

Biossecagem como alternativa de tratamento e aproveitamento energético de lodo de ETE

Biodrying as an alternative treatment and energy use of STP sludge


• **Data de entrada:**
22/06/2020


• **Data de aprovação:**
24/09/2020


Renan Felício dos Reis^{1*} | Raquel Barrena Gómez² | Xavier Font² | Dimitrios Komilis³ | João Sergio Cordeiro⁴


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.019>

ORCID ID

Reis RF  <https://orcid.org/0000-0002-0290-2126>

Gómez RB  <https://orcid.org/0000-0002-6077-7765>

Font X  <https://orcid.org/0000-0003-4981-7436>

Komillis D  <https://orcid.org/0000-0002-6606-300X>

Resumo

O manejo de lodo de ETE apresenta basicamente duas necessidades principais: remoção de água (extremamente fluido) e aproveitamento, as quais foram trabalhadas neste estudo. Foram realizados experimentos de biossecagem durante aproximadamente 14 dias utilizando lodo misturado (originado de processo de tratamento anaeróbio e aeróbio) e cavaco de madeira como estruturante. Os resultados mostraram que o processo de biossecagem promove a remoção de água ligada (intersticial, superficial e intracelular) do lodo (etapa de secagem) e que a realização de revolvimento é fundamental para retomar a atividade biológica, aumentar novamente a temperatura e obter amostra final com maior teor de ST. Ao final, o reator que resultou em produto biosseco com maior teor de ST (reator B2) alcançou 63,1% de ST, com PCS de 17.551,9kJ/kg_{ST}, o que o torna passível de aproveitamento energético.

Palavras-chave: Estação de Tratamento de Esgoto. Lodo de ETE Misturado. Biossecagem. Aproveitamento Energético.

Abstract

The STP sludge management basically presents two main needs: water removal (extremely fluid) and utilization, which were discussed in this study. Biodrying assays were conducted lasting almost 14 days using mixed sludge (originated from anaerobic aerobic sewage treatment) and wood chips as bulking agent. The results showed that the biodrying process promotes the removal of bound water (interstitial, surface and intracellular) from sludge (drying step) and that the turning is fundamental to retake biological activity, increase the temperature again and obtain final sample with higher TS content. At the end, the reactor which resulted in biodried product with higher TS content (reactor B2) reached 63,1% of TS, with HHV of 17,551.9kJ/kg_{TS}, which makes it subject to energy use.

Keywords: Sewage Treatment Plant. Mixed STP Sludge. Biodrying. Energy Use.

¹ Instituto Federal de São Paulo - São Roque - São Paulo - Brasil.

² Universitat Autònoma de Barcelona - Barcelona - Espanha.

³ Democritus University of Thrace - Xanthi - Grécia.

⁴ Universidade Federal de São Carlos - São Carlos - São Paulo - Brasil.

* **Autor correspondente:** renan.felicio@ifsp.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A biossecagem ou *biodrying* é uma tecnologia baseada em um processo semelhante ao da compostagem, mas com o objetivo de remover a água/umidade de material orgânico. A diferença entre compostagem e biossecagem é que esta última não visa alcançar a mineralização completa dos resíduos, preservando a umidade para a atividade microbiana ideal. Em vez disso, o calor metabólico é usado para remover a água da massa de resíduo no mais baixo tempo de residência possível e mínima biodegradação, preservando o poder calorífico do resíduo. Assim como na compostagem de alguns subprodutos, na biossecagem é necessária a utilização de material estruturante a fim de aumentar os espaços livres na massa e favorecer a passagem e o contato do oxigênio com os micro-organismos que, por processo de fermentação aeróbia, degradam a matéria orgânica, liberando calor para o meio externo (WINKLER et al., 2013).

Esse processo pode e tem sido aplicado também para a secagem do lodo de esgoto previamente desaguado, e deve ser conduzido de maneira a não permitir a perda de calor para a atmosfera, portanto, em reatores herméticos ou semi-herméticos. A biossecagem é ativada devido à atividade biológica, que degrada a matéria orgânica presente e libera calor, aumentando a temperatura no interior da massa, o que resulta na quebra da partícula de lodo devido à energia liberada e, conseqüentemente, na evaporação das frações de água que exigem um nível de energia mais elevado para serem removidas e que ainda estão presentes na massa (REIS et al., 2019). Para tanto, é necessário que haja espaços livres no interior da massa de lodo, que são promovidos por meio da adição e mistura de material estruturante ao lodo desaguado. Com a injeção de ar, o contato com o oxigênio pelos micro-organismos aeróbios decompositores é favorecido, a atividade biológica é ativada e a água evapora-

da é removida por convecção, uma vez que o ar injetado possui canais de entrada e de saída do reator. Além disso, por apresentar relativamente baixa remoção de sólidos voláteis (SV) da massa ao final do processo, consiste em um método que tem sido considerado de relevante atratividade para a geração de energia, dado o poder calorífico do resíduo biosseco (REIS et al., 2019).

Nesse sentido, este artigo teve como objetivo geral estudar o processo de biossecagem de lodo de esgoto misturado (sistema anaeróbio e aeróbio) e analisar a possibilidade de aproveitamento energético. Para tanto, ensaios de biossecagem baseados em metodologias da literatura com lodo previamente desaguado em centrífuga foram conduzidos, monitorados e comparados.

2 METODOLOGIA

Os materiais utilizados para os experimentos conduzidos foram:

- Três reatores semi-herméticos de 10 litros de capacidade volumétrica, devidamente equipados com sensores de temperatura (conectados a um computador), canal de entrada e saída de ar, e sistema de mangueiras e telas interno ao reator para melhor distribuição e direcionamento do ar do fundo para o topo do reator;
- Sistema computacional com controle de vazão de ar de entrada nos reatores a partir da taxa de consumo de oxigênio (*Oxygen Uptake Rate* - OUR), e com registro da temperatura interna da massa dentro do reator;
- Dois rotâmetros manuais para controle e regulação da vazão de ar de entrada no reator;
- Lodo de esgoto misturado (originário de tratamento anaeróbio e aeróbio), desaguado em centrífuga;

- Pallets de madeira descartados para triturar e obter dimensão adequada para preparação da mistura lodo:estruturante;
- Triturador de madeira;
- Peneira utilizada para peneirar a madeira triturada, com abertura de 7,1mm;
- Equipamentos para análises de caracterização do lodo desaguado e para acompanhamento do

experimento, em análises de sólidos totais - ST (estufa), sólidos voláteis - SV (mufla), e poder calorífico superior - PCS (bomba calorimétrica);

- Softwares para compilação dos resultados.

