

Proposta de sistema térmico de higienização e secagem de lodo em escala plena para uma estação anaeróbia de tratamento de esgoto de pequeno porte

Proposal of full-scale thermal system for hygienization and drying of sludge from small anaerobic sewage treatment plant

Tiago Neumann Kuk^{1*} , Jeanette Beber de Souza² ,
Gustavo Rafael Collere Possetti¹ , Luiz Gustavo Wagner¹ 

RESUMO

Este artigo propõe um sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto em escala plena, alimentado por biogás e energia solar, para uma estação de tratamento de esgoto de pequeno porte. Para tal, realizou-se caracterização da estação de tratamento de esgoto investigada, determinando-se volumes mensais médios de lodo, biogás e metano disponíveis. Na sequência, a partir de experimentos em escala reduzida, avaliou-se o desempenho de duas diferentes configurações do referido sistema, com piso radiante metálico e em concreto. Três campanhas experimentais com diferentes cargas de lodo foram realizadas, variando-se teor de sólidos totais iniciais do lodo (5 e 40%) e espessura do material depositado sobre os pisos radiantes (10 e 20 cm). Os resultados obtidos subsidiaram a escolha da configuração e da carga de lodo mais favoráveis para a proposição em questão, possibilitando pré-dimensionamento do sistema para o tratamento de cerca de 211 m³ mês⁻¹ de lodo, com 5% de sólidos totais. Assim, devem ser adaptados dois pisos metálicos radiantes com 50 m², os quais devem ser carregados com lodo em camada de 10 cm, após o seu desaguamento prévio em leitos de secagem (40% sólidos totais). As temperaturas atingidas possibilitaram higienização do material, bem como elevação do teor de sólidos totais até 75%. Como a energia solar é utilizada, o consumo médio estimado de metano é de 11.363,19 Nm³ mês⁻¹, volume disponível na estação de tratamento de esgoto e suficiente para o processamento de todo o lodo nela gerado ao longo de três ciclos mensais com nove dias de duração.

Palavras-chave: ETE sustentável; tratamento térmico de lodo; higienização e secagem de lodo de esgoto; biogás; energia solar.

ABSTRACT

This paper proposed a full-scale thermal sanitation and drying system for sewage sludge, powered by biogas and solar energy, from a small anaerobic sewage treatment plant. For that, the characterization of the investigated sewage treatment plant was carried out, determining the average monthly volumes of sludge, biogas, and methane available. Then, from small-scale experiments, the performance of two different configurations of the referred system was evaluated, with metallic and concrete underfloor heating. Three experimental campaigns with different sludge loads were carried out, varying the initial total solids content of the sludge (5 and 40%) and the thickness of the material deposited on the radiant floors (10 and 20 cm). The results obtained subsidized the choice of the configuration and the sludge load considered most favorable for the proposition in question, allowing the pre-dimensioning of the system for the treatment of about 211 m³ month⁻¹ of sludge, with 5% total solids. Thus, two radiant metal floors with 50 m² must be adapted, which must be loaded with sludge in a 10 cm layer, after their previous dewatering in drying beds (40% total solids). The temperatures reached made it possible to sanitize the material, as well as to increase the total solids content up to 75%. As solar energy is used, the estimated average consumption of methane is 11.363,19 Nm³ month⁻¹, a volume available at the sewage treatment plant and sufficient to process all the sludge generated there over 3 monthly cycles lasting 9 days.

Keywords: sustainable SWTP; sludge heat treatment; sanitation and drying of sewage sludge; biogas; solar energy.

INTRODUÇÃO

O modelo linear de produção e consumo da sociedade, com a extração, a transformação, o descarte final e a subutilização de produtos, começa a dar

lugar ao conceito de economia circular, que prevê ciclos contínuos de desenvolvimento restaurativos e regenerativos (SU *et al.*, 2013; GHISELLINI *et al.*, 2016). Esse novo modelo de economia tem como premissa a adoção de um

¹Companhia de Saneamento do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

²Universidade Estadual do Centro-Oeste, Departamento de Engenharia Ambiental - Irati (PR), Brasil.

