

II-105 - SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO DE LODO COM APROVEITAMENTO DA ENERGIA TÉRMICA DE BAIXA TEMPERATURA DOS SOPRADORES DE AR DE UMA ETE DO TIPO LODOS ATIVADOS

M.Sc Zudivan Peterli⁽¹⁾, D.Ing Ricardo Franci Gonçalves⁽²⁾ e D.Sc José Joaquim C. S. Santos⁽³⁾

(1) Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Mestrado em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Especialização em Química Industrial pela Faculdade Espírito Santense (FAESA). Tecnologia em Saneamento Ambiental e Técnico em Metalurgia, ambos pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES);

(2) Doutorado em Engenharia do Tratamento de Águas pelo *Institut National Des Sciences Appliquées Toulouse* (INSA-França). Mestrado em *Dea Sciences Et Techniques de L'environnement* pela *Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées* (ENPC-França). Especialização em Engenharia de Saúde Pública pela Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP-Brasil). Engenharia Civil com ênfase em Sanitária e Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ);

(3) Doutorado, Mestrado e Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Endereço:

(1) Avenida Dr. Pedro Feu Rosa, 34, 401, Jardim da Penha, Vitória, Espírito Santo, CEP 29060-730. E-mail: zpeterli@gmail.com.

(2) Departamento de Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910, Vitória, ES, Brazil.

(3) Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910, Vitória, ES, Brazil

RESUMO

Os secadores mecânicos são equipamentos que permitem secar e higienizar com elevadas taxas o lodo biológico e produzir um biossólido de considerável valor agregado, mas continuam atrelados a um alto consumo de energia para a sua operação. O presente trabalho avaliou a viabilidade termodinâmica para a secagem de lodo de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) do tipo Lodo Ativado a partir da energia térmica de baixa temperatura aproveitada do ar do sistema de aeração da própria estação estudada. As condições modeladas previam a secagem de 28.904 kg.d⁻¹ de lodo úmido com 25% de sólidos totais (ST). Os resultados mostraram que o local de maior temperatura na descarga dos sopradores de ar foram na região próxima as válvulas de retenção e alívio, registrando temperatura média de 112°C; enquanto os balanços de massa e energia indicaram que é possível, para as condições de projeto da estação de tratamento estudada, secar aproximadamente 59% do lodo produzido até alcançar 90% de ST e 80°C ou secar 100% do lodo até alcançar 90% de ST e 40°C. O modelo termodinâmico de secagem de lodo (MTSL) que foi desenvolvido para esse estudo se mostrou consistente para avaliar a secagem de lodo biológico a partir do aproveitamento de energia térmica de baixa temperatura. Para a higienização do lodo, baseado na literatura técnica da área, entende-se que o aproveitamento da energia térmica dos sopradores resultaria na completa higienização do lodo sanitário no cenário 1 (80°C), mas possivelmente não resultaria na completa higienização no cenário 2 devido a necessidade de elevado tempo de exposição para alcançar a higienização na temperatura de 40°C, condição destoante do MTSL desenvolvido que teve como base um secador do tipo soleiras múltiplas que busca utilizar altas taxas de secagem e mínima ocupação de área.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo Ativado, Soprador de ar, Secagem de lodo, secagem em baixa temperatura, Modelo termodinâmico.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento de lodo em estações de tratamento de esgoto (ETE) é um problema que vem se agravando ao longo do tempo em decorrência do incremento na sua produção e elevados níveis de qualidade que são exigidos para a sua destinação (MA *et al.*, 2014; ZHEN *et al.*, 2015). A dificuldade para determinar o melhor e mais eficiente tratamento para o lodo vem esbarrando na grande diversidade de características que o mesmo

possui, além das inúmeras possibilidades para a destinação final do material tratado. Por exemplo, 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.

Para Cano *et al.* (2015), no aspecto termodinâmico e numa visão simplificada, a matéria orgânica presente no esgoto, e por sua vez no lodo gerado, pode ser considerada como uma fonte de energia ao ser observado o potencial presente nas suas ligações químicas. Andreoli (2006) relata que o lodo de esgoto pode ser usado como combustível nos processos industriais, pois o poder calorífico da fração volátil do lodo seco pode chegar até $11.880 \text{ kJ.kg}^{-1}$, semelhante ao da lenha.

Para Bidart *et al.* (2014), Zhen *et al.* (2015) e Zhao *et al.* (2014) o uso do lodo como combustível tem ganhado grande amplitude e importância em virtude das discussões internacionais sobre o quadro ambiental do planeta e a crise energética que vem se refletindo, principalmente, nos constantes acréscimos nos valores da energia, cenário que reforça a importância de desenvolver tecnologias sustentáveis que permitam obter energia por processos mais limpos e de menor impacto. Também é notável a ideia de que a produção de energia a partir do lodo colabora para reduzir a demanda primária de energia para o seu próprio tratamento, haja vista que o custo para o tratamento do lodo pode variar, dependendo do tipo e tecnologia empregada, de 20-60% do custo operacional de uma ETE (SIDDIQUEE, ROHANI, 2011).

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. A secagem térmica apresenta um consumo superior aos métodos tradicionais de tratamento, no entanto, esta técnica continua sendo um dos processos mais eficientes e flexíveis para reduzir o teor de umidade e higienizar lodos, além de produzir biossólidos que podem ser facilmente manipulados, armazenados e reciclados (ANDREOLI, BONNET, 2000; BORGES *et al.*, 2009; BENNAMOUN *et al.*, 2013).

Ensaios realizados para higienizar lodo biológico obtiveram resultados satisfatórios a partir de 60°C e com vários tempos de exposição (ANDREOLI, BONNET, 2000; BORGES *et al.*, 2009; ARCE, 2009). Entretanto, grande demanda energética ocorre durante o processo de secagem, haja vista que a quantidade de líquido presente no lodo e a entalpia de vaporização da água são elevadas, contexto que revela, segundo Hong *et al.* (2013), o alto custo para o tratamento térmico e a necessidade imperativa de desenvolver secadores energeticamente mais eficientes.

