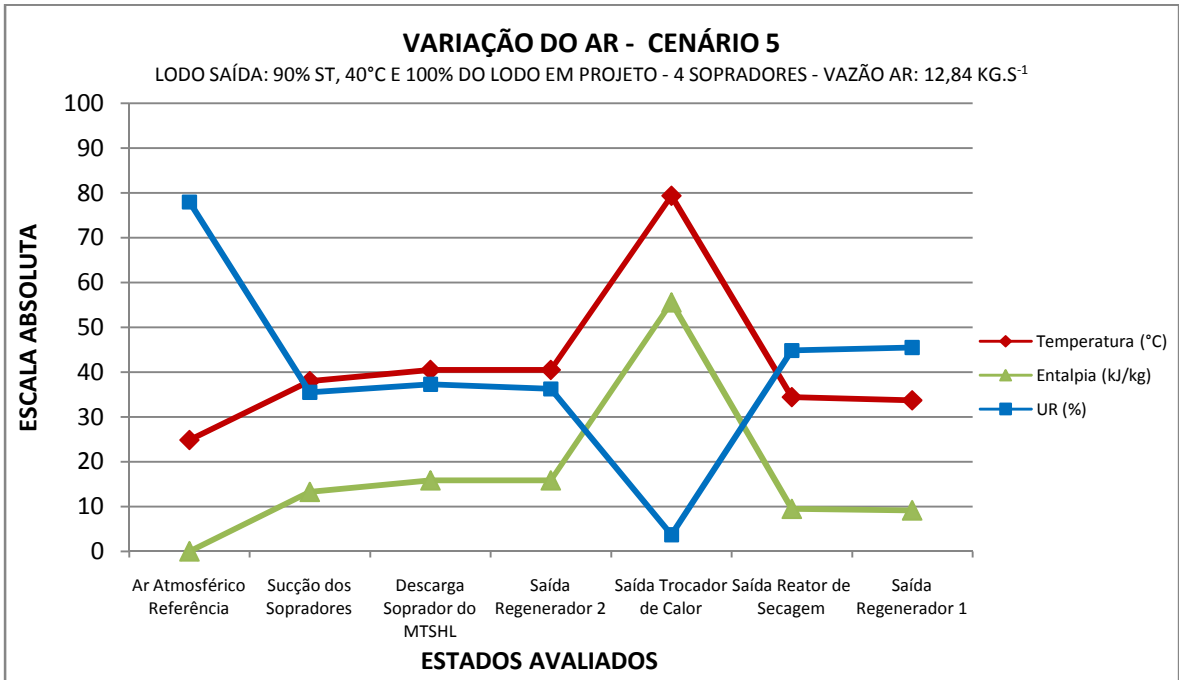


Figura 77 – Variação do ar ao longo do MTSL para o cenário 5 – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores operando na ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

A temperatura do ar na saída do reator apresentou o valor de 34,43°C, mais próxima da temperatura de referência em comparação aos demais cenários. Tal condição influenciou, inclusive, o regenerador 1 que transfere calor para o lodo durante a fase de preaquecido, aumentando, singelamente, 7,62°C na temperatura do mesmo entre os estados 1 e 2, conforme mostra a Figura 78.

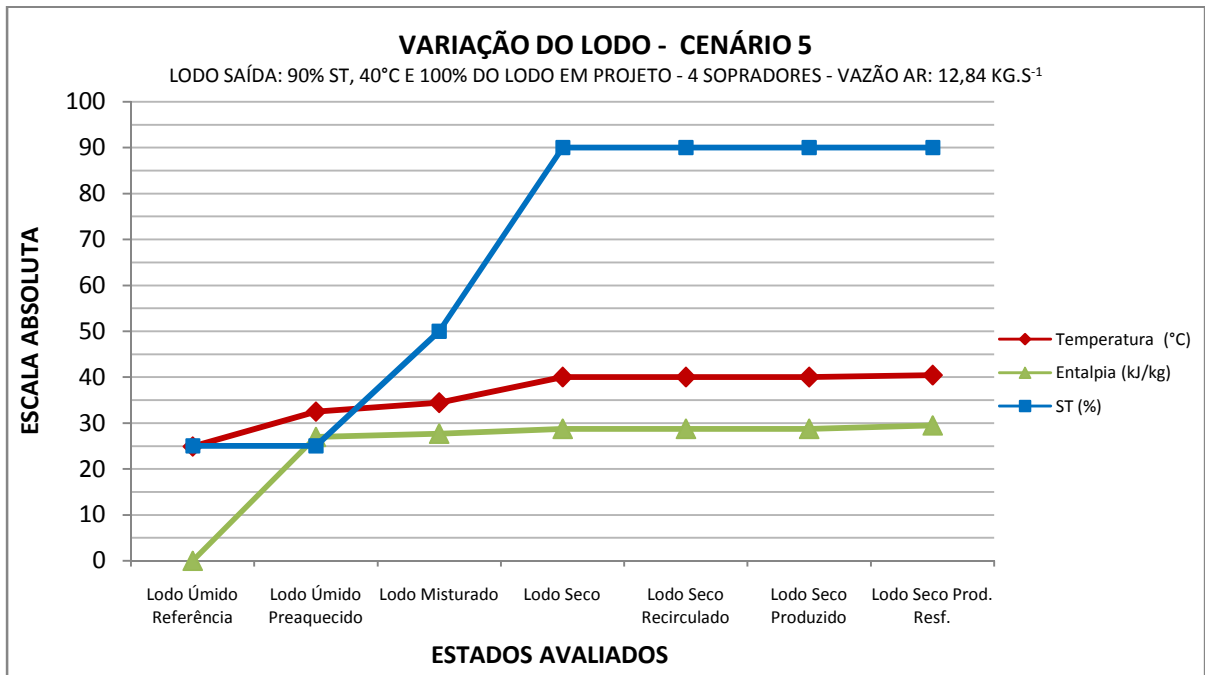


Figura 78 – Variação do lodo ao longo do MTSL para o cenário 5 – fixado os valores, na saída do reator, do lodo com 90% ST, 40°C e 100% da produção, vazão de ar de 12,84 kg.s⁻¹, além de 4 sopradores operando na ETE Araçás.

Fonte: Produção do próprio autor.

O típico comportamento do lodo em relação às propriedades de temperatura e entalpia específica, observadas nos cenários anteriores, não é recorrente neste momento. O lodo manteve, neste cenário, um comportamento mais estável e com menores variações das propriedades térmicas ao longo do MTSL.

Foi observado um aumento na temperatura de 0,41°C e entalpia específica de 0,791 kJ.kg⁻¹ durante a passagem do lodo pelo regenerador 2, mostrando que o mesmo recebeu energia do ar no estado 2 e inverteu a finalidade do regenerador em virtude da temperatura do ar (40,51°C) na entrada do equipamento apresentar um valor ligeiramente superior em comparação a temperatura do lodo (40,00°C).

As Tabelas 20 e 21 detalham o balanço de massa e energia do ar de secagem e do lodo da ETE Araçás para cada etapa do MTSL, tomando-se como referência a plena produção de lodo e a vazão de ar para quando o IES e ITS tendem a unidade.

Tabela 20 – Comportamento do ar nas diversas etapas do MTSL durante o teste de cenário 5 – condição de operação prevista em projeto da ETE Araçás.