A Fig. 1 traz uma representação dos métodos adotados para conduzir os experimentos deste estudo.

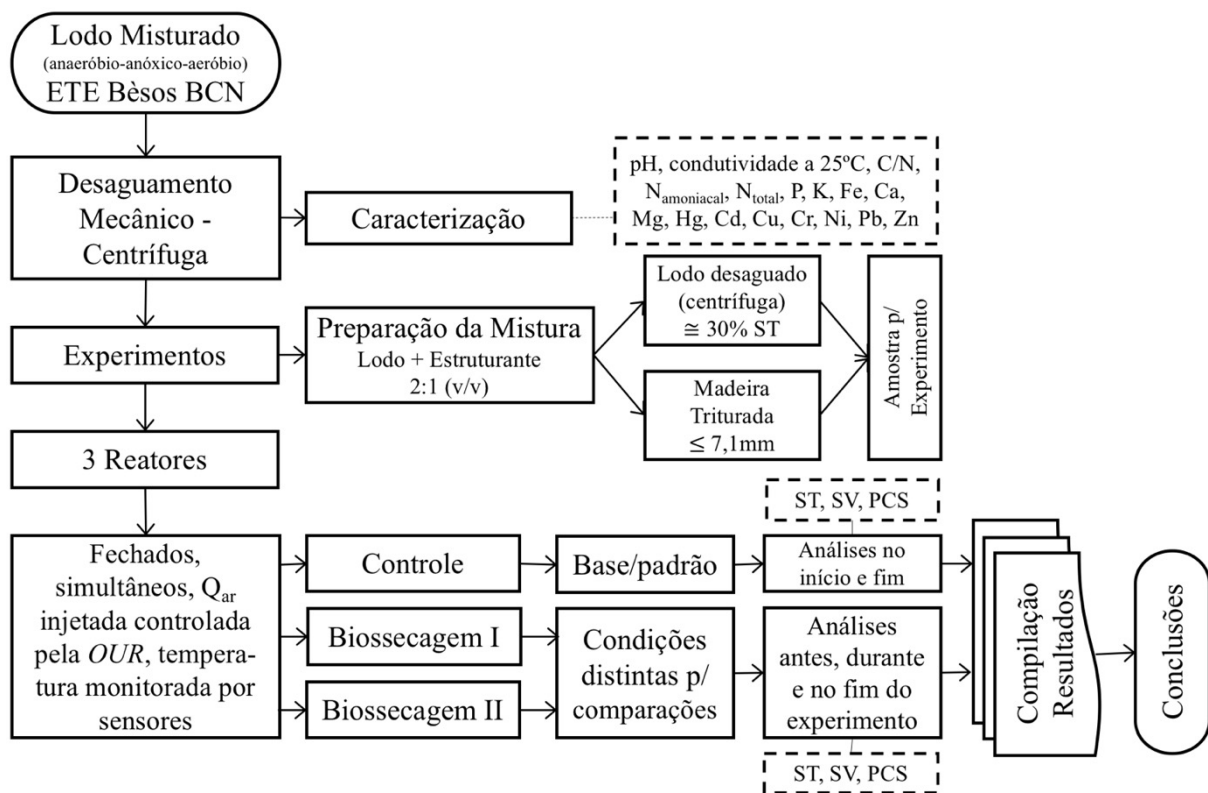


Figura 1 - Fluxograma representando os métodos adotados para os experimentos conduzidos.

Os experimentos realizados duraram aproximadamente 14 dias e foram conduzidos em três reatores com capacidade volumétrica de 10L. O lodo foi previamente desaguado em centrífuga (alcançando aproximadamente 30% de ST), coletado na ETE Bèsos da área metropolitana de Barcelona (Espanha), que além do lodo gerado no tratamento da estação, recebe também lodo

de fontes externas. Em um primeiro momento, foi coletada amostra do lodo desaguado para caracterização. Na caracterização foram levantados dados de potencial hidrogeniônico (pH), condutividade a 25°C, relação carbono/nitrogênio (C/N), nitrogênio amoniacal ($N_{\text{amoniacal}}$), nitrogênio total (N_{total}), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), mercúrio (Hg),

cádmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb), e zinco (Zn).

Antes de iniciar o experimento, foi realizada a preparação da mistura lodo:estruturante (L:E). O estruturante utilizado foi madeira de pallets triturada e peneirada, obtendo-se cavacos de madeira com dimensão menor ou igual a 7,1mm. A proporção de mistura L:E foi realizada em termos volumétricos, sendo de 2:1 (v/v). O experimento se iniciou de maneira idêntica e simultânea nos três reatores com 4kg de amostra em cada um, estando os três reatores fecha-

dos, com vazão de entrada de ar monitorada em algoritmo específico iniciando em 0,1L/min e controlada pela taxa de consumo de oxigênio (OUR), com o objetivo de, após atingir a máxima temperatura, alterar os parâmetros dos reatores Biossecagem I (B1) e Biossecagem II (B2), para comparar seus resultados com o reator Controle (C), mantido fechado e com vazão de ar controlada pela OUR durante todo o experimento. A representação da configuração do experimento (considerando-se apenas um reator) encontra-se apresentada na Fig. 2.