*Autor correspondente: tiagokuk@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Companhia de Saneamento do Paraná - Sanepar.

Recebido: 26/03/2020 - **Aceito:** 04/05/2021 - **Reg. ABES:** 20200111

sistema de produção com ciclo fechado, propiciando o aumento da eficiência do uso de recursos naturais e a redução dos impactos ambientais (NOYA *et al.*, 2017). Nesse contexto, o lodo, que é um subproduto gerado nos processos de tratamento de esgoto, normalmente considerado como um resíduo que precisa ser descartado, quando devidamente processado, pode se transformar, por exemplo, em uma fonte de matéria orgânica e de nutrientes para fins agrícolas (ANDREOLI *et al.*, 2001; BITTENCOURT *et al.*, 2009; BITTENCOURT *et al.*, 2014; ANDERSSON *et al.*, 2016).

Com as diretrizes previstas para a universalização do saneamento no Brasil, Lei Federal nº 11.445/2007 (BRASIL, 2007), alterada e complementada pela Lei Federal nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico (BRASIL, 2020), há expectativa de que índices como coleta e tratamento de esgoto aumentem nos próximos anos no país e, conseqüentemente, a produção de lodo. Mesmo que isso aconteça em ritmo mais lento que o necessário e almejado pela sociedade, é importante que os agentes envolvidos estejam aptos e engajados no desenvolvimento de novas técnicas ou no aprimoramento daquelas já conhecidas, adotando-se como premissa a recuperação de recursos e a consolidação das estações de tratamento de esgoto (ETEs) sustentáveis (JENSSEN *et al.*, 2007; ANDERSSON *et al.*, 2016; DERESZEWSKA *et al.*, 2016; BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2019).

Alternativas usuais para o lodo gerado nas ETEs, como remoção, deságuo e disposição final em aterros sanitários, além de serem cada vez mais onerosas, causam impactos ao meio ambiente e contribuem para o agravamento do quadro da disposição de resíduos sólidos das áreas urbanas. Assim, devem ser buscadas soluções que minimizem os volumes de resíduos e seu potencial poluidor e, principalmente, que permitam sua reciclagem e/ou reaproveitamento (BRASIL, 2010; GRULL, 2013).

Como o lodo de esgoto possui elevado teor de umidade e é concentrador de microrganismos indicadores de contaminação fecal, com risco potencial da presença de patogênicos (ANDREOLI *et al.*, 2001), faz-se necessário seu desaguamento e higienização quando há pretensão da reciclagem agrícola. Além disso, quanto menos água o material possuir, menores serão o volume de material a ser manejado e seus respectivos custos de disposição, e mais facilitados serão o transbordo e a aplicação do material no campo. Por isso, o tratamento térmico do lodo tem sido apontado como uma solução para aprimorar o processo de gerenciamento do lodo (CHEN *et al.*, 2015; AMARAL *et al.*, 2018).

Esse método consiste em submeter o lodo a uma fonte de calor, de modo a evaporar a umidade nele contida e alcançar inativação dos microrganismos patogênicos, sem a incorporação de produtos químicos (ANDREOLI *et al.*, 2001; CHEN *et al.*, 2015). Para que seja considerado higienizado, no Estado do Paraná, a Resolução da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) nº 21/2009 estabelece a manutenção do lodo a uma temperatura mínima de 70°C, por pelo menos 30 minutos (SEMA, 2009). De fato, Passamani *et al.* (2000) observaram em laboratório que essas condições são suficientes para inativar ovos de helmintos presentes no lodo. Contudo, segundo Hindiyeh (1995), é possível higienizar o lodo com temperatura de 54°C, desde que seja mantida essa temperatura por pelo menos 2 horas.

A energia requerida para o tratamento térmico do lodo é um fator crítico para a sua viabilidade. Por isso, estudos têm sido realizados com foco na eficiência energética do processo e na utilização do biogás gerado na própria ETE como fonte de calor, sobretudo quando a rota de tratamento de esgoto é

anaeróbia (LOBATO *et al.*, 2012; AMARAL *et al.*, 2018; POSSETTI *et al.*, 2015, 2019). Em alguns casos, no entanto, a energia química proveniente do biogás pode ser insuficiente para processar termicamente todo o lodo gerado em uma ETE. Nesses casos, a energia solar, por estar prontamente disponível, pode ser empregada como fonte complementar (WAGNER *et al.*, 2015).