COMPORTAMENTO DO AR	PONTO	CAPACIDADE DE VAPOR D'ÁGUA			PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS				
		ω^I (kg v/kg ar)	Variação (%)	ϕ^{II} (%)	T_{Ar}^{III} (°C)	p^{IV} (Bar)	h_{Ar}^V (kJ/kg)	H_{Ar}^{VI} (kJ/s)	m_{Ar}^{VII} (kg/s)
	0 Ar Atmosférico - Referência	0,020	-	78,00	24,90	1,0130	0,000	-	
	1 Sucção dos Sopradores	0,044	118,19	35,50	38,00	1,0130	13,332	-	
	2 Descarga Soprador MTSL	0,041	107,80	37,27	40,51	1,2129	15,888	200,183	12,60
	3 Saída Regenerador 2	0,043	113,28	36,31	40,50	1,1833	15,882	200,109	
	4 Saída Trocador de Calor	0,414	1.972,59	3,74	79,34	1,1544	55,580	700,311	
	5 Saída Reator de Secagem	0,034	72,54	44,89	34,43	1,0390	9,515	706,680	12,84
	6 Saída Regenerador 1	0,034	70,31	45,48	33,75	1,0130	9,150	701,996	

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 8; II: Equação 9; III: Equação 13, 59, 67, 74, 51 e dados levantados; IV: Equação 56 e dados levantados; V: Equação 51, 60, 68, 75 e 86; VI: Equação 61, 69, 76, 83; VII: Equação 40 e variável pelo sistema.

Tabela 21 – Comportamento do lodo nas etapas do MTSL durante o teste de cenário 5 – condição de operação prevista em projeto da ETE Araçás.

COMPORTAMENTO DO LODO	PONTO	DESCRIÇÃO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES ENERGÉTICAS		
			m_L (kg/s)	$m_{L,seco}$ (kg/s)	$m_{L,água}$ (kg/s)	X_L (%)	T_L (°C)	h_L (kJ/kg)	H_L (kJ/s)
	0 Lodo Úmido - Referência		0,3345	0,0836	0,2509	25,00	24,90	0,000	0,000
	1 Lodo Úmido Preaquecido						32,52	27,015	9,037
	2 Lodo Misturado		0,5436	0,2718	0,2718	50,00	34,42	27,665	15,040
	3 Lodo Seco		0,3020		0,0302				8,670
	4 Lodo Seco Recirculado		0,2091	0,1882	0,0209	90,00	40,00	28,706	6,002
	5 Lodo Seco Produzido		0,0929	0,0836	0,0093				2,668
	6 Lodo Seco Prod. Resfriado		0,0929	0,0836	0,0093		40,41	29,497	2,741

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 35, 65, 77 e 78; II: Equação 36 e 79; III: Equação 37 e 80; IV: Dados levantados e definidos na metodologia; V: Equação 46, 82 e dados levantados e definidos na metodologia; VI: Equação 48, 82 e dados definidos na metodologia; VII: Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia.

5.2.5.1 Variando o Teor de ST Desejado no Lodo no Cenário 5

Para avaliar a variação do ITS e IES do reator em função da variação da parcela de água evaporada, foi modelada a variação do teor de ST de 55 até 95% no lodo de saída do reator. As condições fixadas foram a vazão de ar em $12,84 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ na saída e o lodo processamento do lodo em 40°C e 100% da quantidade prevista em projeto para a ETE Araçás, ficando os resultados apresentados nas Figuras 79 e 80.

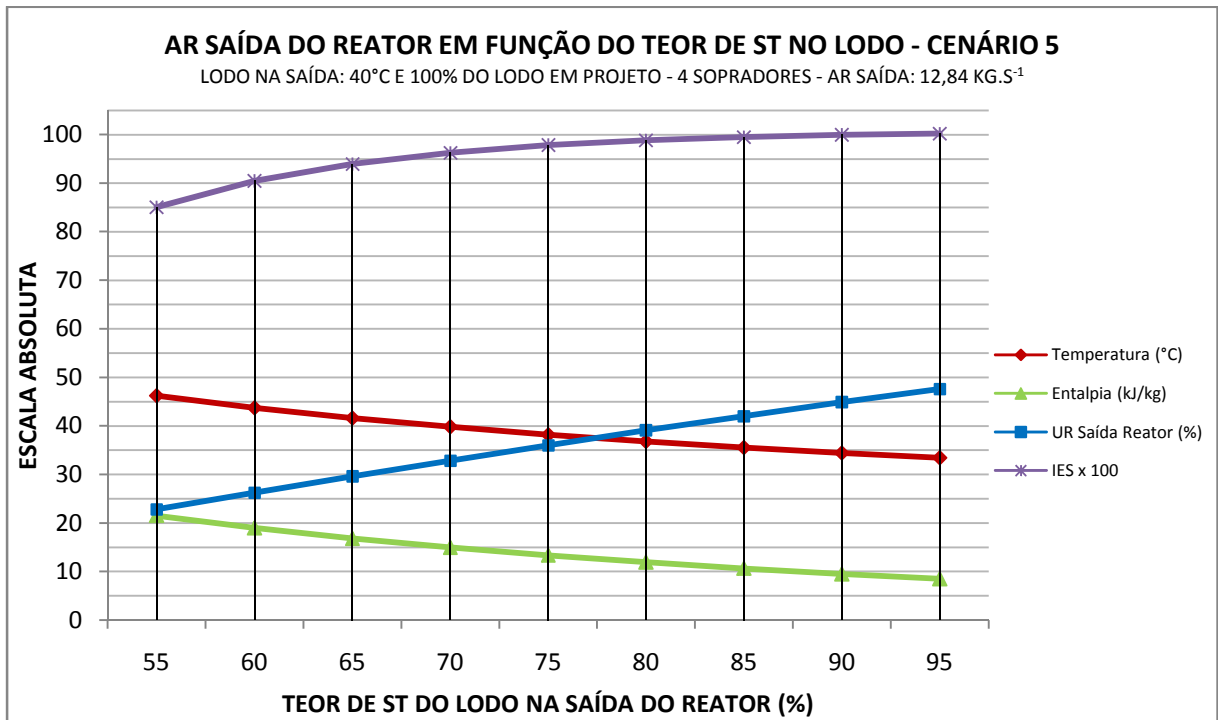


Figura 79 – Comportamento do ar na saída do reator em função do teor de ST do lodo – fixadas na saída do reator, para o cenário 5, a vazão de ar de $12,84 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 100% do lodo com 40°C , além de 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

Variações significativas das propriedades do ar foram observadas em função da variação do teor de ST no lodo de saída. Tomando como referência a redução de 90 para 55% de ST no lodo de saída, o ar apresentou uma correspondente alteração de $11,77^\circ\text{C}$ de temperatura, $12,02 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ de entalpia específica e $-22,04\%$ de umidade relativa, correspondendo a variações de 34% na temperatura, 126% na entalpia específica e -49% na umidade relativa.

O IES e ITS, que no teor de ST de 90% apresentavam valores que tendiam a unidade, registraram reduções de 15% no IES e 13% no ITS quando o ST no lodo foi

para 55%. Tais valores representam um considerável aumento na capacidade de processamento do sistema (Figura 80).

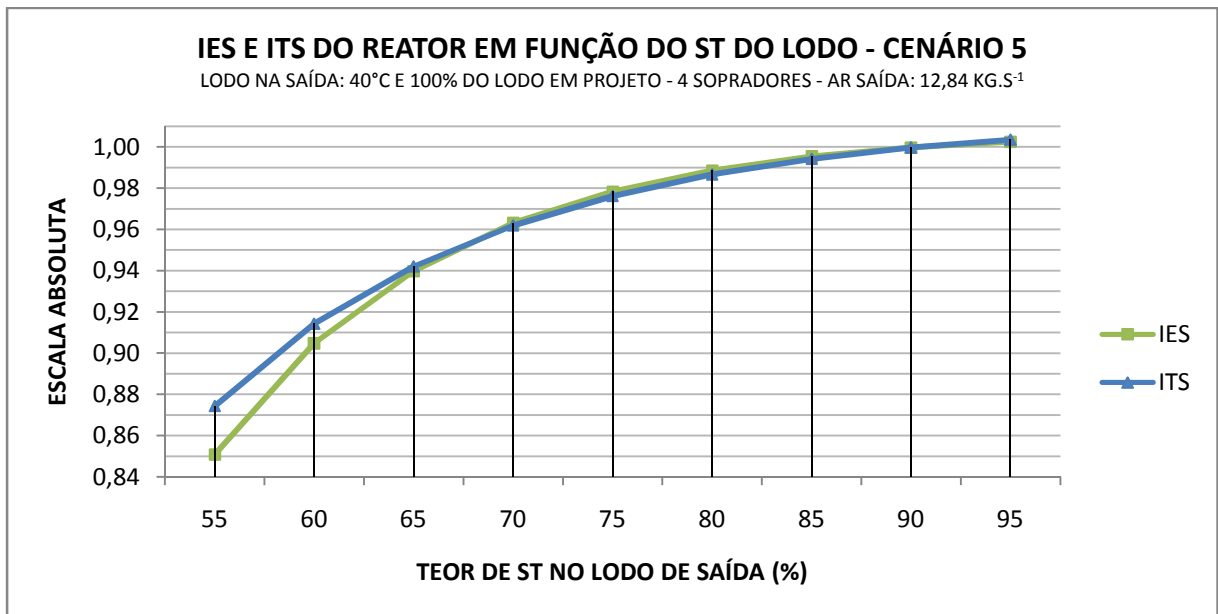


Figura 80 – Variação do IES e ITS do reator em função do teor de ST do lodo – fixadas na saída do reator a vazão de ar de 12,84 kg.s⁻¹, 100% do lodo com 40°C, além de 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