Entre os grandes consumidores de energia nas ETE do tipo Lodo Ativado, destacam-se os sistemas de aeração que são responsáveis pela transferência de oxigênio e agitação mecânica da biomassa presente nos reatores. Segundo os estudos conduzidos por Panepinto *et al.* (2016), além de Mitsdoerffer e Christ (2009), a aeração representa o maior consumo de energia elétrica numa estação do tipo Lodo Ativado, tornando-se, usualmente, o insumo de maior custo na unidade. A aeração no sistema de Lodo Ativado é realizada, basicamente, por aeradores superficiais ou sistema de ar difuso, sendo o último o de maior eficiência energética em comparação ao primeiro método.

Apesar dos grandes avanços tecnológicos que os equipamentos eletromecânicos alcançaram no decorrer das décadas, as irreversibilidades e perdas energéticas continuam significativas quando comparadas à quantidade de energia útil utilizada para realizar o trabalho. Neste contexto, apesar da boa eficiência da aeração dos sistemas por ar difuso, essa afirmação recai sobre o aspecto da transferência de oxigênio, pois o mecanismo de aeração (soprador) continua limitado à típica eficiência dos equipamentos eletromecânicos.

Adentrando sobre o tema das perdas energéticas nos equipamentos de aeração, elas ocorrem de diversas maneiras. Por exemplo, no sistema de aeração por ar difuso o ar soprado é produzido por um 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 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, em torno de 60% é rejeitada na forma de calor. No caso dos sopradores de ar, presentes em sistemas de aeração de ETE, a descarga de ar pode alcançar vazões na ordem de $7,08 \text{ Nm}^3/\text{s}$ e variações de temperatura de até 110°C em

relação ao ambiente, gerando grande dissipação de calor e necessitando, para algumas aplicações, de resfriamento forçado (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2003; OMEL, 2014).

O desenvolvimento de novas tecnologias pode permitir a recuperação de parcela das perdas energéticas dos equipamentos, 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. Para Defraeye (2014), Mäkelä *et al.* (2014) e Tanczuk *et al.* (2016) as novas tecnologias de secagem devem visar a eficiência energética, emprego de energias renováveis e aproveitamento de calor residual que é dissipado de outros processos produtivos, principalmente nos ambientes industriais, colaborando para o surgimento de secadores híbridos, combinando combustíveis fósseis e renováveis, ou plenamente renováveis.

Diante do exposto, a possibilidade de recuperar a energia térmica perdida em equipamentos deve ser estudada com o objetivo de secar lodos de diversas origens, trazendo à luz do conhecimento uma tecnologia para o tratamento deste material que vai ao encontro dos princípios da sustentabilidade, abrangendo soluções viáveis economicamente, corretas ecologicamente e justas socialmente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Delineamento do estudo

A avaliação da secagem foi realizada por meio de um modelo termodinâmico de secagem de lodo (MTSL) que foi desenvolvido especificamente para este estudo e tem o objetivo 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 realizado na ETE Araçás, localizada no município de Vila Velha, estado do Espírito Santo, Brasil. A unidade possui configuração do tipo Lodo Ativado e vazão média de projeto para tratar 400 L.s⁻¹ de esgoto sanitário.

Medições de campo

A termográfica foi realizada com o auxílio de uma câmera termográfica, modelo *Box 3* e marca *Flir Systems*, enquanto 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, escala de medição de temperatura em graus Celsius e Fahrenheit, faixa de leitura de -50 até 300°C (-58 até 572°F) e precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ para a primeira escala.

As medições de temperatura com o termômetro foram realizadas em dois locais: Ar ambiente dos sopradores (parte interna do galpão dos sopradores), local que ocorre a sucção de ar dos equipamentos e; descarga de ar do soprador, 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, contato indireto e fluxo contracorrente.

A medição de temperatura na descarga de ar dos sopradores foi realizada com o acoplamento do termômetro na lateral da tubulação de descarga do soprador da ETE Araçás. Para facilitar a instalação e evitar perdas de ar na descarga do equipamento, o termômetro foi instalado de forma acoplada a um tampão que teve o seu centro perfurado 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, conforme mostra a Figura 1.



Figura 1: Detalhe da adaptação do termômetro na descarga do soprador de ar.

Considerações sobre o MTSL

O MTSL é constituído em sua base por balanços de massa e energia entre o ar de secagem e o lodo úmido. No caso específico deste trabalho, a fonte quente que aquece o ar de secagem é o ar da descarga dos sopradores da ETE Araçás, enquanto o lodo úmido estudado tem origem no sistema de centrifugação da própria estação.

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 ar utilizado para a secagem do lodo (ar de secagem), enquanto o segundo é o lodo originado no processo de centrifugação da estação estudada (lodo úmido). Foi considerado que o ar de secagem é proveniente do interior do galpão dos sopradores da ETE Araçás e a geração do seu fluxo é realizada por um soprador teórico (soprador do MTSL) que estaria instalado no próprio galpão. A Figura 2 ilustra o fluxograma do modelo desenvolvido.