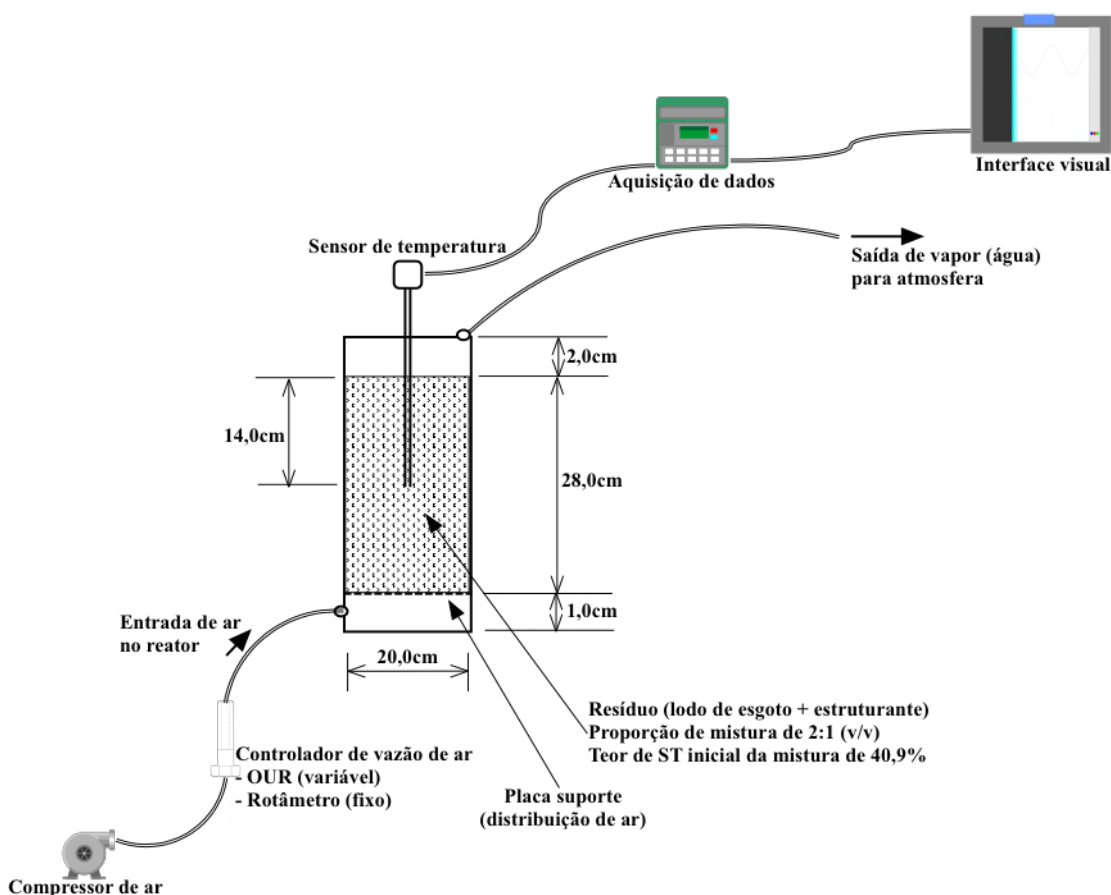


Figura 2 - Representação da configuração do experimento conduzido.

Os três reatores foram colocados em operação e finalizados no mesmo momento. Os B1 e B2, após três dias, quando alcançaram a máxima temperatura (aproximadamente 63°C), foram abertos, re-

volvidos, retirou-se o controle de vazão de ar pela OUR, e aplicou-se vazão de ar fixa mais elevada (1,0L/min.kg(*base úmida*)). No décimo dia de experimento, um dos dois reatores de biossecagem

(B2) recebeu novo aumento na vazão de ar com o objetivo de observar o comportamento dessa alteração (passando de 1,0 para 2,5L/min.kg_(b.u.)). Os reatores B1 e B2, após abertos, receberam revolvimento de toda massa a cada dois dias, com o objetivo de aumentar a qualidade da aeração e de coletar amostras mais homogêneas para monitoramento de teor de ST. A Fig. 3 resume os métodos do experimento ao longo dos 14 dias e traz alguns parâmetros de entrada.

Nos reatores B1 e B2 foram monitorados ST, SV e perda de massa acumulada ao longo do experimento, permitindo-se obter curva representativa desses parâmetros. Antes e ao final dos experimentos, além dessas duas análises (ST e SV), nos três reatores foram realizadas também análises de PCS. A vazão de entrada de ar e a temperatura foram monitoradas a cada minuto, permitindo-se relacionar essas duas variáveis com as demais e controlar o experimento. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

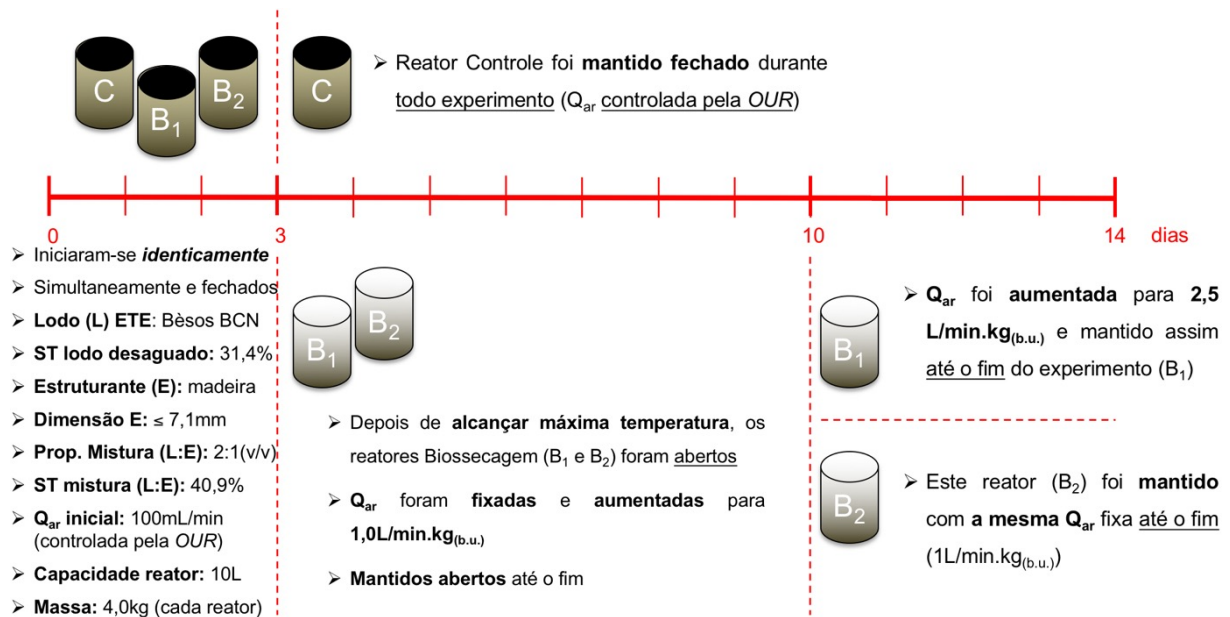


Figura 3 - Representação temporal do experimento conduzido.

3 RESULTADOS

Em resumo, os resultados obtidos tratam da caracterização do lodo da ETE Bêsos desaguado em centrífuga e resultados referentes ao experimento de biossecagem, no que se refere aos parâmetros de entrada da massa (lodo + estruturante),

monitoramento de parâmetros ao longo do experimento e parâmetros de saída (lodo biosseco).