Simulando a secagem deste cenário para 55% de ST no lodo de saída em função da vazão de ar, foi notado que o ponto ótimo termodinâmico passa a ser de 8,55 kg.s⁻¹ (Figura 81).

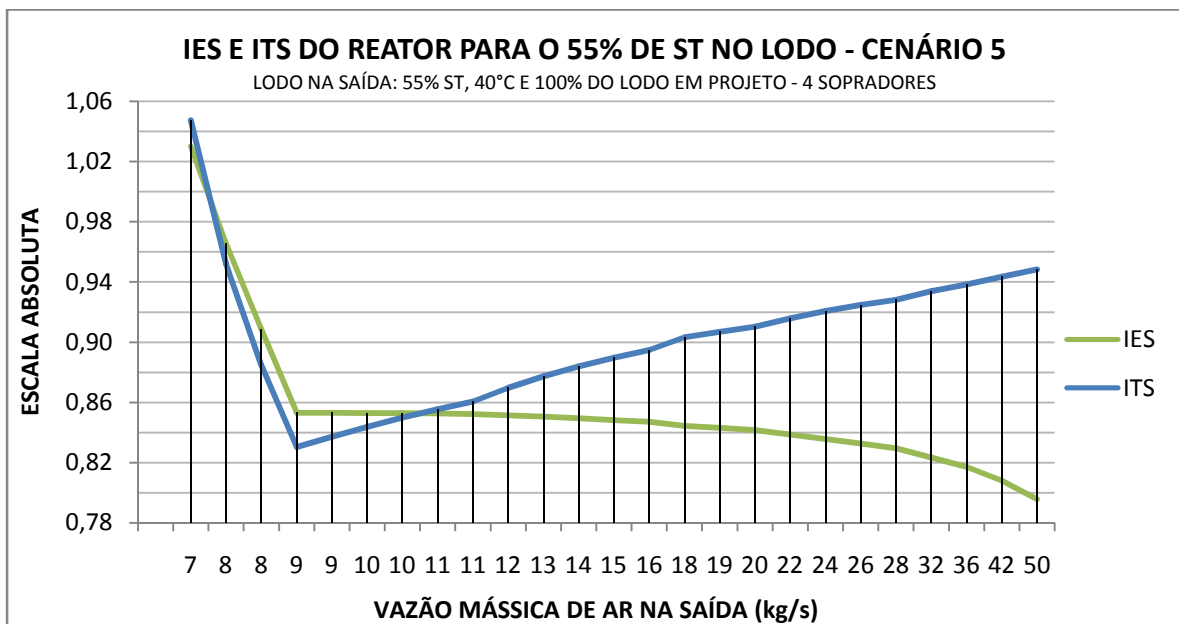


Figura 81 – Variação do IES e ITS do reator em função da vazão de ar na saída – fixadas na saída do reator, para o cenário 5, o lodo com 55% ST, 40°C e 100% da produção, além de 4 sopradores.

Fonte: Produção do próprio autor.

Na modelagem apresenta na Figura 81 os comportamentos do IES e do ITS foram divergentes para o incremento de vazão, caracterizando que a vazão proporciona um aumento da margem energética no reator, seguido de perda de temperatura no ar. A redução de temperatura no ar se deve ao aumento da própria vazão que percorre os trocadores de calor, o que, por sua vez, reduz o rendimento dos mesmos em relação a propriedade da temperatura.

As Tabelas 22 e 23 detalham o balanço de massa e energia, respectivamente, do ar de secagem e do lodo da ETE Araçás em cada etapa do MTSL para processar 100% do lodo produzido nas condições de projeto até atingir os valores de 55% de ST e 40°C na saída do reator.

Tabela 22 – Comportamento do ar para o cenário 5 com secagem de todo o lodo produzido na ETE Araçás até atingir 55% de ST e 40°C na saída do reator.

TESTE NO CENÁRIO 5 55% ST E 40°C NO LODO SAÍDA REATOR	PONTO	CAPACIDADE DE VAPOR D'ÁGUA			PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS				
		ω^I (kg v/kg ar)	Variação (%)	ϕ^{II} (%)	T_{Ar}^{III} (°C)	p^{IV} (Bar)	h_{Ar}^V (kJ/kg)	H_{Ar}^{VI} (kJ/s)	m_{Ar}^{VII} (kg/s)
0	Ar Atmosférico - Referência	0,020	-	78,00	24,90	1,0130	0,000	-	
1	Sucção dos Sopradores	0,044	118,19	35,50	38,00	1,0130	13,332	-	
2	Descarga Soprador MTSL	0,041	107,80	37,27	40,51	1,2129	15,888	135,916	8,55
3	Saída Regenerador 2	0,043	113,11	36,34	40,49	1,1833	15,867	135,742	
4	Saída Trocador de Calor	2,617	13.010,61	0,59	97,70	1,1544	74,434	636,773	
5	Saída Reator de Secagem	0,080	302,27	19,25	49,23	1,0390	24,593	653,503	8,74
6	Saída Regenerador 1	0,072	258,21	21,62	46,67	1,0130	22,562	635,757	

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 8; II: Equação 9; III: Equação 13, 59, 67, 74, 51 e dados levantados; IV: Equação 56 e dados levantados; V: Equação 51, 60, 68, 75 e 86; VI: Equação 61, 69, 76, 83; VII: Equação 40 e variável pelo sistema.

Tabela 23 – Comportamento do lodo produzido na ETE Araçás no cenário 5 até atingir 55% de ST com vazão de ar de 8,74 kg.s⁻¹ na saída do reator.

TESTE NO CENÁRIO 5 55% ST E 40°C NO LODO SAÍDA REATOR	PONTO	PROPRIEDADES FÍSICAS				PROPRIEDADES ENERGÉTICAS		
		m_L (kg/s)	$m_{L_{seco}}$ (kg/s)	$m_{L_{\acute{a}gua}}$ (kg/s)	X_L (%)	T_L (°C)	h_L (kJ/kg)	H_L (kJ/s)
0	Lodo Úmido - Referência	0,3345	0,0836	0,2509	25,00	24,90	0,000	0,000
1	Lodo Úmido Preaquecido					44,36	69,147	23,132
2	Lodo Misturado	2,0072	1,0036	1,0036	50,00	40,88	46,613	93,563
3	Lodo Seco	1,8247		0,8211				76,833
4	Lodo Seco Recirculado	1,6727	0,9200	0,7527	55,00	40,00	42,106	70,430
5	Lodo Seco Produzido	0,1521	0,0836	0,0684				6,403
6	Lodo Seco Prod. Resfriado	0,1521	0,0836	0,0684		40,41	43,249	6,577

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 35, 65, 77 e 78; II: Equação 36 e 79; III: Equação 37 e 80; IV: Dados levantados e definidos na metodologia; V: Equação 46, 82 e dados levantados e definidos na metodologia; VI: Equação 48, 82 e dados definidos na metodologia; VII: Equação 47, 81 e dados definidos na metodologia.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.3.1 Secagem e Higienização do Lodo da ETE Araçás

A viabilidade termodinâmica para a secagem do lodo produzido na ETE Araçás foi comprovada durante os testes de cenários, mas deve ser destacada a temperatura do ar na entrada do reator de secagem que foi superior aos 95°C nas melhores condições termodinâmicas, representando um forte indício da viabilidade do processo para a escala real, principalmente quando comparados com os resultados encontrados na literatura, 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 a secagem por via solar com a temperatura do ar variando, durante o período claro, na ordem de 50°C.
- Gill, Singh e Pal Singh (2012) alcançaram a secagem de 46,0% para 91,7% de ST no processamento de fosfato de cálcio num secador solar que alcançou temperaturas na ordem de 60°C;
- Murthy (2009) descreve sobre a secagem de materiais alimentícios que operam com temperaturas de até 20°C acima da ambiente.