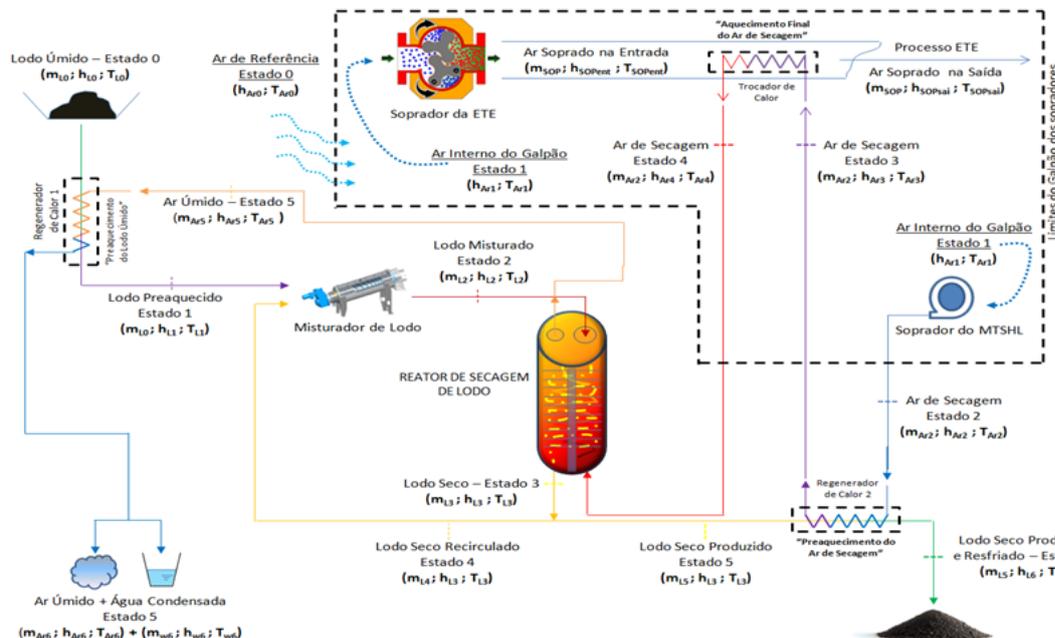


Figura 2: Fluxograma das etapas previstas no MTSL.

Equacionamento do MTSL

O equação empregado no MTSL pode ser subdividido em quatro tipos de balanços de massa e energia, conforme será apresentado a seguir.

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DO LODO

Considerando o lodo como uma mistura de matéria seca e água líquida, o balanço de massa e energia foi estimado para cada parcela, pois as quantidades presentes no lodo úmido e as entalpias das parcelas são distintas entre si.

Como a água líquida é um fluido com estudos consolidados para os diversos estados encontrados no ambiente, os seus dados foram obtidos diretamente do *software* termodinâmico *Steam Table*®, na sua versão livre, que opera como suplemento do programa *Microsoft Office Excel*®.

A entalpia da massa seca do lodo foi obtida pela Equação 1 que é uma forma de integração polinomial que foi adaptada a partir 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 (T_0) até a temperatura do ponto avaliado, resultando numa entalpia em kJ.kg^{-1} .

$$\Delta h_{L_{seco}} = \frac{1}{10^3} \int_{T_0}^{T_1} (c_{pL_{seco}}) dT = \frac{1}{10^3} \int_{T_0}^{T_1} (1434 + 3,29T_0) dT \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

$\Delta h_{L_{seco}}$: Variação de entalpia específica em base seca do estado 0 ao estado 1 $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$;

$c_{pL_{seco}}$: Calor específico a pressão constante do lodo seco $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$;

T_0 : Temperatura do lodo úmido na referência ($^\circ\text{C}$);

T_1 : Temperatura do lodo no estado 1 ($^\circ\text{C}$).

O teor de sólidos e a vazão de referência do lodo úmido ao entrar no MTSL foram de, respectivamente, 25% de ST e 28.904 kg.d^{-1} , valor baseado no manual de operação e manutenção da ETE Araçás.

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DO AR

A entalpia específica do ar foi determinada para cada componente presente na mistura em função da variação de temperatura em relação a referência (T_{Ar0}), conforme mostra a Equação 2. Tal equacionamento foi descrito por Lozano e Valero (1986) durante o estudo da determinação de exergia em substâncias de interesse industrial e adaptada para este estudo, permitindo a determinação da entalpia específica em intervalos de temperatura de 273 a 1.800 Kelvin (K).

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

Sendo:

h_{Ar1} : Entalpia específica do ar no estado 1 $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$;

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

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

T_{Ar0} : Temperatura no estado 0 ou de referência do ar (K);

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

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

A entalpia específica é expressa em $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ e as constantes necessárias, bem como as frações consideradas na mistura gasosa, foram descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Componentes e constantes empregadas.

X	Componente	Constantes (kcal/kmol)				Fração Molar	Massa Molecular
		A	$B \times 10^2$	$C \times 10^5$	$D \times 10^9$	%	Kg/kmol
1	N2	6,903	-0,03753	0,1930	-0,6861	78,09	28,013
2	O2	6,085	0,36310	-0,1709	0,3133	20,95	31,999
3	CO2	5,316	1,42850	-0,8362	1,7840	0,03	44,010
4	Ar*	4,964	-	-	-	0,93	39,948
5	H2O	7,700	0,04594	0,2521	-0,8587	0,00	18,016

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

As condições que foram consideradas como referência para o trabalho foram de $24,9^\circ\text{C}$ para a temperatura, 78% para a umidade relativa (UR) e 1,013 bar para a pressão atmosférica. Tais dados são baseados no levantamento histórico de Correa (2011) e Marchioro (2012) sobre a cidade de Vitória, município vizinho da ETE Araçás. Tal consideração foi realizada porque não foi encontrado para a cidade de Vila Velha uma estação climatológica com dados históricos, enquanto a cidade de Vitória possui a referida estação e apresenta as características climáticas semelhantes ao de Vila Velha, permitindo a consideração das referidas médias de temperatura, umidade e pressão para o presente trabalho.

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DOS REGENERADORES DE CALOR

Trocadores de calor do tipo regeneradores, empregados para recuperar energia e aproveitar no próprio sistema, foram modelados para regenerar energia no MTSL, sendo considerado para a modelagem que os trocadores de calor são do tipo contracorrente, contato indireto e segue o método da efetividade-NUT ou ε -NUT, método esse relatada por Incropera *et al.* (2014) e que apresenta o racional descrito pela Equação 3.

$$Q = \varepsilon C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

Q : Quantidade de calor trocado entre as fontes/fluxos ($\frac{\text{kJ}}{\text{s}}$; kW);

ε : Efetividade do método ε -NUT (adimensional);

C_{\min} : Menor capacidade térmica das fontes/fluxos ($\frac{\text{kJ}}{\text{s}\cdot^\circ\text{C}}$; $\frac{\text{kW}}{^\circ\text{C}}$)

$T_{q,ent}$: Temperatura da fonte quente na entrada ($^\circ\text{C}$);

$T_{f,ent}$: Temperatura da fonte fria na entrada ($^\circ\text{C}$).