Os resultados da caracterização do lodo desaguado em centrífuga encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados das análises de caracterização do lodo desaguado em centrífuga, da ETE Bèsos, Barcelona, Espanha.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método
pH	unid. pH	6,1	PNT LAB 04*
Condutividade a 25°C	µs/cm	3160	PNT LAB 5*
N amoniacal	%	0,65	PNT LAB 30*
N total kjeldahl	%	4,2	PNT LAB 77*
Relação C/N	adimensional	9,6	PNT LAB 35*
P	mg/kg	7210	PNT LAB 07*
K	mg/kg	1180	PNT LAB 07*
Fe	mg/kg	5750	PNT LAB 07*
Ca	mg/kg	14000	PNT LAB 07*
Mg	mg/kg	2240	PNT LAB 07*
Hg	mg/kg	1,4	PNT LAB 07*
Cd	mg/kg	0,56	PNT LAB RES 09*
Cu	mg/kg	167	PNT LAB RES 09*
Cr	mg/kg	28	PNT LAB RES 09*
Ni	mg/kg	14	PNT LAB RES 09*
Pb	mg/kg	34	PNT LAB RES 09*
Zn	mg/kg	459	PNT LAB RES 09*
ST	%	31,4	2540 G**
SV	%	85,2	2540 E**

*Procedimento interno do laboratório (Tecno Ambiente, S.L.). Norma de referência: UNE-EN ISO/IEC 17025: 2005, UNE-CEN/TS 15675 EX:2009.

**APHA, AWWA, WEF (2012).

Os resultados referentes aos parâmetros iniciais (antes do início do experimento) da mistura 2:1 (v/v), sendo L:E, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados das análises de ST e SV da mistura 2:1 (v/v), sendo L:E, antes de iniciar os experimentos simultaneamente nos três reatores.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método
ST	%	40,9	2540 B*
SV	%	88,8	2540 E*

*APHA, AWWA, WEF (2012).

Os resultados obtidos ao longo do experimento estão apresentados em forma de gráficos para facilitar o entendimento. As Fig. 4, 5, 6, 7 e 8 relacionam o tempo do experimento (em horas na abscissa inferior e em dias na abscissa superior) com o monitoramento dos seguintes parâmetros, respectivamente: temperatura, vazão de ar injetado, perda de massa acumulada, teor de ST, e teor de SV.

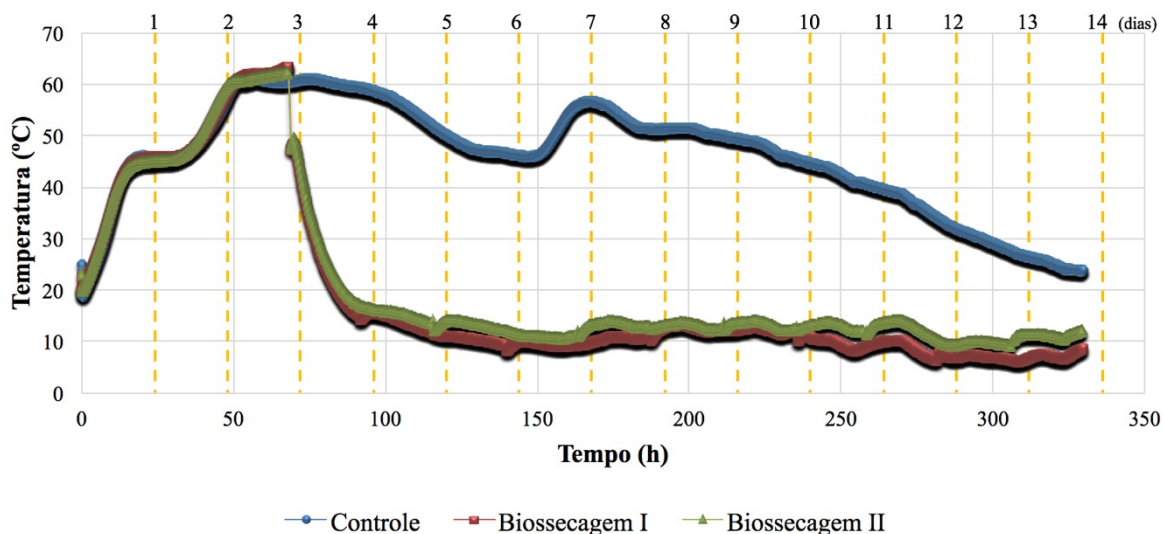


Figura 4 - Temperatura (°C) x tempo (horas) nos reatores C, B1 e B2.