A eficácia da higienização do lodo para este estudo partiu do princípio que a mesma seria alcançada para temperaturas a partir de 60°C. Entretanto, a higienização térmica é uma relação entre a temperatura e o tempo de exposição do material ao calor, podendo ser alcançada para temperaturas inferiores aos 60°C.

Diversas pesquisas foram realizadas para identificar os valores de temperatura que são efetivos na eliminação de microorganismo, podendo ser observado a eficácia das baixas temperaturas na higienização nos exemplos a seguir:

- Aroza e Kazmi (2015) ao pesquisarem o tratamento de esgoto, por meio da filtração em sistemas de vermicompostagem, alcançaram a eliminação de 96,9% de *Salmonellas sp.* e 99,3% de *Escherichia Coli* para a faixa de temperatura de 38 a 40°C, higienização não observada para no mesmo experimento sob temperaturas de 25 a 27°C;

- Pecson *et al.* (2007) realizaram experimentos para a higienização de lodo biológico submetido a diversas temperaturas, resultando na eliminação da viabilidade de 99% dos ovos de *Ascaris sp.* para a temperatura de 50°C em 100 minutos de exposição das amostras ao calor, enquanto para as temperaturas de 40, 30 e 20°C o tempo para a inativação foi na ordem de dias;
- Arce (2009) e Barés (2010) eliminaram patógenos em lodo biológico com tratamento térmico em temperaturas de 50, 60 e 70°C, combinando os intervalos de tempo, respectivamente, de 90, 60 e 30 minutos;
- 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;
- Andreoli e Bonnet (2000) apresentam, para lodo anaeróbio em leitos cobertos por estufas, a eliminação da viabilidade dos ovos de Helminhos com exposição de 50 °C em 48 horas, 60 °C em 6 horas e 80 °C em 5 minutos.
- Passamani, Keller e Gonçalves (2002) relatam a completa eliminação da viabilidade dos ovos de helmintos em amostras de lodo biológico anaeróbio para a pasteurização em temperaturas de 70°C.

Para o cenário 5, em que a temperatura do lodo na saída do reator de secagem é fixada em 40°C, outras variáveis devem ser consideradas para definir o nível de higienização do material, pois a sobrevivência dos microorganismos está ligada a fatores externos como a disponibilidade de alimentos, temperatura, teores de oxigênio e água. Por exemplo, Kamil Salihoglu *et al.* (2006) relataram que ao submeter o lodo biológico para a secagem térmica em estufas com temperaturas de, aproximadamente, 40°C no material, maior velocidade no decaimento de coliformes fecais ocorreu quando a umidade do lodo foi inferior aos 50%.

Liang, Das e McClendon (2003) avaliaram a influência da umidade e temperatura do lodo para o metabolismo dos microorganismos em sistemas de compostagem, concluindo que a umidade é o fator mais relevante para o metabolismo dos microorganismos do que a própria temperatura, apresentando, nos seus experimentos, os valores de umidade inferiores aos 50% com significativa redução na atividade microbiana.

Neste contexto, apesar do cenário 5 não objetivar, prioritariamente, a higienização do lodo, a ação de secar o mesmo até atingir valores de 10% de umidade, inevitavelmente, gera algum nível de higienização no material, além da temperatura de processamento de 40°C que, isoladamente, já é suficiente para a eliminação de diversos organismos patogênicos de menor resistência a variações térmicas.

A recuperação de parte do calor a partir dos fluxos de saída do sistema foi responsável por adicionar considerável quantidade de energia ao processo de secagem. A Tabela 24 detalha as variações de temperatura e entalpia para as etapas de regeneração de calor e, ainda, para o aproveitamento da energia térmica do ar dos sopradores da ETE Araçás.

Tabela 24 – Variações de Temperatura e Entalpia entre a entrada e saída dos Trocadores e Regeneradores de Calor que foram empregados neste estudo.

CONDIÇÃO		Regenerador 1		Trocador de Calor		Regenerador 2	
		ΔT	Δh	ΔT	Δh	ΔT	Δh
CENÁRIO 1	Ar	-2,13	-1,15	57,02	58,372	0,22	0,22
	Lodo	34,11	127,69	Nc	Nc	-31,59	-66,01
CENÁRIO 3	Ar	-2,27	-1,244	56,86	58,217	0,41	0,41
	Lodo	28,98	103,17	NC	NC	-31,59	-66,01
CENÁRIO 4	Ar	-3,00	-2,074	56,71	58,059	0,60	0,61
	Lodo	29,03	133,33	NC	NC	-15,59	-44,59
CENÁRIO 5	Ar	-2,56	-2,031	57,21	58,567	-0,02	-0,021
	Lodo	19,14	69,14	NC	NC	0,41	1,143

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: NC: Não calculado, pois não existe troca de calor com lodo neste ponto.

O regenerador de calor 1 apresentou ganhos significativos no aquecimento do lodo, gerando incrementos médios de 27,89°C na temperatura e que representa 112% de aumento sobre os 24,9°C encontrado no estado anterior do material (estado de referência).

Para o regenerador 2 os incrementos de temperatura e entalpia para o ar foram baixos, inclusive, no cenário 5, ocasionou a perda de calor para o lodo e, por conseqüência, o resfriamento do ar. O baixo desempenho apresentou, globalmente, um aumento médio de temperatura e entalpia de 0,30°C e 0,304 kJ.kg⁻¹ para o ar.

O baixo desempenho do regenerador ocorreu em virtude da baixa capacidade térmica do lodo em comparação ao ar, conforme indica as grandes variações de

temperatura e entalpia que ocorrem no lodo e alcançam, por exemplo, $-31,59^{\circ}\text{C}$ e $-66,01 \text{ kJ.kg}^{-1}$ nos cenários 1 e 3.

O trocador de calor, empregado para aquecer o fluxo de ar de secagem a partir do aproveitamento da energia térmica do ar descarregado pelos sopradores da ETE Araçás, apresentou um bom desempenho com base nos pontos ótimos dos cenários. O ar de secagem alcançou valores médios de $97,76^{\circ}\text{C}$ e $74,50 \text{ kJ.kg}^{-1}$, correspondente a variação de $56,95^{\circ}\text{C}$ e $58,30 \text{ kJ.kg}^{-1}$ em relação ao estado anterior e que, por sua vez, corresponde ao aumento de 140% sobre a temperatura e 360% sobre a entalpia específica.

Ao considerar toda a variação de temperatura e entalpia do ar de secagem entre o estado 2 (soprador teórico) e o estado 4 (saída do trocador de calor), o incremento proporcionado pelo trocador de calor é superior aos 99,47% para a temperatura e entalpia específica.

Avaliando os cenários 3 e 4 em relação ao ar de saída do sistema, apesar da transferência de calor para o preaquecimento do lodo úmido pelo regenerador 1, o mesmo apresentou a temperatura na ordem de, respectivamente, 58 e 45°C . Tais valores ainda são elevados quando comparados com a temperatura de referência de $24,9^{\circ}\text{C}$ do presente estudo, indicando que ainda é possível realizar o aproveitamento desta energia térmica que poderá elevar a eficiência global do sistema termodinâmico e possibilitar o aumento da quantidade de lodo seco nos cenários 3 e 4.