A efetividade aplicada neste trabalho foi de 0,8 – valor intermediário e condizente com as típicas efetividades encontradas e que variaram entre 0,6 e 0,8 em Cerqueira (1999), além de Moran e Shapiro(2014).

Eficiência Isentrópica

A temperatura de descarga do soprador do MTSL, considerado para gerar o fluxo de ar de secagem, teve a temperatura de descarga estimada com base na eficiência isentrópica de compressores de ar que pode ser calculada pelas equações 4 e 5 que foram apresentadas por Moran e Shapiro (2014).

$$\frac{T_{IS}}{T_{Ar1}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo:

T_{IS} : Temperatura isentrópica do ar na descarga do soprador do MTSL ($^\circ\text{C}$);

T_{Ar1} : Temperatura do ar no estado 1 ou na entrada do soprador do MTSL ($^\circ\text{C}$);

p_1 : Pressão de entrada do soprador do MTSL (bar);
 p_2 : Pressão de saída do soprador do MTSL (bar);
 k : Constante em base na temperatura de entrada do ar (adimensional).

$$\eta_{is} = \frac{T_{IS} - T_{Ar1}}{T_{Ar2} - T_{Ar1}} \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo:

η_{is} : Eficiência isentrópica (adimensional);
 T_{Ar2} : Temperatura do ar de secagem na saída do soprador do MTSL (°C).

A constante k para ar (mistura gasosa) trabalhando na temperatura de 300 Kelvin (26,85°C) é de 1,4 – sendo esse o valor utilizado na Equação 5 (WARK, 1983, *apud* MORAN, SHAPIRO, 2014). Enquanto a eficiência isentrópica considerada neste trabalho foi de 80%, representando um valor intermediário da faixa de trabalho considerada pelos autores Moran e Shapiro (2014) para compressores de ar.

Para a pressão de saída, foi considerado, com base no estudo realizado por Cerqueira (1999), que seria a pressão atmosférica (entrada do soprador) acrescida com a perda de carga de 2,5% para cada trocador de calor, além de uma perda de carga de 10% para o secador. Não foram encontrados na literatura valores de perdas de carga para secadores de lodo do tipo soleiras múltiplas, desta forma, foi empregado uma perda de carga elevada para a segurança da modelagem.

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA DO SECADOR

O secador considerado no MTSL apresenta a configuração de um secador de soleiras múltiplas de contato direto e fluxo contracorrente. Este balanço considerou as seguintes premissas e condições para a modelagem:

- Processo adiabático, sendo o reator um volume de controle em regime permanente;
- O tempo de detenção do ar no secador foi suficiente para transferir apenas a vazão mássica de água que foi prevista para evaporar, desde que a umidade relativa do ar de secagem não estivesse na condição de saturada;
- A energia necessária para a evaporação da água presente no lodo misturado é, invariavelmente, proveniente do ar de secagem que entra no reator;
 - 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 das premissas adotadas, foi considerado que a somatória das taxas de energia de entrada são iguais a somatória das taxas de energia de saída do reator, conforme descreve a Equação 6.

$$H_{L2} + H_{Ar4} = H_{L3} + H_{Ar5} \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

H_{L2} : Taxa de energia do lodo úmido na entrada do secador ($\frac{kJ}{s}$; kW);
 H_{Ar4} : Taxa de energia do ar de secagem na entrada do secador ($\frac{kJ}{s}$; kW);
 H_{L3} : Taxa de energia do lodo na saída do secador ($\frac{kJ}{s}$; kW);
 H_{Ar5} : Taxa de energia do ar de secagem na saída do secador ($\frac{kJ}{s}$; kW).

Índice Térmico do Secador (ITS)

A temperatura do ar na saída do secador foi empregada para avaliar a capacidade de secagem de lodo pela fonte quente no MTSL, pois a referida temperatura deve ficar entre a temperatura do ar e do lodo na entrada do secador. Desta forma, foi desenvolvido o Índice Térmico do Secador (ITS) que faz referência na relação entre a temperatura do lodo na entrada (estado 2) e o ar na saída (estado 5), conforme é descrito na Equação 7.

$$ITS = \frac{T_{L2}}{T_{Ar5}} \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo:

ITS: Índice Térmico do Secador (adimensional);

T_{L2}: Temperatura do lodo na entrada do secador (°C);

T_{Ar5}: Temperatura do ar na saída do secador (°C).

Os valores do ITS devem variar entre 0 e 1 para a modelagem ser consistente, valendo a interpretação que valores tendendo a 1 (pela esquerda) o processo ocorre próximo ao limite térmico da secagem. Enquanto para valores superiores a 1 o processo não é viável termodinamicamente, pois as temperaturas terminais (lodo de entrada e ar de saída) ultrapassaram os limites máximos permitidos nas condições modeladas ($T_{Ar5}=T_{L2}$).

Índice Energético do Secador (IES)

Trocadores de calor de contato indireto apresentam a propriedade da efetividade para indicar a parcela de energia que foi transferida 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 modeladas.

O IES representa a parcela de energia que foi utilizada para realizar a secagem do lodo no interior do secador com referência a quantidade de energia disponível pelo ar para a secagem quando o secador opera na capacidade máxima ($T_{Ar5}=T_{L2}$), conforme mostra a Equação 8.

$$IES = \frac{T_{Ar4}-T_{Ar5}}{T_{Ar4}-T_{L2}} \quad \text{Equação (8)}$$

Sendo:

IES: Índice Energético do Secador (adimensional).