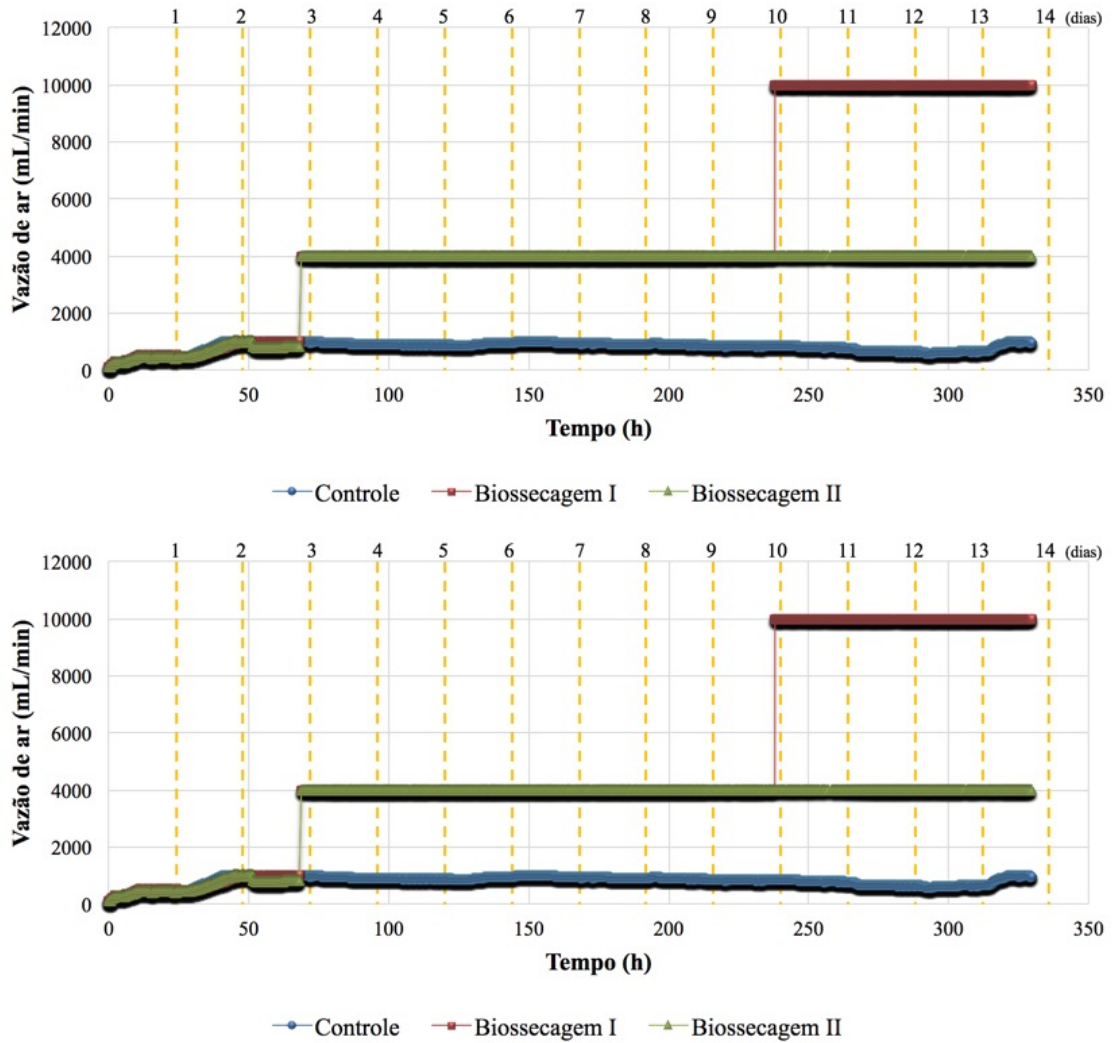


Figura 5 - Vazão de ar injetada (mL/min) x tempo (horas) nos reatores C, B1 e B2.

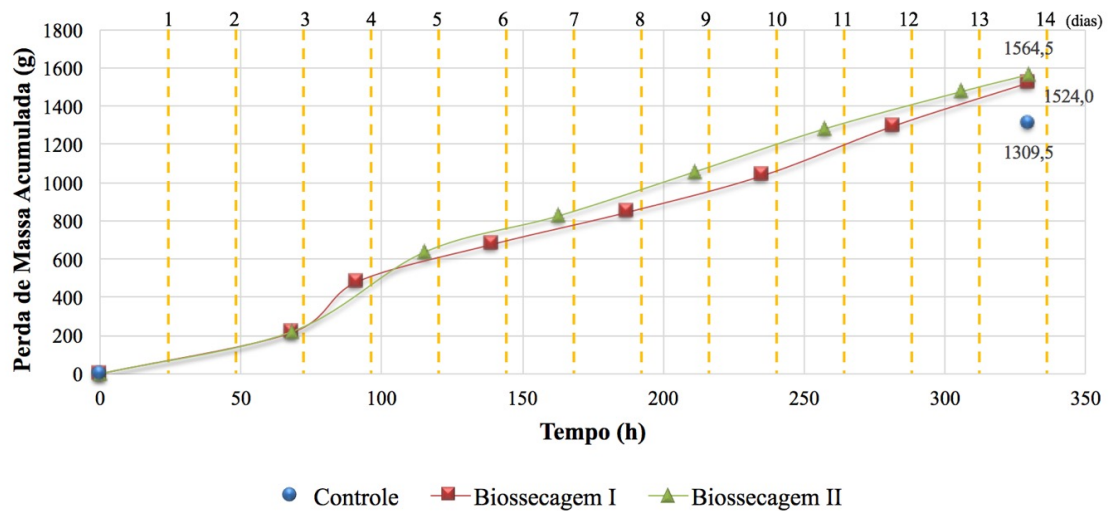


Figura 6 - Perda de massa acumulada (g) x tempo (horas) nos reatores C, B1 e B2.

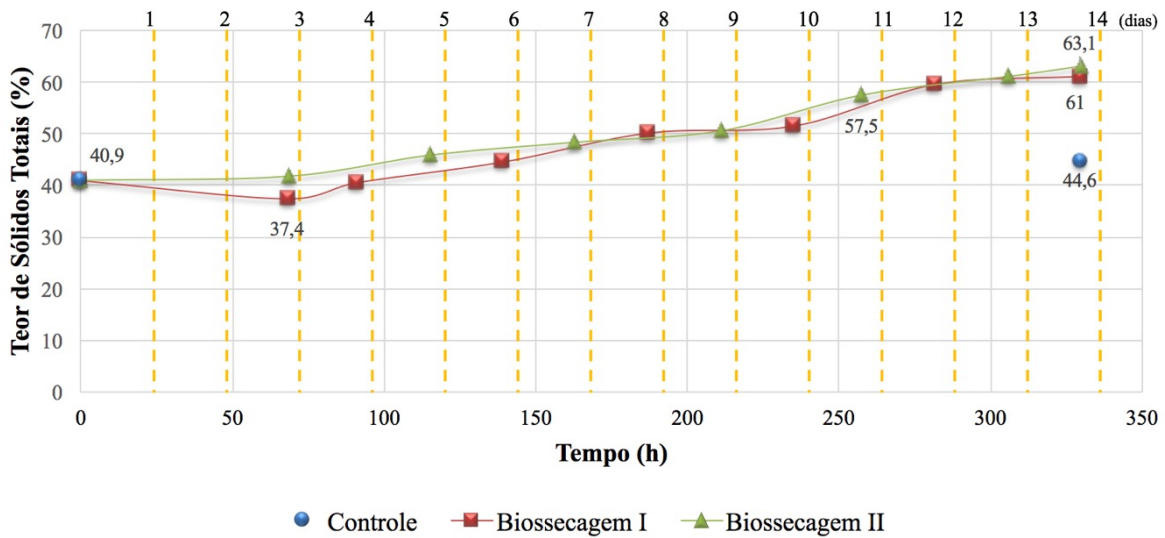


Figura 7 - Teor de ST (%) x tempo (horas) nos reatores C, B1 e B2.