Algumas unidades de secagem de lodos são construídas com a configuração de recirculação do ar de saída, permitindo o aproveitamento do calor residual que seria liberado para o ambiente externo por esse fluxo.

Peeters (2010) descreve um sistema de secagem na Bélgica que emprega a recirculação do gás de secagem da saída para o início do sistema, passando novamente pelo reaquecimento em queimador a gás e em seguida injetado para a secagem e higienização do lodo.

Golman e Julklang (2014) estimaram ganhos de 16% na eficiência energética e 50% de economia na entrada de energia no sistema para um secador de lodo por pulverização e que tinha um regenerador de calor instalado para recuperar parcela da energia presente no ar de saída, caso semelhante ao modelado neste trabalho.

Entretanto, de acordo com os autores, se fosse realizada a recirculação do ar de escape para continuar o processamento do lodo, os ganhos na eficiência energética atingiriam 34% e a economia de energia chegaria aos 61%.

Tomando como base a premissa de recirculação do ar de saída do secador, o aproveitamento de energia térmica do ar descarregado pelos sopradores da ETE Araçás poderá alcançar níveis de secagem superiores aos encontrados nos cenários 3, 4 e 5.

5.3.2 Teoria de Secagem e Higienização de Lodo com Energia Térmica de Baixa Temperatura

Os secadores mecânicos de lodo são baseados nas leis da termodinâmica e empregam, com destaque, o fenômeno de transferência de energia 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 calor para aumentar a temperatura e gerar a mudança do estado físico da água de líquido para vapor. A consequência deste tipo de vaporização (acima de 100°C) é a geração de um novo fluxo gasoso formado pelo vapor d'água que passa a agregar, em volume e massa, a vazão dos gases na saída do sistema.

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 (gases de combustão ou paredes do secador) para a fonte fria (lodo úmido) em virtude do elevado gradiente de temperatura que é obrigatório para ocorrer a transferência de calor e permitir que a água presente no lodo alcance a temperatura de ebulição, vaporizando a 100°C quando a nível do mar.

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 reator de secagem.

Em contrapartida, a teoria e o método proposto por este estudo mostram 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 até, o último, atingir a máxima pressão de vapor d'água ou 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 apenas de massa e não de energia, ao induzir um fluxo de ar não saturado através do lodo úmido, transferindo a massa de água líquida 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 82 que ilustra uma adaptação do processo de resfriamento evaporativo para o processo de secagem de lodo em baixas temperaturas.

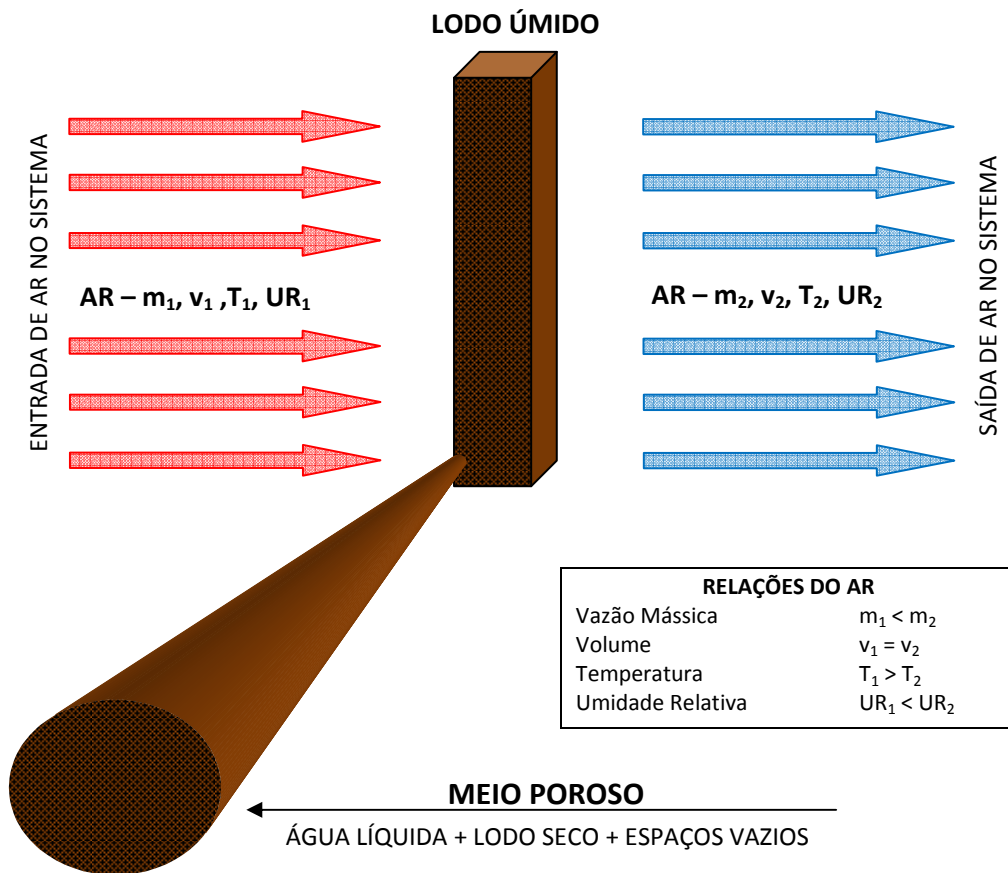


Figura 82 – Representação didática do secador de lodo com base no processo de refrigeração evaporativa.

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao confrontar a teoria que embasa a secagem térmica dos secadores mecânicos com a teoria da secagem em baixas temperaturas, a Figura 83 demonstra uma comparação sobre o processo de secagem e vaporização da água presente no lodo, ilustrando como a água vaporizada nos tradicionais secadores de lodo gera um fluxo de vapor d'água que aumenta a vazão mássica e volumétrica dos gases na saída do reator. Enquanto na secagem em baixas temperaturas a água seria transferida do lodo para o ar de secagem, não gerando um novo fluxo de saída pela evaporação da água, mas sim a sorção da mesma pelo ar seco.

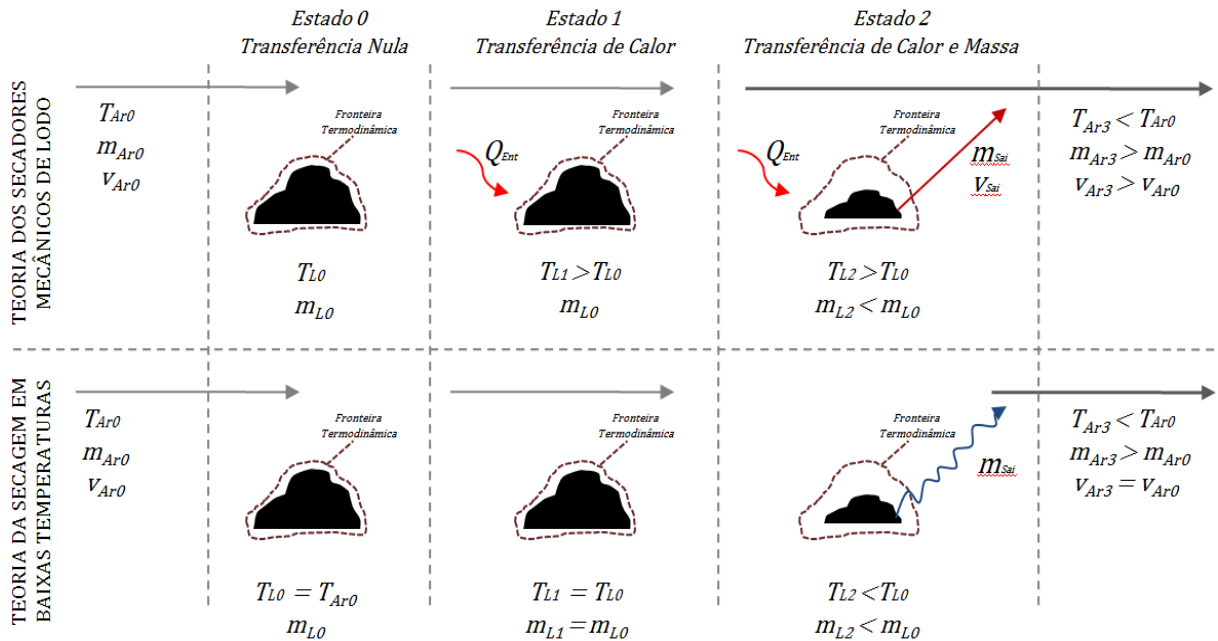


Figura 83 – Esquema caracterizando e comparando as teorias de secagem de lodo com ênfase na vaporização.