T_{L2}: Temperatura de entrada do lodo no secador (°C);

T_{Ar4}: Temperatura do ar na entrada do secador (°C);

T_{Ar5}: Temperatura do ar na saída do secador (°C).

O índice deve apresentar, semelhante ao ITS, valores variando de 0 a 1 e a avaliação de valores extremos pode ser realizada da seguinte forma:

- IES \approx 0: significa que a quantidade de energia disponibilizada para realizar a secagem é muito superior a demandada pelo lodo, indicando que a taxa de energia aplicada é excessiva e o processo opera com grande folga termodinâmica.
- 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 utilizou a máxima capacidade em relação à energia disponível no reator ou alcançou o limite da viabilidade termodinâmica do sistema.
- IES $>$ 1: significa que existe um déficit de energia para satisfazer a demanda energética para a secagem do lodo nas condições definidas da modelagem, indicando que o lodo não apresentará a temperatura e/ou umidade desejada na saída do secador, da mesma forma que os dados gerados não são consistentes termodinamicamente.

CONDIÇÕES DE TESTES

Foram propostos 2 cenários para testes, sendo a vazão mássica de lodo submetida à secagem a variável do cenário 1 e a vazão mássica de ar no soprador do MTSL a variável para o teste 2, para este último cenário foi considerado que a secagem seria realizada para 100% do lodo produzido na estação.

A capacidade máxima e o ponto ótimo termodinâmico foram identificados em função do Índice Térmico do Secador (ITS) e do Índice Energético do Secador (IES), conforme é descrito na Figura 3. A otimização para alcançar o ponto ótimo foi obtido pelo empregado da ferramenta *Solver* do *Software Microsoft Excel*®.

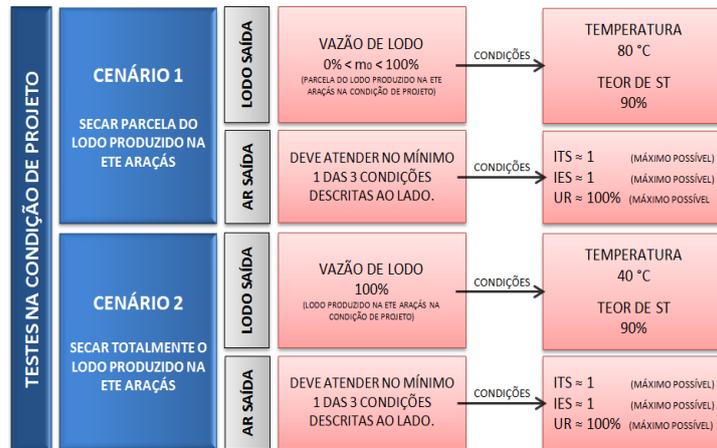


Figura 3: Testes de cenários propostos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MONITORAMENTO DOS SOPRADORES

A termografia revelou que os pontos de maior temperatura estavam localizados na descarga de ar dos sopradores, principalmente nas proximidades das válvulas de alívio e segurança, localizadas entre o soprador e o barrilete do sistema de aeração, conforme ilustra a Figura 4 na condição de 1 soprador em operação. Diante da avaliação realizada, foi definido que o ponto de medição de temperatura com o termômetro de haste seria entre as válvulas de retenção e alívio.

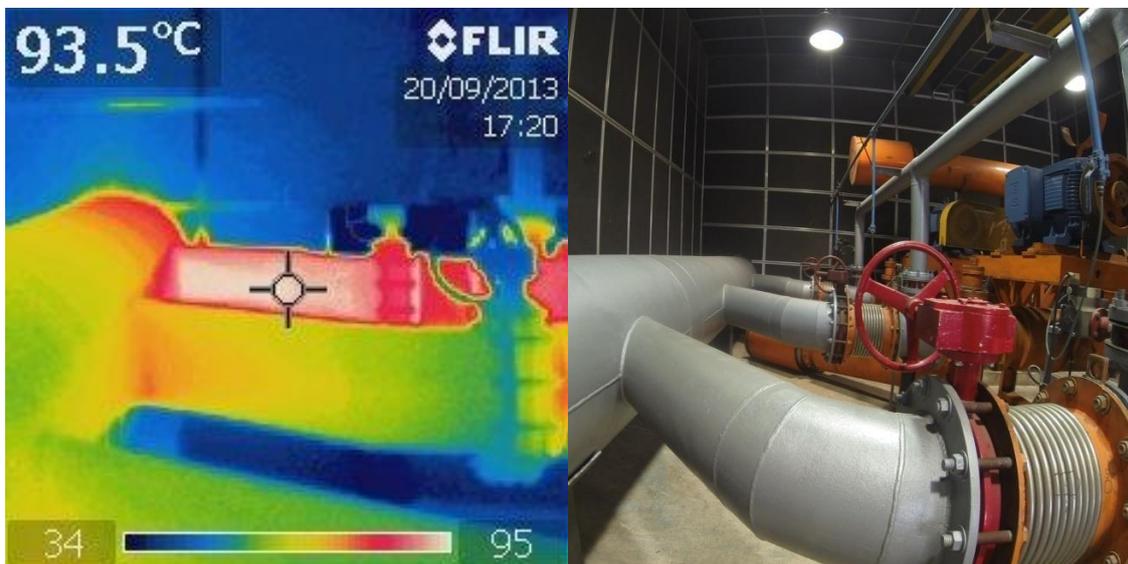


Figura 4: Termografia da descarga de ar a esquerda e a imagem original a direita.

Os resultados do monitoramento de temperatura na descarga do soprador e no interior do galpão estão retratados na Figura 5, enquanto os valores de mínima, máxima, média geométrica e desvio padrão das temperaturas monitoradas estão na Tabela 2.