O tratamento térmico do lodo está bem consolidado na literatura, inclusive com a disponibilidade comercial de equipamentos. No entanto, seu emprego no Brasil em escala plena ainda é incipiente (POSSETTI *et al.*, 2019) e sua aplicação em ETEs de pequeno porte normalmente não se viabiliza (VALENTE, 2015; CERQUEIRA, 2019). Observa-se carência de soluções específicas e simplificadas para ETEs que atendem até 30 mil habitantes, consideradas de pequeno porte (SEMA, 2009), que são maioria no país e apresentam logísticas, recursos humanos e disponibilidades financeiras peculiares.

A literatura reporta alguns estudos em escala piloto e/ou de demonstração para sistemas térmicos de tratamento de lodo simplificados aplicáveis a ETEs de pequeno porte (RIETOW *et al.*, 2018). Basicamente, há relatos de três configurações de sistemas:

- i. Leito de secagem convencional seguido de leito aquecido para higienização (POSSETTI *et al.*, 2012; WAGNER *et al.*, 2015; GONTIJO *et al.*, 2017);
- ii. Tanque aquecido para higienização seguido de leito de secagem convencional (BORGES *et al.*, 2009);
- iii. Leito de secagem modificado que promove secagem e higienização simultaneamente (ANDREOLI *et al.*, 2002; FERREIRA *et al.*, 2003).

Cada uma dessas configurações possui características próprias, apresentando vantagens e desvantagens dos pontos de vista financeiro, social, ambiental, de segurança e de simplicidade operacional. A configuração (i), especialmente, tem se destacado por demandar poucas modificações nas rotinas operacionais da ETE e menor área para a construção do leito de higienização. Destaca-se, contudo, que esses estudos tipicamente não abordam a aplicação dos conceitos neles validados para escala plena e que ainda restam dúvidas sobre os parâmetros técnicos que devem ser adotados no dimensionamento de sistemas aptos a tratar termicamente todo o lodo gerado em uma ETE de pequeno porte. Além disso, os estudos associados com a configuração (i) abordam fundamentalmente o desempenho de sistemas carregados com lodo anaeróbio contendo cerca de 20% de teor de sólidos totais (ST).

Isso posto, este artigo apresenta a proposição de um sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto em escala plena, alimentado por biogás e energia solar, para uma ETE de pequeno porte, tendo como base a configuração (i). Para subsidiar o pré-dimensionamento do referido sistema, inicialmente, caracterizou-se a ETE a partir de suas condições operacionais e de projeto, determinando-se os volumes mensais de lodo, biogás e metano disponíveis. Além disso, realizaram-se três experimentos em escala reduzida e que determinaram o desempenho do sistema proposto em condições inéditas de carregamento de lodo (5 e 40% de ST, com espessuras de 10 e 20 cm) sobre dois diferentes pisos radiantes (metálico e de concreto).

METODOLOGIA

Para a elaboração da proposta em questão, cumpriram-se basicamente três etapas:

- i. Caracterização preliminar da ETE, visando determinar os volumes mensais disponíveis de lodo, biogás e metano;

- ii. Realização de experimentos em escala reduzida, com o intuito de avaliar o desempenho do sistema térmico de tratamento de lodo proposto em diferentes condições de carregamento de lodo e visando comparar os resultados com aqueles disponíveis na literatura para sistemas similares;
- iii. Pré-dimensionamento do sistema térmico de tratamento de lodo para a ETE como um todo.

Os estudos foram realizados em uma ETE de pequeno porte (população de projeto de 30 mil habitantes e vazão nominal de projeto de 70 L.s⁻¹), que possui as seguintes operações unitárias: elevatória, gradeamento, desarenador, calha *Parshall*, reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e filtro anaeróbio. O lodo retirado do processo é desaguado em leitos de secagem convencionais e, na sequência, é encaminhado para uma unidade de gerenciamento de lodo localizada em outra ETE, onde é misturado com a cal e permanece armazenado até sua destinação final na agricultura.