Fonte: Produção do próprio autor.

Para Stasta *et al.* (2005) quanto maior a quantidade de água vaporizada do lodo, maior será a vazão gasosa na saída do sistema de secagem tradicional e, por conseqüência, maior será a demanda dos dispositivos que realizam o tratamento dos gases descartados da planta.

Em contrapartida, a evaporação da água em secadores de baixa temperatura apresenta a vantagem de reduzir as taxas aplicadas sobre os equipamentos que tratam o ar descartado pela unidade.

Ainda, baseado na teoria de secagem de lodo em baixas temperaturas, o emprego de uma fonte térmica para aumentar a temperatura do ar de secagem pode apresentar dois significativos ganhos sobre o processamento de lodos e, dependendo das condições da fonte, até um terceiro ganho, conforme descrito a seguir.

- I. Aumenta a capacidade de absorção de vapor d'água no ar de secagem pelo aumento de temperatura;
- II. Reduz a vazão de ar necessária para a secagem de lodo em virtude do aumento da capacidade de absorção de vapor d'água pelo ar – que por conseqüência – reduz o porte e custos de instalação e operação dos equipamentos envolvidos

no sistema de secagem. Deng *et al.* (2015) comprovaram que, quanto mais elevado for a temperatura do ar, menor será o tempo necessário para a secagem do lodo;

- III. Quando a fonte quente permitir o aumento da temperatura do ar a valores acima dos 60°C, as chances de se obter, além da secagem, a completa higienização do lodo se tornam expressivas.

Por exemplo, considerando que o processo de secagem térmica será realizado com a vazão de 1 kg.s⁻¹ de ar seco ao nível do mar e com temperatura e umidade de 25°C e 80% de UR, aquecendo o referido ar para a temperatura de 35°C ocorre um aumento na sua capacidade de absorção de vapor d'água de 82%, caso a temperatura fosse elevada até os 80°C esse ganho chegaria aos 2.641%, reduzindo a UR inicial de 80% para, respectivamente, 44% e 3% ao final dos dois aquecimentos, conforme mostra a Tabela 25.

Tabela 25 – Capacidade de absorção de vapor d'água no ar seco ao nível do mar.

Temperatura (°C)	Capacidade de Absorção ^I (g vapor/segundo)	Varição Capacidade em Relação a Referência	UR ^{II}
25°C*	20,169*	-	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%

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: I: Equação 29; II: Equação 9; (*): Referência.

Murthy (2009) e Dincer e Sahin (2004) descrevem que o aquecimento do ar, utilizado em sistemas de secagem de produtos alimentícios, é empregado para acelerar o processo de evaporação da água, conseguindo velocidades de secagem maiores em comparação ao uso do ar nas condições ambientes.

Kamil Salihoglu *et al.* (2006) desenvolveram um secador solar de lodo coberto e que apresenta um sistema de ventilação forçada, permitindo que o ar externo, ao entrar no sistema, eleve a sua temperatura e reduza a umidade relativa, seguindo o princípio que uma secagem eficiente ocorre em função da diferença das umidades relativas entre o lodo e o ar.

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 84 mostra como a pressão de saturação de vapor d'água cresce numa taxa exponencial e, por conseqüência, o gradiente de pressão entre a água que hidrata o lodo e o vapor d'água presente no ar acompanha a mesma proporção de variação para sistemas estacionários.

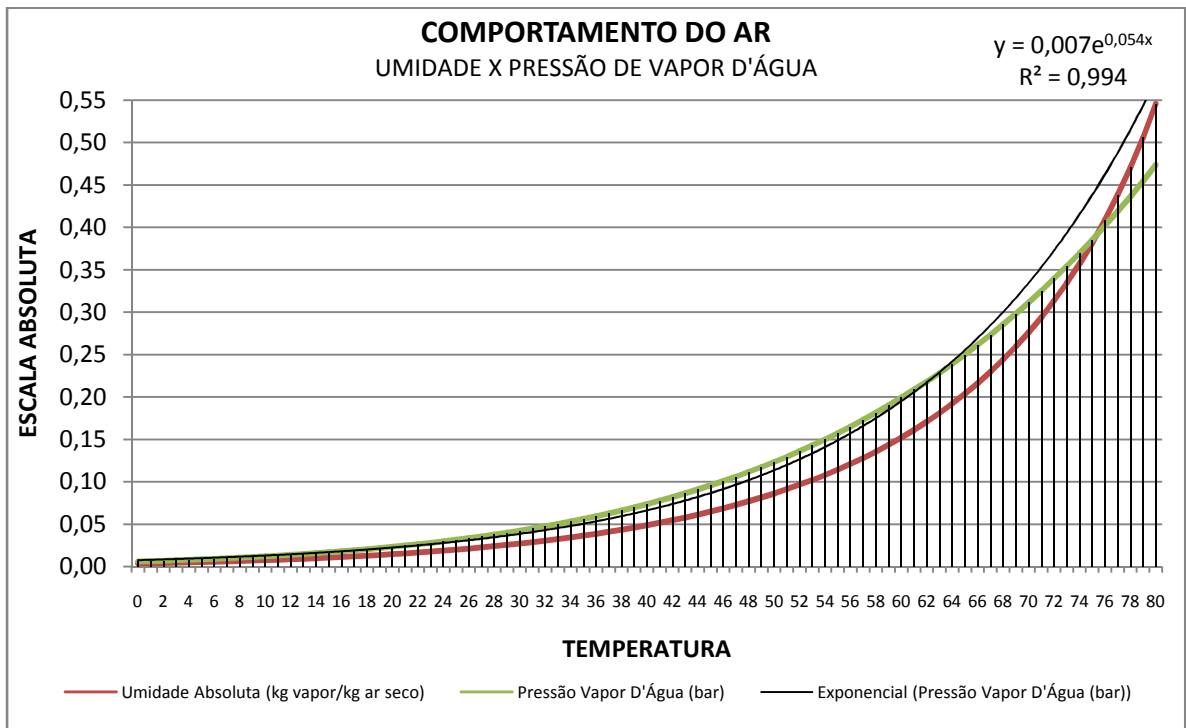


Figura 84 – Curva de umidade absoluta e pressão parcial do vapor d'água em função da variação de temperatura do ar.

Fonte: Produção do próprio autor.

Notas: Umidade Absoluta: Equação 29; Pressão Vapor D'Água: Obtido a partir do *Software Steam Table@*.

Deng *et al.* (2015) relatam que o tempo de secagem do lodo e a velocidade da evaporação são proporcionais à diferença de umidade do material e do ar, sendo, ainda, essa diferença, a força motriz responsável pela difusão da água na parte interna do lodo para a parte externa. Luboschik (1999) ao descrever um sistema de

secagem de lodo com aproveitamento de energia solar, localizado no sul da Alemanha, afirmou que os melhores resultados de secagem são obtidos com o lodo aquecido e o ar mais seco, pois ressalta a diferença de pressão parcial de vapor d'água entre os materiais.

Correlacionando a secagem térmica em baixas temperaturas com a higienização, pode-se afirmar que a partir da temperatura de 60°C a completa eliminação de patógenos no lodo poderá ser alcançada, tornando-se, ainda, mais eficiente quando a temperatura atinge os 80°C, pois o tempo necessário para a completa higienização do material é da ordem de minutos.

A última condição de temperatura, proposta para presente estudo, permite um tratamento térmico mais interessante por associar a secagem e higienização de lodo com alta taxa, pois em 80°C o tempo necessário para a higienização é reduzido e a taxa de transferência de água do lodo para o ar é ampliada em conjunto com a sua capacidade de absorção.