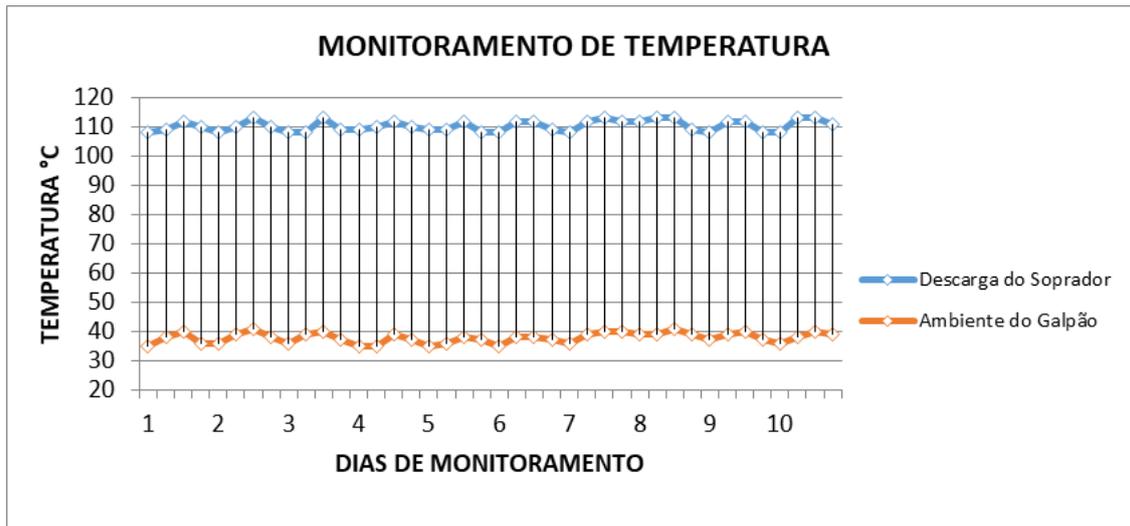


Figura 5: Distribuição das temperaturas monitoradas.

Tabela 2: Monitoramento de temperatura.

LOCAL	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
Descarga do Soprador (°C)	110	112	113	1,93
Ambiente do Galpão (°C)	35	38	41	1,79
Gradiente Térmico (°C)	75	74	75	-

As medições termográficas evidenciaram apenas a temperatura superficial da tubulação de aço carbono da descarga dos sopradores, sendo que a medição com o termômetro de haste permitiu visualizar o verdadeiro perfil de temperatura existente do ar descarregado pelo equipamento.

Considerando a temperatura média de 24,9°C para o ar atmosférico externo ao galpão dos sopradores (temperatura de referência), a variação de temperatura foi de 13,1°C em relação ao ambiente interno. Tal variação é plausível em virtude do galpão dos sopradores apresentar revestimento interno, de caráter acústico, em toda a área superficial das paredes e teto, resultando, em virtude da dissipação de calor dos equipamentos eletromecânicos em operação, no aumento da temperatura média do ar.

A temperatura do ar na descarga dos sopradores apresentou variação proporcional ao do ar ambiente do galpão na maioria dos dias monitorados. 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 do equipamento em operação. 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% da velocidade máxima, conforme pode ser avaliado pelo diagrama da variação de temperatura do ar de saída dos sopradores da fabricante OMEL (2012) que é apresentado na Figura 6.

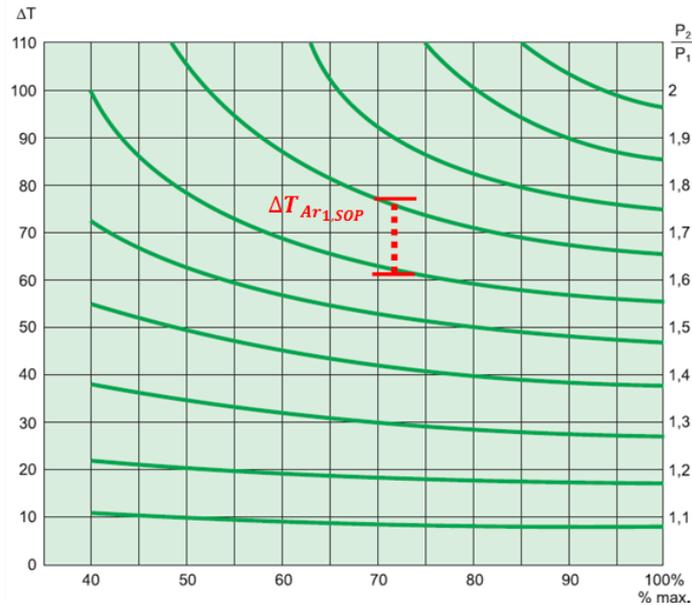


Figura 6: Diagrama da variação de temperatura dos sopradores de deslocamento positivo da fabricante OMEL.

RESULTADOS DO MTSL

Cenário 1

O MTSL demonstrou que, no cenário 1, seria possível secar, aproximadamente, 59% de todo o lodo produzido na ETE Araçás, conforme mostra a Figura 7a ao analisar o IES e ITS para o ponto que o processo se torna viável termodinamicamente (próximo a 1).

O teste do cenário 1 foi realizado para a vazão de ar de $8,55 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ na entrada do secador, gerando vazões de saída de $8,70 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ em virtude da adição de água evaporada. Para a secagem de 59% de lodo, foram empregadas outras vazões de ar, mas sem melhoras de desempenho, conforme é visualizado na Figura 7b.