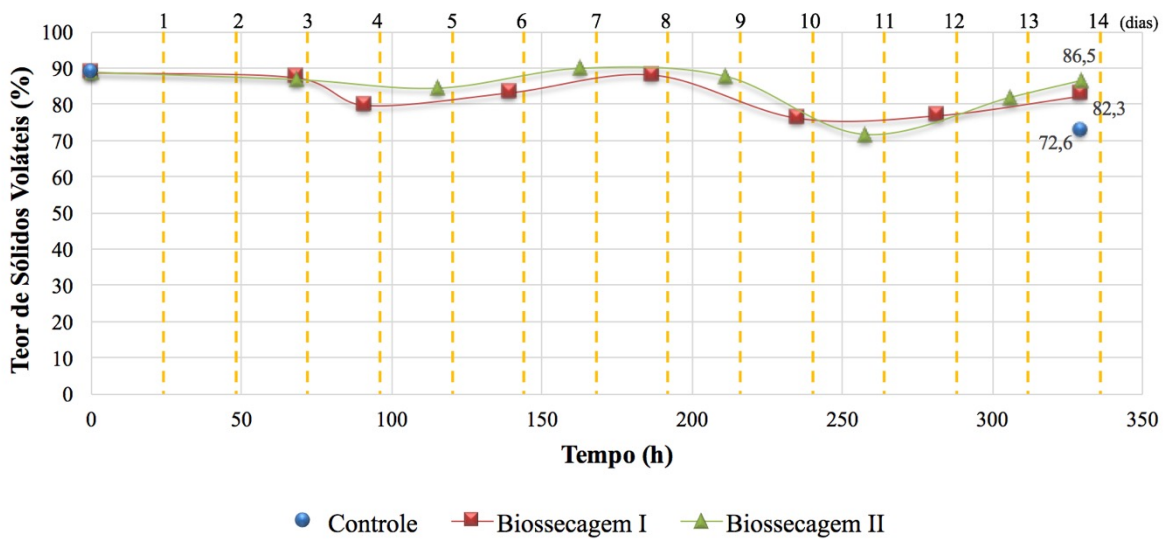


Figura 8 - Teor de SV (%) x tempo (horas) nos reatores C, B1 e B2.

4 DISCUSSÃO

Os três reatores, até as proximidades do fim do 3º dia de experimento, apresentaram comportamentos muito semelhantes, obviamente por serem submetidos a condições idênticas até a 69ª hora. Analisando-se a Fig. 4, nas primeiras 24 horas do início do experimento ocorreu o aumento mais significativo da temperatura, ultrapassando condições mesofílicas (15 a 43º, segundo Fer-

nandes e Silva, 1999), e tendo comportamento semelhante ao relatado por Cai et al. (2016b) no que se refere à fase mesofílica da biossecagem, que configura a primeira fase do processo. Nessas primeiras 24 horas, os reatores alcançaram aproximadamente 46ºC de temperatura, ficando a temperatura estagnada nesse valor até a 35ª hora, quando retomou o aumento, superando a fase de transição entre a faixa mesofílica e ter-

moifílica, e registrando comportamento do que foi denominado por Cai et al. (2016b) de primeira fase termofílica (segunda fase do processo). O valor máximo de temperatura registrado foi de 63,41°C no reator B1, seguido de 62,07 e 60,48°C nos reatores B2 e C, respectivamente. A partir deste momento (69ª hora) foi realizado revolvimento da massa e aumento e fixação da vazão de ar para 1L/min.kg_(b.u.) (Fig. 5) nos reatores B1 e B2, o que resultou em queda brusca de temperatura. Assim, por ser adotada a estratégia de manter os reatores B1 e B2 abertos até o fim do experimento, a temperatura sofreu pouca variação a partir de então, mantendo-se abaixo de 18°C após o 4º dia. Por essa razão, considera-se que, uma vez abertos os dois reatores, a perda de água ocorreu por convecção da fração de água já “liberada” quando do aumento da temperatura em momento anterior, ou apenas devido à passagem de ar através da massa. Em contrapartida, o reator que não foi aberto, e sua massa não foi revolvida até o fim do experimento (reator C), iniciou uma queda na temperatura a partir do 3º dia, chegando a 45,73°C no início do 6º dia (146ª hora), quando retomou novo aumento de temperatura e, mesmo sem a realização do revolvimento sugerido e adotado por Cai et al. (2012, 2013, 2016a e 2016b); Cai, Gao e Hong (2015); Villegas e Huiliñir (2014), Huiliñir e Villegas (2015); Yang, Zhang e Jahng (2014); e Zhao et al. (2010), registrou comportamento semelhante ao que foi denominado por Cai et al. (2016b) como segunda fase termofílica (terceira fase do processo), com registro máximo de 56,7°C nas proximidades do início do 7º dia (166ª hora). Após esse novo pico de temperatura, esse parâmetro começou a declinar, perfazendo o que se denominou como fase de resfriamento (Cai et al., 2016b), até chegar à temperatura de 23,65°C ao final (329ª hora ou proximidades do 14º dia). Em relação aos perfis de temperatura dos reatores B1 e B2, após abertos, estes registraram comportamentos muito semelhantes até o 10º dia, quando o

reator B1 recebeu novo aumento na vazão de ar injetado (2,5L/min.kg_(b.u.)), conforme ilustrado na Fig. 5. Esse novo aumento na vazão de ar em B1 resultou em diminuição da temperatura deste reator, chegando aos seguintes registros finais de temperatura para B1 e B2: 8,41 e 11,95°C, respectivamente.

Quanto à Fig. 5, recorda-se que se trabalhou com 4kg de amostra, em base úmida (b.u.), em cada reator. Portanto, os registros de vazão de ar, para que sejam considerados em função da massa em kg, devem ser divididos por quatro e, por existirem registros no início do processo e ao longo dos registros do reator C inferiores a 1L/min, optou-se por adotar unidade volumétrica em mililitros (mL) na representação gráfica. Logo, exemplificando e facilitando a leitura da Fig. 5, nas proximidades do 3º dia, os reatores B1 e B2 receberam um aumento na vazão de ar (4000mL/min), que corresponde a 1L/min.kg_(b.u.). E, no 10º dia de experimento, o reator B1 recebeu novo aumento (10.000mL/min), que corresponde a 2,5L/min.kg_(b.u.).

Em relação à Fig. 6, foi possível o monitoramento ao longo do experimento apenas para B1 e B2, já que eram realizados revolvimentos da massa a cada 2 dias e, portanto, era possível o registro da perda de massa acumulada. Assim, a partir da leitura do gráfico em referência, nota-se maior perda de massa em B2 (1.564,5g), seguido de B1 (1.524,0g) e C (1.309,5g). Os reatores B1 e B2 registraram comportamento semelhante no que se refere à perda de massa acumulada. Dessa forma, desta representação gráfica em discussão conclui-se que o aumento da vazão de ar injetado nos reatores (B1 e B2) foi mais efetivo do que a manutenção de altas temperaturas (C) no que se refere à perda de massa ao longo do experimento, supondo-se até que a não realização de revolvimento para este último reator possa ser a explicação deste resultado inferior. Ressalta-se também que, ainda que a diferença de perda

de massa seja pequena quando se comparam os reatores B1 e B2, o aumento da vazão de ar injetado em B2 após o 10º dia (Fig. 5) não significou maior perda de massa nesse reator em relação ao B1. Logo, ainda que o aumento da vazão possa ter sido mais efetivo quando se comparam os reatores B1 e B2 com o C, é provável que exista um valor limitante no que se refere ao aumento da vazão de ar injetado para que ocorra maior perda de massa ao longo do experimento.