A secagem e a higienização de lodo com energia térmica de baixa temperatura também permite o aproveitamento de energia dissipada na forma de calor por processos produtivos de vários gêneros, podendo ser essa energia recuperada e aproveitada para maximizar as propriedades de secagem do ar e, dependendo das condições, alcançar a higienização do lodo. Tal contexto é semelhante ao caso descrito no presente estudo que faz uso do calor aproveitado do ar dos sopradores do sistema de aeração de uma ETE de Lodo Ativado para realizar a secagem e higienização do próprio lodo produzido na unidade.

Tal teoria indica que este método permitirá o surgimento de processos com baixo custo de operação por possibilitar o uso de energia térmica de baixa temperatura, pois os métodos tradicionais promovem o aquecimento do lodo em temperaturas muito superiores aos 100 °C por meio da queima de combustíveis.

A teoria proposta implica na operação em temperaturas entre a ambiente e os 100°C, o que viabilizará o uso de fontes alternativas de energia térmica de baixa temperatura e, dependendo dos futuros desenvolvimentos, a obtenção de um processo autossustentável de secagem e higienização de lodo.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados durante a discussão possibilitaram as seguintes conclusões sobre os cenários testados para a avaliação termodinâmica:

- A energia térmica aproveitada do ar dos sopradores do sistema de aeração da ETE Araçás permite secar 100% do lodo produzido durante o ano de 2014 (3 sopradores em operação) e 59% da produção prevista nas condições de projeto da estação (4 sopradores em operação), alcançando valores no lodo de 90% de ST e 80°C na saída do reator;
- Com a alteração das condições exigidas para a temperatura de trabalho do lodo no reator, conclui-se que é possível secar até 78% da produção de lodo prevista nas condições de projeto da ETE Araçás (4 sopradores em operação), alcançando os valores no lodo de 90% de ST e 60°C na saída do reator;
- Ao modelar a condição de secagem, não visando a higienização, baseado no princípio do resfriamento evaporativo, comprovou-se que é possível alcançar o teor de 90% de ST e 40°C em 100% do lodo produzido na ETE Araçás para as condições de projeto (4 sopradores operando), permitindo, ainda, realizar a operação do reator com significativo excedente de energia em função da redução do teor de ST no lodo de saída de 90% para 55%, sendo o excedendo de energia ainda passível de aumento pelo incremento da vazão de ar.

Torna-se claro que a comprovação da viabilidade termodinâmica para secar lodo biológico a partir do aproveitamento de energia térmica de baixa temperatura dos sopradores de ar representa, dentro dos aspectos da sustentabilidade, um importante avanço para o desenvolvimento de estações autossustentáveis energeticamente, pois permitirá a redução da demanda externa de recursos energéticos para o tratamento térmico do lodo produzido nas próprias unidades que fazem uso de sistemas de aeração por ar difuso.

Apesar da quantidade de energia não ser suficiente para, simultaneamente, secar e higienizar em 60 e 80°C a totalidade do lodo produzido na ETE Araçás para as condições de projeto, os sopradores de ar podem ser utilizados em conjunto com outras fontes de energia térmica, surgindo processos combinados de secagem e higienização. Os sopradores também podem ser modelados com base num modelo

de secagem de lodo que apresente a configuração da recirculação do ar de secagem, buscando ganhos no processamento do lodo.

Diante do exposto ao longo do trabalho, conclui-se que o Modelo Termodinâmico de Secagem de Lodo apresentou resultados consistentes ao modelar o tratamento térmico do lodo produzido na ETE Araçás a partir do aproveitamento do calor presente no ar descarregado pelos sopradores da própria estação estudada, merecendo destaque o comportamento das seguintes etapas do modelo termodinâmico desenvolvido:

- O regenerador de calor 1, empregado para recuperar uma parcela da energia térmica presente no fluxo de ar no estado 5 (saída do reator) e transferir para o lodo úmido no estado 0 (referência), apresentou significativo desempenho e comprovada importância para o seu uso no presente modelo;
- O regenerador 2, que trabalha com ar no estado 2 (saída do soprador teórico) e lodo seco produzido no estado 5, apresentou um baixo desempenho, comparado ao regenerador 1, para aumentar as propriedades do ar. Permitindo, no cenário 5, a perda de calor do próprio ar para o lodo, gerando, assim, singela redução da eficiência global do modelo para este cenário. Neste contexto, conclui-se que o emprego deste regenerador deve ser avaliado com maiores critérios para ponderar o custo benefício do seu uso;
- Ficou evidente que o trocador de calor, empregado entre o fluxo de ar de secagem e o ar descarregado pelos sopradores da ETE Araçás, apresenta um papel vital para o MTSL, pois o mesmo proporcionou ganhos superiores aos 99,47% para a temperatura e entalpia específica do ar de secagem;
- Pequenos aquecimentos no ar de secagem revelaram ganhos elevados sobre a capacidade de absorção de vapor d'água, ocasionando incrementos entre a capacidade do ar na entrada do modelo (estado 0) e saída do reator (estado 5), nas melhores condições termodinâmicas, de 270 a 1.049%. Para as variações entre o ar de referência e a saída do trocador de calor (estado 4), os ganhos foram de 13.010 a 13.325%. Tal condição, em casos reais, proporcionaria um elevado gradiente de pressão entre a água líquida no lodo e o vapor d'água presente no ar, favorecendo, com isto, o processo de transferência de massa do lodo para o ar;

- O aquecimento do ar se revelou de grande importância para garantir a secagem de todo o lodo em baixas temperaturas, pois permitiu a evaporação da água presente no material e não tornou a umidade do ar um fator limitante da secagem, haja vista que o maior valor registrado de UR na saída do reator foi de 48,89% para o cenário 5.

Durante o desenvolvimento deste estudo foi possível compreender que cabe ao projetista, ao optar pelo tratamento térmico, estudar e observar os gargalos energéticos existentes e propor a melhor rota tecnológica para a secagem do lodo, possibilitando, de acordo com o tipo de energia disponível e lodo a ser seco, a redução das perdas energéticas para elevar a eficiência do processo.

As perdas energéticas, provenientes das fugas de energia e irreversibilidades, ambas inerentes ao processo termodinâmico real, são significativas em muitos equipamentos eletromecânicos de grande porte e podem ser observadas como oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem o seu aproveitamento em processos menores, paralelos e que não demandam de energia nobre, por exemplo, a secagem e higienização de lodos.

A teoria da secagem e higienização de lodo em baixa temperatura permitirá o surgimento de processos com custo de operação reduzido, pois o método empregado, inevitavelmente, viabilizará o uso de fontes energéticas alternativas e, dependendo dos futuros desenvolvimentos, a obtenção de um processo autossustentável de secagem e higienização de lodo.

Por fim, conclui-se que o presente trabalho foi além da modelagem termodinâmica de um cenário específico, o mesmo agregou e interagiu, em um único modelo, as interfaces térmicas, energéticas e ambientais do processo de secagem de lodo em baixas temperaturas. Levando para à luz da ciência uma nova teoria que, possivelmente, permitirá o desenvolvimento de tecnologias que atualizarão os tradicionais secadores mecânicos de lodo, tornando-os mais eficientes e viáveis energeticamente, além de ir ao encontro dos princípios da sustentabilidade, que abrangem soluções viáveis economicamente, corretas ecologicamente e justa socialmente.