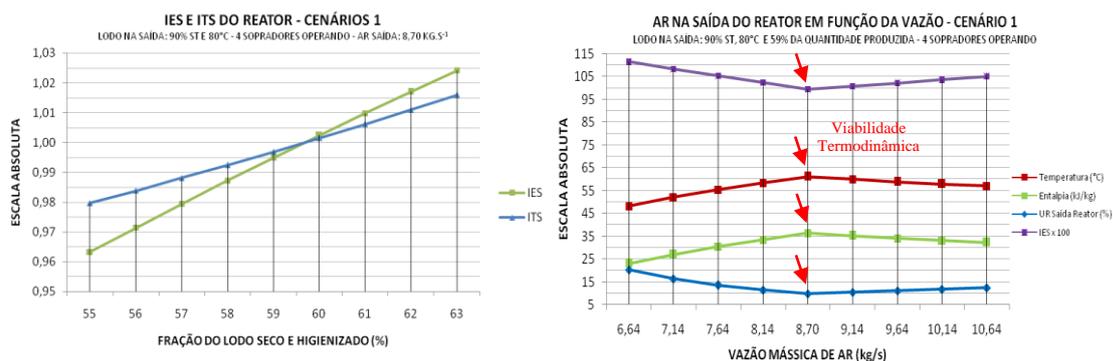


Figura 7a e 7b: A esquerda a variação do IES e ITS do secador em função da variação da fração de lodo (7a) e a direita a variação dos parâmetros de controle em função do ar na saída do secador (7b).

Cenário 2

A secagem de toda a produção de lodo da ETE Araçás (cenário 2) apresentou viabilidade termodinâmica a partir do momento que a vazão de ar na saída do reator alcançou $12,84 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, conforme mostra a Figura 8a.

Para o cenário 2, quanto maior a vazão de ar aplicada na entrada do secador, maior a viabilidade termodinâmica da secagem, conforme pode ser observado na Figura 8b pela redução significativa do IES e ITS ao longo do

incremento de vazão de ar. Desta forma, não foi encontrado um ponto ótimo para a operação do sistema para as vazões modeladas neste cenário.

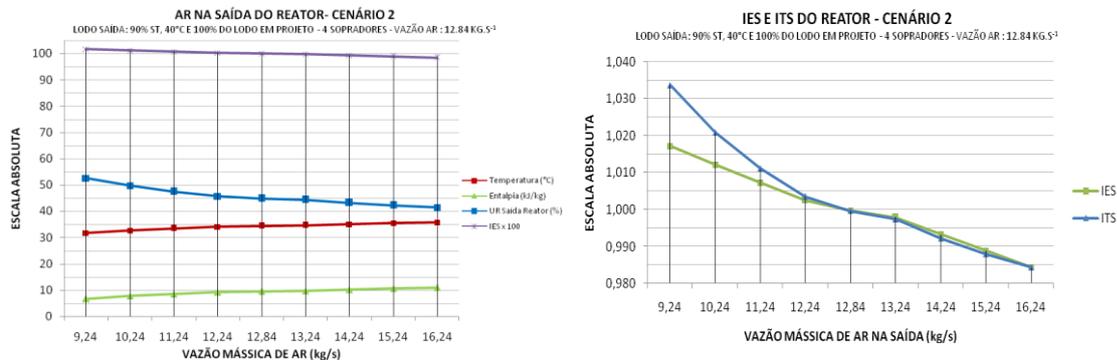


Figura 8a e 8b: A esquerda a variação das propriedades do ar na saída do secador (8a) e a direita a variação do IES e ITS do secador, ambos em função da vazão de ar de saída (8b).

CONSIDERAÇÕES SOBRE A SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO EM BAIXA TEMPERATURA

A viabilidade termodinâmica para a secagem do lodo produzido na ETE Araçás foi comprovada durante os testes, apresentando, ainda, um forte indício da viabilidade do processo para a escala real quando comparados com os resultados encontrados na literatura para processos similares de secagem em baixas temperaturas, 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, 35,0%;
- 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 em relação a temperatura ambiente;
- Makela *et al.* (2014) operaram um secador do tipo ciclone processando lodo proveniente de uma fábrica de papel e celulose em temperaturas de operação inferiores aos 90°C e obtendo teores de ST de 60-70%;
- Gill *et al.* (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 máximas de 20°C acima da ambiente.

Para o processo de higienização, utilizando as experiências presentes na literatura técnica da área (ANDREOLI, BONNET, 2000; ARCE, 2009, BARÉS, 2010; AROZA, KAZMI, 2015; PECSON *et al.*, 2007; PASSAMANI, KELLER, GONÇALVES, 2002) que descrevem a viabilidade para a higienização de lodo sanitário em temperaturas de 80 e 40°C, mas demandando de tempo de exposição na ordem de minutos e dias, respectivamente, entende-se que os resultados do MTSL indicam a possibilidade de produzir um lodo seco e completamente higienizado de patógenos no cenário 1, atendendo aos padrões microbiológicos que eram definidos na antiga Resolução de nº375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil. Entretanto, tal processo de higienização não seria possível no cenário 2 devido ao elevado tempo de exposição que é demandado para atingir a completa higienização do lodo na temperatura de 40°C (na ordem de dias), pois o MTSL foi desenvolvido para um processo de secagem de alta taxa, semelhante aos realizados em secadores de soleiras múltiplas.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Ficou comprovada a viabilidade termodinâmica para secar lodo biológico a partir do aproveitamento de energia térmica de baixa temperatura dos sopradores de ar de uma ETE do Lodo Ativado. Tal conclusão 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.

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 com alta taxa de secagem e higienização de lodo.

Apesar dos resultados mostrarem que a secagem do lodo para temperaturas de 80°C (cenário 1) não viabilizarem o processamento de 100% do material produzido na ETE Araçás, o aproveitamento da energia térmica dos sopradores pode ser utilizada de forma combinada com outra fonte térmica, por exemplo, solar ou biomassa, produzindo um secador de lodo híbrido e que emprega energia limpa.

No cenário 2 não foi encontrado um ponto ótimo para a operação do sistema para as vazões modeladas, situação que indica que o ponto ótimo só será encontrado com uma avaliação termoeconômica do processo e não, unicamente, pela avaliação termodinâmica.

Para a higienização do lodo, entende-se que para uma processo real, espelhado ao modelo desenvolvido, é possível atingir a completa higienização do lodo no cenário 1 (80°C), mas no cenário 2 (40°C) essa possibilidade não seria plausível devido a necessidade de elevado tempo de exposição, incompatível ao tipo de secador modelado (secador do tipo soleiras múltiplas).