No que concerne à Fig. 7, esta pode ser considerada como principal resultado deste experimento, uma vez que representa o teor de ST ao longo do processo, ou seja, relata a quantidade de matéria seca presente na massa, sendo maior quanto mais água for removida. Semelhantemente ao monitoramento da perda de massa acumulada, o monitoramento do teor de ST ao longo do experimento foi possível de ser analisado apenas para os reatores B1 e B2, quando da realização do revolvimento, permitindo-se obter amostra para tanto. Os três reatores foram submetidos ao experimento com a massa em mesmas condições, com teor de ST de 40,9% (lodo + estruturante, 2:1 v/v). Ao final do experimento, obteve-se os seguintes valores finais de ST: 63,1 para B2, 61 para B1, e 44,6% para C. Esses resultados, assim como aqueles referentes à Fig. 6, ilustram que o aumento da vazão de ar injetado resultou em amostra mais seca ao final do experimento do que a manutenção de temperatura mais elevada. Contudo, assim como se afirmou para a situação da perda de massa acumulada, supõe-se que a inferioridade dos resultados do reator C se deu principalmente devido à não realização de revolvimento, que poderia ter sido feito no 6º dia, antes do início da segunda fase termofílica, e, quando do início da fase de resfriamento, em maior periodicidade. Complementarmente, ressalta-se que, se realizados revolvimentos no reator C, este poderia ser denominado como Biossecagem. Por fim, quando se comparam condições semelhantes (B1 e B2), com diferença apenas

a partir do 10º dia de experimento, quando foi realizado novo aumento na vazão de ar do reator B1 (Fig. 5), o resultado foi diminuição da temperatura (Fig. 4) e também maior dificuldade na perda de água (Fig. 6 e 7), permitindo-se concluir que para obter maior taxa de remoção de água em processo de biossecagem, a manutenção de temperaturas mais altas possui maior contribuição que o aumento significativo da vazão de ar, o que também é afirmado por Winkler et al. (2013) e Cai et al. (2012, 2013, 2016a e 2016b). Isso porque quando se possui temperaturas mais altas facilita-se a quebra da partícula, favorecendo a remoção da água intersticial, superficial e intracelular presente no lodo. Como comprovação, na Fig. 7 observa-se que no reator B2 obteve-se maior teor de ST final que no B1.

Sobre a Fig. 8, devido à presença de material estruturante (madeira triturada) na amostra coletada para análise, os resultados podem ter sido disfarçados, uma vez que não foi possível, no momento da análise, eliminar a madeira, que certamente interferiu no monitoramento dos resultados de SV, mesmo sendo realizadas análises em triplicata para todos os parâmetros. Assim, o que se infere desta representação (Fig. 8) é que, ainda que pequena, ocorreu remoção de SV ao longo do experimento, com mais significatividade para os reatores C e B1. Além disso, é importante destacar que alto teor de SV corresponde a maior quantidade de matéria orgânica presente e, portanto, possivelmente maior poder calorífico do produto.

Em todos os reatores, após o período mantido fechado, quando da realização da abertura, observou-se grande quantidade de água na parte interna da tampa, o que denota que ocorreu dificuldade na saída da água evaporada do reator, situação reparada em estudos realizados por Almeida (2020).

Nas Fig. 9, 10, 11 e 12 são ilustrados aspectos de aparência visual referentes ao experimento conduzido.



Figura 9 - Mistura 2:1 (v/v) do lodo com estruturante.



Figura 10 - Realização de revolvimento (reatores B1 e B2).



Figura 11 - Reatores ao final do experimento - B1, B2 e C (da esquerda para direita).



Figura 12 - Estratificação de secagem no reator C (fundo do reator acima e topo abaixo).

No reator C foram realizadas análises de ST e SV apenas antes de iniciar o experimento e após finalizado. Nesse reator, a estratificação da secagem foi muito aparente (Fig. 12), obtendo-se os respectivos teores de ST em amostras coletadas do fundo, do meio e da parte superior do reator: 94,5; 80,4 e 26,3%. Portanto, obtendo-se massa mais seca no fundo (entrada de ar no reator) e mais úmida na parte superior (saída de ar do reator). É possível mencionar também que o teor de ST nesse reator aumentou ao se homogeneizar a massa e coletar amostra para análise (de 40,9 para 44,6%) e comparar os valores antes e após o experimento (Fig. 7). No entanto, é possível afirmar que parte da umidade foi transferida da camada inferior para a superior, uma vez que a mistura L:E no início do experimento possuía teor de ST homogêneo de 40,9%, passando, ao final do experimento, a ter 26,3% de ST na camada superior, permitindo essa conclusão a respeito da transferência de umidade do fundo para a ca-

mada superior da massa no reator, que pode ser decorrente da ineficiência do sistema de saída de água evaporada do reator.

Em síntese, segue Tabela 3, que traz resumidamente os resultados dos principais parâmetros monitorados no experimento, incluindo resultados de análises de PCS de amostras antes e após o processo, para os três reatores.

Tabela 3 - Resumo dos resultados dos principais parâmetros analisados, antes e após o processo.

Parâmetro	C, B1, B2	C	B1	B2
	antes	após	após	após
ST (%)	40,9	44,6	61	63,1
SV (%)	88,8	72,6	82,3	86,5
PCS (kJ/kgST)*	18.245,17	10.861,24	14.775,59	17.551,88

*Método: ASTM (American Society for Testing Materials), D 407-44, D 271-58, D 240-57 T.

Analisando-se a Tabela 3, verifica-se que o melhor resultado obtido em termos de secagem do lodo de esgoto foi referente a B2, seguido de B1 e C. Assim, pensando-se na utilização desse resíduo biosseco para geração de energia por meio de processo de combustão, os teores de ST de B1 (61%) e B2 (63,1%) superaram o parâmetro mínimo recomendado por Gyllenhammar (1998) e Zhao et al. (1999), que é 57% de ST. Os teores finais de ST de B1 e B2 superaram, inclusive, o teor mais elevado (60% de ST) do intervalo sugerido por Götttsching et al. (1996) para combustão autógena de lodo. Em relação ao reator C, este ficou muito perto de atender ao teor mínimo de 45% de ST recomendado por Kudra et al. (2002), para que seja incinerado produzindo ganho de energia.

No que se refere ao teor de SV, que representa quantidade de matéria orgânica presente na massa processada, observa-se que houve redução em todos os casos. No entanto, essa redução foi mais significativa no reator C, uma vez que devido à manutenção de maior temperatura da massa ao longo do experimento e passagem

pelos quatro fases do processo (mesofílica, 1ª termofílica, 2ª termofílica e resfriamento), o que se pode atribuir à maior ocorrência de atividade biológica, certamente esse resultado de menor teor de SV em relação aos outros dois reatores era esperado.