6.1 FUTURAS PESQUISAS

Para as próximas pesquisas ligadas a secagem térmica de lodo, principalmente para as que estiverem ligadas com a teoria de secagem e higienização em baixas temperaturas, recomenda-se:

- Avaliar em escala piloto a secagem e higienização de lodo biológico por ar aquecido em baixas temperaturas, comparando os resultados obtidos entre o teste e o presente modelo;
- Ainda em escala piloto, avaliar a secagem em função do tempo de exposição e temperatura do ar, determinando o tempo e a quantidade de água evaporada, além de determinar se a parcela intracelular é passível de evaporação pelo método proposto no modelo;
- Estudar, por meio da termoeconomia, a concepção otimizada do trocador de calor regenerativo entre o lodo úmido e o ar de saída do reator, além do trocador de calor entre o ar de secagem e o ar da fonte térmica.
- Identificar e modelar novos cenários de aproveitamento de energia térmica de sopradores, sem a etapa de regeneração entre o ar no estado 2 e o lodo seco no estado 5, para gerar informações em quantidade e qualidade suficientes para uma análise estatística da capacidade de secagem de lodo a partir das características de tratamento das estações de Lodo Ativado, possibilitando a geração de indicadores;
- Desenvolver o presente modelo termodinâmico para modelar a secagem de lodo com a recirculação do ar, avaliando o aumento do rendimento do sistema;
- Estimar, com base num projeto básico, a demanda e consumo de energia externa para a operação de uma planta de secagem de lodo em baixa temperatura, considerando na estimativa o soprador de ar do MTSL, misturador de lodo e demais equipamentos envolvidos no transporte e processamento do material;
- Buscar novas fontes de energia térmica, renováveis ou aproveitadas, para modelar a secagem de lodo biológico em diferentes condições;

7 REFERÊNCIAS

- 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.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI C.; TELES C. R.; CARNEIRO C.; FERNADES F. **Higienização do Lodo de Esgoto. In: Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final / Cleverson Vitório Andreoli (coordenador)**. – Rio de Janeiro : RiMa, ABES, 2001. P 87 – 116.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; CHERUBINI, C.; BERNET, P. M.; FAVARIN, F.; CASTRO, L. R. **Avaliação da eficiência do uso de estufa plástica, revolvimento de lodo e injeção de calor na secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem**. IX SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Porto Seguro, Bahia, 2000. 10 p.
- ANDREOLI, C.V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Projeto PROSAB 2. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p.
- SEGHERS KÉPPEL, **Manual de Operação e Manutenção o Sistema UNITANK**. Vitória, 2003. 1298 p.
- 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.

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.

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.

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.

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.

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.

CHERNICHARO, C. A. L; BORGES, E. S. M; GODINHO, V. M; BEJAR, D. O. **Tratamento Térmico de Lodo Anaeróbio com Utilização do Biogás gerado em Reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental: v.14, n.3, jul/set 2009. p. 337 - 346.

COMPANHIA ESPÍRITO SANTENSE DE SANEAMENTO BÁSICO. **Relatórios de Monitoramento e Desempenho:** Monitoramento físico-químico e microbiológico do sistema Araçás. Vitória: CESAN, 2015. CD-ROM.

CORRÊA, Rodrigo Studart; WHITE, Robert E.; WEATHERLEY, Anthony J. **Biosolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content** - Sci. agric. (Piracicaba, Braz.) vol.62 no.3 Piracicaba May/June 2005 - *Online 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.

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, Airton Checoni; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **SECAGEM TÉRMICA DE BIOSÓLIDOS 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

Dincer, I.; Sahin, AZ., **A new model for thermodynamic analysis of a drying process**, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47 (4), 2004, p. 645–52.

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.

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. Joinvile, set., 2003.

FERREIRA, A.G.; GONÇALVES, L. M.; MAIA, C.B.; **Solar drying of a solid waste from steel wire industry,** Applied Thermal Engineering, vol. 73, 2014, p. 104-110.

FLIR. **Manual do Utilizador.** Publicação nº T559591, rev. a486, 2010.

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.

GONÇALVES, Ricardo Franci (Coordenador). **Gerenciamento do Lodo de Lagoas de Estabilização não Mecanizadas.** Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 1999. 64 p.

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.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** Rio de Janeiro: ABES, 2011. 6ª Edição. 969 p.

JIMÉNEZ, B. **Helminth ova control in sludge: a review.** Water Science and Technology, v.56, n.9, p.147-155, 2007.

SALIHOGU, N.K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G., **Solar drying in sludge management in Turkey**, Renewable Energy, vol. 32, 2007, p. 1661–1675.

LEE, Erich Shen Higa; SANTOS, Francisco José. **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.

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.

LIRA, Ana Cláudia Silva; GUEDES, Marcelino Carneiro; SCHALCH, Valdir. **Reciclagem de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: Carbono e nitrogênio**. Eng. Sanit. Ambient. vol.13 no.2 Rio de Janeiro Apr./June 2008.

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.

LOUARN, S. *et al.*, **Experimental and Numerical Study of Flat Plate Sludge Drying at Low Temperature by Convection and Direct Conduction**, Drying Technology: An International Journal, 2014.

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.

MARCHIORO, Eberval. **A Incidência de Frentes Frias no Município de Vitória (ES)**. Revista ACTA Geografia. Ed. Especial, 2012. 49-60 p. ISSN 1980-5772 DOI: 10.5654.

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.

MITSDOERFFER, Ralf; CHRIST, Oliver. **Economia de energia em estações de tratamento de esgoto**. Rio de Janeiro. Revista Hydro, Aranda Editora, Ano III, Nº 30, p. 22-33, Abril de 2009.

MORAN, Michael. J; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 819 p.

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.

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.

OMEL, Bombas e Compressores LTDA. **Sopradores Rotativos de Deslocamento Positivo SRT** – Tipo ROOTS. Guarulhos, São Paulo. 7 p. Disponível em: <http://www.logismarket.ind.br/ip/omel-soprador-trilobular-de-deslocamento-positivo-soprador-trilobular-de-deslocamento-positivo-srt-577577.pdf> . Acessado em 03 abr. 2014.

OMEL, Bombas e Compressores LTDA. **SRT** - Sopradores Trilobados de Deslocamento Positivo. Guarulhos, São Paulo. 2012. 14 p. Disponível em: www.omel.com.br/cms-lang/wp-content/uploads/2012/01/Catalogo_soprador_trilobular_SRT.pdf. Acessado em 03 abr. 2014.

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: Federação 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.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H.. **Manual de Engenharia Química.** 5ª ed. UFRJ, editora Guanabara Dois, 1980.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto.** Jaguariuna: EMBRAPA Meio Ambiente, cap.8, p.163-178, 2000.

PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. **Relatório de resultados do Procel 2005 - ano base 2004.** Rio de Janeiro, 2011b.

PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO AMBIENTAL - PROCEL **SANEAR.** Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/ELB/main.asp?TeamID=%7B17B0348E-BC5F-44B2-8FB4-6A9BEEF33020%7D#>>. Acesso em: 11 out. 2014.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamentos e Aplicações.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013. 404 p.

SERENOTTI, Fernando. **A avaliação da secagem para redução de volume e inativação de microrganismos em lodo de ete.** 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.

SILVA, R. F. da. **Compostagem e solarização para higienização de lodo de esgoto e uso no cultivo de cássia amarela (Senna siamea Lam).** 2007. Tese

(Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil. Recife, PE.

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.

STASTA, P., *et al.*, **Thermal processing of sewage sludge**, Applied Thermal Engineering, vol. 26, 2006, p.1420–1426.

TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F. e STENSEL D. **Wastewater engineering: Treatment and Reuse.** 4^a ed. Metcalf & Eddy Inc. New York: Mcgraw-Hill, 2003. 1819 p.

TSUTIYA, M T. **Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos.** In: BETTIOL, W.;CAMARGO O. A.(Ed.) Impacto Ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. EMBRAPA Meio Ambiente. Jaguariúna, SP, 2000. cap. 4.

TSUTIYA, M T. **Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos.** In: Biossólidos na agricultura. Capítulo 4. Sabesp, Escola Politecnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabel. São Paulo, 2001.

TUNCAL, T., USLU, O., **A Review of Dehydration of Various Industrial Sludges**, Drying Technology, vol. 32, 2014, p. 1642-1654.

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.

VERDA, V., SERRA, L. VALERO, A., **The Effects of the Control System on the Thermoeconomic Diagnosis of a Power Plant.** Energy Vol. 29, 2004, p. 331- 359.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions.** IWA Publishing, London, 2005. 1452 p.

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.