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Espírito Santo, representada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável e Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de desenvolver este trabalho em seu ambiente acadêmico.

A Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) pela confiança e disponibilidade dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI C.V. 2006. Biossólidos: Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), p 398.
2. ANDREOLI, C.V., BONNET B.R.P. 2000. Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto. Curitiba, SANEPAR, p 80.
3. ARLABOSSE P., CHAVEZ S., PREVOT C. 2005. Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(2), Apr-June, São Paulo, Brasil. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66322005000200009>.
4. ARCE E.B.M. 2009. Pretratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica de lodos residuales para la producción de biosólidos clase A. M.Sc. Tesis (Maestría en Ingeniería Ambiental) - Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, p. 64.
5. 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.
6. BENNAMOUN L., ARLABOSSE P., LÉONARD A. 2013. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 28, 29-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.043>.

7. BIDART C., FRÖHLING M., SCHULTMANN F. 2014. Electricity and substitute natural gas generation from the conversion of wastewater treatment plant sludge. *Applied Energy*, 113, 404-413. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.028>.
8. BORGES E.S.M, CHERNICHARO C.A.L., GODINHO V.M., BEJAR D.O. 2009. 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*, 14(3), jul-set., 337-346. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522009000300007>.
9. BUX M., BAUMANN R., QUADT S., PINNEKAMP J., MUHLBAUER, W. 2002. Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying. *Drying Technology*, 20(4-5), 829- 837. <http://dx.doi.org/10.1081/DRT-120003765>.
10. CANO R., PEREZ-ELVIRA S.I., FDZ-POLANCO F. 2015. Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. *Applied Energy*, 149, 176-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.132>.
11. CERQUEIRA S.A.A.G. 1999. Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, São Paulo, p 137.
12. CORREA W.S.C. 2011. 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, p 83.
13. DEFRAEYE T. 2014. Advanced computational modelling for drying processes - A review. *Applied Energy*, 131, 323-344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>
14. EPA-U.S. (Environmental Protection Agency). 2003. Environmental Regulations and Technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including Domestic Septage) under 40 CFR part 503. revised in 2003, p 186.
15. GILL R.S., Singh S., Pal Singh P. 2012. Solar Dryer for Powder Drying. *Drying Technology*, 30, 1666-1673. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.704468>.
16. HARALAMBOPOULOS D.A., BISKOS G., HALVADAKIS C., LEKKAS T.D. 2002. Dewatering of wastewater sludge through a solar still. *Renewable Energy*, 26, 247-256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00114-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00114-8).
17. HONG S., RYU C., SEO KO H., OHM T.I., CHAE J.S. 2013. Process consideration of fry-drying combined with steam compression for efficient fuel production from sewage sludge. *Applied Energy*, 103, 468-476. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.002>.
18. INCROPERA F.P. 2014. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley&Sons, INC., New Jersey, 9 ed, p 819.
19. LOZANO M.A., Valero A. 1986. Determinacion de la exergia para sustancias de interes industrial. *Ingenieria Química*, 119-128.
20. MA J., WANG Z., ZHU C., XU Y., WU Z. 2014. Electrogenesis reduces the combustion efficiency of sewage sludge. *Applied Energy*, 114, 283-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.049>.
21. MAKELA M., GELADI P., LARSSON S.H., FINELL M. 2014. Pretreatment of recycled paper sludge with a novel high-velocity pilot cyclone: Effect of process parameters on convective drying efficiency. *Applied Energy*, 131, 490-498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.057>.

22. MARCHIORO E. A 2012. Incidência de Frentes Frias no Município de Vitória (ES). *ACTA Geografia*, Ed. Especial, 49-60. DOI: 10.5654/actageo2012.0002.0003.
23. MITSDOERFFER R., CHRIST O. 2009. Economia de energia em estações de tratamento de esgoto. *Hydro*, 30, 22-33.
24. MURTHY M.V.R. 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 13, 835-844. doi: 10.1016/j.rser.2008.02.010.
25. OMEL, Bombas e Compressores LTDA. 2014. Sopradores Rotativos de Deslocamento Positivo SRT - Tipo ROOTS. Guarulhos, São Paulo, p 7.
26. OMEL, Bombas e Compressores LTDA. 2012. SRT - Sopradores Trilobados de Deslocamento Positivo. São Paulo, Brasil, p 14.
27. PANEPINTO D., FIORE S., ZAPPONE M., GENON G., MEUCCI L. 2016. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy*, 161, 404-411. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027>.
28. PASSAMANI, F.R.F.; KELLER, R.; GONÇALVES, R.F. Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. In: *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud. México, D.F., FEMISCA, 2002, p.1-6.*
29. 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.
30. SIDDIQUEE M.N., ROHANI S. 2011. Lipid extraction and biodiesel production from municipal sewage sludges: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15(2), 1067-1072. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.029>.
31. TANCZUK M., KOSTOWSKI W., KARAS M. 2016. Applying waste heat recovery system in a sewage sludge dryer - A technical and economic optimization. *Energy Conversion and Management*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.064>.
32. TCHOBANOGLOUS G., BURTON F., STENSEL D. 2003. *Wastewater engineering: Treatment and Reuse*. 4ª ed. Metcalf & Eddy Inc. New York: Mcgraw-Hill, p 1819.
33. VERDA V., SERRA L., VALERO A. 2004. The Effects of the Control System on the Thermoeconomic Diagnosis of a Power Plant. *Energy*, 29, 331- 359. dx.doi.org/10.1016/j.energy.2003.10.003.
34. ZHAO P., SHEN Y., GE S., CHEN Z., YOSHIKAWA K. 2014. Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment. *Applied Energy*, 131, 345-367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.038>.
35. ZHEN G., LU X., KOBAYASHI T., LI Y.Y., XU K., ZHAO Y. 2015. Mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and *Egeria densa*: Performance assessment and kinetic analysis. *Applied Energy*, 148, 78-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.038>.