Inicialmente, mensuraram-se a vazão e a demanda química de oxigênio (DQO) do esgoto bruto, determinando-se suas médias mensais. Os dados referentes às vazões de esgoto foram obtidos por meio de registros operacionais medidos por macromedidor ultrassônico instalado junto a calha *Parshall*, cujos dados foram coletados diariamente, a cada 10 minutos, por um equipamento tipo *datalogger* (N=6.489). Já a DQO foi mensurada semanalmente em laboratório a partir de uma amostra composta (N=64).

A partir desses dados, verificou-se o percentual médio de utilização da capacidade de tratamento da ETE. Adicionalmente, estimou-se o volume médio mensal de lodo produzido na ETE, conforme sugerido por Chernicharo (2007), adotando-se o coeficiente de produção de sólidos (Y) igual a 0,10 kgSST kgDQO_{aplicada}⁻¹ e 5% de ST. Já para a estimativa dos volumes médios mensais de biogás e de metano produzidos no reator UASB, empregou-se o programa computacional ProBio 1.0 (PROBIO, 2015), considerando o cenário típico caracterizado por condições intermediárias de concentração do esgoto, presença de

sulfato e boa eficiência de remoção de DQO (LOBATO, 2011). A quantidade de energia química disponível na forma de gás na ETE foi calculada adotando-se poder calorífico inferior de 9,9 kWh/Nm³ de metano.

Amostras do lodo esgoto foram coletadas logo após o seu descarte nos leitos de secagem da ETE, antes de sua higienização, sendo utilizadas para realização de experimentos em escala reduzida. Realizou-se a caracterização microbiológica dessas amostras, determinando-se: coliformes termotolerantes, pela técnica de tubos múltiplos, empregando o meio A-1, seguindo como protocolo o método 1681 – *Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple Tube Fermentation using A-1 medium* (EPA, 2006); e ovos viáveis de helmintos, por meio da avaliação de ovos viáveis de *Ascaris spp.*, de acordo com a técnica de centrifugo-flutuação, a partir de protocolo estabelecido pela norma técnica L5.551, CETESB (2013). Adicionalmente, amostras de lodo de esgoto após um ciclo de desaguamento nos leitos de secagem (~30 dias) também foram coletadas para a realização de experimentos em escala reduzida. Os teores de ST das amostras de lodo também foram determinados a partir do método gravimétrico, resultando em ~5% ST para o lodo logo após o seu descarte no leito de secagem e ~40% ST para o lodo após um ciclo de desaguamento no leito de secagem.

Para a realização dos experimentos em escala reduzida, empregaram-se dois protótipos de sistema térmico de tratamento de lodo. Efetivaram-se três campanhas experimentais com as seguintes configurações e condições de cargas de lodo:

- Campanha 1: somente protótipo com piso radiante metálico, com lodo contendo ~5% ST e disposto em camada com espessura de 20 cm;
- Campanha 2: somente protótipo com piso radiante metálico com lodo contendo ~40% ST e disposto em camada com espessura de 10 cm;
- Campanha 3: protótipos com piso radiante metálico e de concreto, com lodo contendo ~5% ST e disposto em camada com espessura de 10 cm.

Na Figura 1A, é apresentado o protótipo utilizado nas três campanhas experimentais, com o piso radiante confeccionado em aço inoxidável e área