Por fim, quanto ao PCS, uma vez que este tende a ser maior quanto maior o teor de ST e SV, obteve-se o melhor resultado (17.551,88kJ/kgST) para o reator B2, com 61,3 e 86,5% de ST e SV, respectivamente. Vale ressaltar que, como o valor do PCS é diretamente proporcional ao teor de SV, e é analisado em amostra seca (após ser submetida à estufa por 24h, a 105°C), esse parâmetro é maior na massa antes de ser processada (biossecagem) do que após, já que ao longo do processo, devido à atividade biológica (matéria orgânica) e consequente aumento da temperatura, o teor de SV é reduzido, ou seja, consome-se parte dos sólidos voláteis presentes. Logo, o melhor resultado em termos de secagem e aproveitamento de potencial energético do produto final pode ser atribuído ao reator B2, mesmo passando apenas por duas (mesofílica e primeira termofílica) das quatro fases do processo identificadas e descritas por Cai et al. (2016b), devido à abertura do reator e consequente desfavorecimento de aumento da temperatura.

Como limitações desse experimento mencionou-se a possibilidade de estimar e comparar os custos de energia elétrica devido ao aumento na vazão de ar (realizada em B1 e B2), bem como a possibilidade de ter sido conduzido simultaneamente um reator extra em mesmas condições do reator C, mas com pelo menos um ou dois revolvimentos sendo realizados, com o primeiro no quinto ou sexto dia.

5 CONCLUSÕES

Ante o exposto, destaca-se a importância e a necessidade de tratamento e aproveitamento

de resíduos como o lodo de ETE, conforme preconiza a Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010). Além disso, menciona-se que o processo de biossecagem com lodo de ETE é ainda recente, uma vez que os primeiros estudos relatados na literatura datam de 2010 (REIS et al., 2019). Em contraponto, cita-se que na Europa já existem estações de biossecagem de lodo de ETE implantadas em escala real (WINKLER et al., 2013), o que ainda não existe no Brasil, mesmo com o cenário promissor dessa tecnologia.

Em relação aos estudos conduzidos, enfatiza-se que o processo, mesmo conduzido em escala laboratorial, apresentou comportamento e resultados de acordo com o relatado na literatura, além de trazer ganhos no que se refere à condução do experimento comparando-se processo fechado com parcialmente fechado durante a duração, além da variação de vazão de ar injetada.

Por fim, ressalta-se a viabilidade da aplicação desse processo, uma vez que o teor de ST final, principalmente nos reatores B1 e B2, apresentou resultados (61 e 63,1%) viáveis para incineração e com PCS compatível (14.775,59 e 17.551,88kJ/kgST) com o apresentado para estações de biossecagem e incineração em escala real.

6 AGRADECIMENTOS

Ao grupo de pesquisa GICOM, do Departamento de Engenharia Química, da *Universitat Autònoma de Barcelona*; e à CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche no exterior (PDSE).

7 FONTE DE FINANCIAMENTO

CAPES, Bolsa PDSE, processo nº 99999.003698/2014-09.

8 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

9 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. C. R. **Efeito da taxa de aeração, da proporção mássica e da umidade da matriz inicial no processo de biossecagem de lodo de ETE**. 143 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar, São Carlos, 2020.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed., 2012.

BRASIL. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira**. Brasília. Lei 10.305 de 2010. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CAI, L.; GAO, D.; CHEN, T-B.; LIU, H-T.; ZHENG, G-D.; YANG, Q-W. Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying. **Bioresource Technology**, 117, 2012. 13-19 p.

CAI, L.; CHEN, T-B.; GAO, D.; ZHENG, G-D.; LIU, H-T.; PAN, T-H. Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying. **Water Research**, 47, 2013. 4767-4773 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.048>

CAI, L.; GAO, D.; HONG, N. The effects of different mechanical turning regimes on heat changes and evaporation during sewage sludge biodrying. **Drying Technology**, 33, 2015. 1151-1158 p. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1016574>

CAI, L.; CHEN, T-B.; GAO, D.; YU, J. Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge. **Water Research**, 90, 2016a. 44-51 p. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.026>

CAI, L.; KRAFFT, T.; CHEN, T-B.; GAO, D.; WANG, L. Structure modification and extracellular polymeric substances conversion during sewage sludge biodrying process. **Bioresouce Technology**, 157, 2016b. 414-421 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.102>

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. Universidade Estadual de Londrina (UEL). Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.

GYLLENHAMMAR, M. **Combustion of deinking sludge and fiber sludge in bark fired boilers**. Varmeforsk report. S.E.P. Scandinavian Energy Project AB, 1998.

GÖTTSCHING, L.; HAMM, U; PLATZER, E.; PUTZ, H.J. **Analysis of waste paper recycling and disposal options in Germany**, IIED Report, 1996.

HUILINIR, C.; VILLEGAS, M. Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge. **Water Research**, 82, 2015. 118-128 p. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.046>

KUDRA, T., GAWRZYNSKI, Z., GLASER, R., STANISLAWSKI, J., POIRIER, M. Drying of pulp and paper sludge in a pulsed fluid bed dryer. **Drying Technology**, 20, 2002. 917-933 p. <https://doi.org/10.1081/DRT-120003769>

REIS, R. F.; CORDEIRO, J. S.; FONT, X.; ACHON, C. L. The biodrying process of sewage sludge – a review. **Drying Technology**, 2019, 1-14 p. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1629689>

VILLEGAS, M; HUILINIR, C. Biodrying of sewage sludge: kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates. **Bioresource Technology**, 174, 2014. 33-41 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.136>

WINKLER, M. -K. H.; BENNEMBROEK, M. H.; HORSTINK, F. H.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; VAN DE POL, G.-J. The biodrying concept: an innovative technology creating energy from sewage sludge. **Bioresource Technology**, 147, 2013. 124-129 p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.138>

YANG, B.; ZHANG, L.; JAHNG, D. Importance of initial moisture content and bulking agent for biodrying sewage sludge. **Drying Technology**, 32, 2014. 135-144 p. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.795586>

ZHAO, C.; CHEN, X.; HUANG, C.; LAN, J.; DUAN, Y.; CUI, G.; WANG, W. **Fluidization and incineration of pulp and paper mill sludge in BFB**. In: 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Savannah, GA (US), 1999. **Anais... Web**

ZHAO, L.; GU, W.-M.; HE, P.-J.; SHAO, L.-M. Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. **Water Research**, 44, 2010. 6144-6152 p.