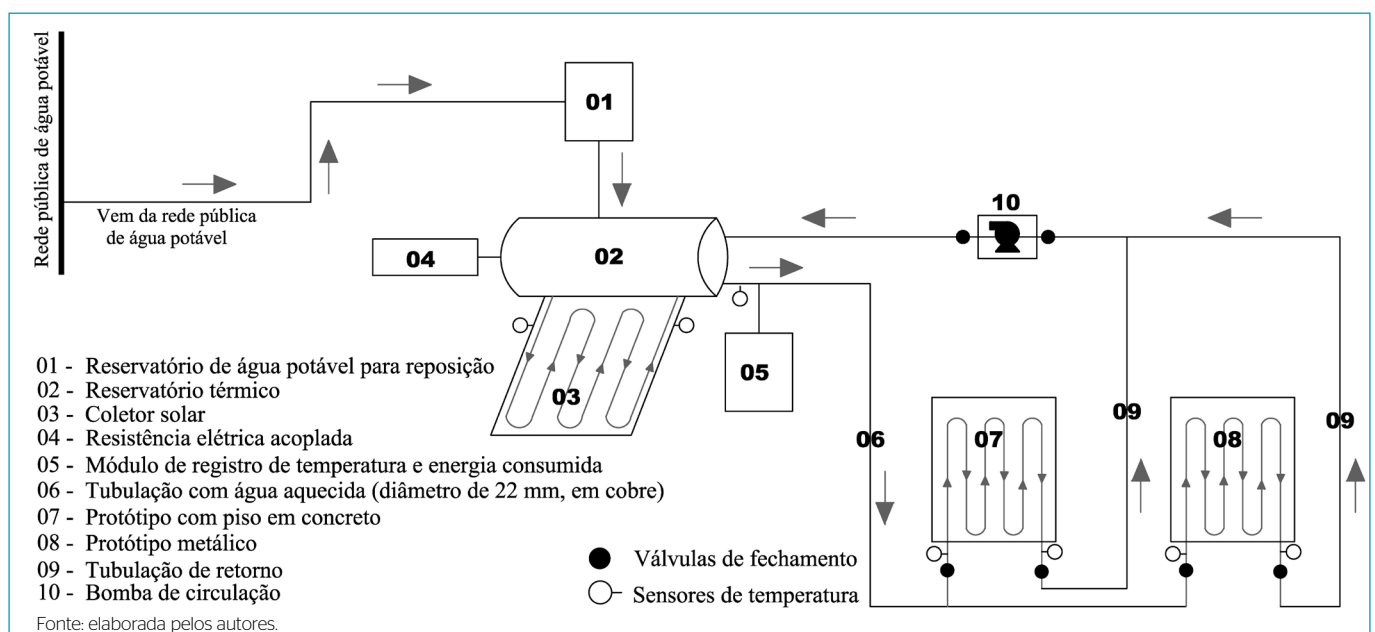


Figura 1 - Desenhos esquemáticos (A) do protótipo com piso radiante metálico, (B) do protótipo com piso radiante metálico e (C) da estrutura de aquecimento dos protótipos empregados nos experimentos em escala reduzida.

de 0,80 m² (1,00×0,80 m). Na Figura 1B, é ilustrado o protótipo utilizado apenas na terceira campanha experimental, com piso radiante em concreto e área de 1,00 m² (1,00×1,00 m). Os protótipos possuem serpentina com tubos de cobre de 15 mm, por onde circula água aquecida para transferência de calor. Na Figura 1C, é apresentado o desenho esquemático da estrutura de funcionamento de todo o sistema de aquecimento dos dois protótipos. Nesse arranjo, a água é enviada a um reservatório com capacidade de 200 L, aquecida diretamente por energia solar, via 15 tubos a vácuo, que direcionam a água aquecida novamente ao reservatório por meio de termossifão. A água aquecida é enviada aos protótipos com o auxílio de uma bomba e tubos de cobre de 22 mm, retornando ao reservatório térmico após trocar calor nas serpentinas, não havendo consumo adicional de água. Para que o sistema trabalhasse em pressão baixa e sem ebulição da água, adotou-se temperatura de 90°C, e quando a energia solar não é suficiente para a elevação da temperatura, aciona-se a resistência elétrica acoplada ao reservatório, sendo possível mensurar a energia complementar e verificar a equivalência com o volume de metano necessário para tal.

Os protótipos possuem sensores analógicos para monitoramento da temperatura da água na entrada e na saída das serpentinas, sensores de temperatura na entrada e na saída do coletor solar, e no ponto de consumo do reservatório térmico.

Para medição das temperaturas das amostras de lodos avaliadas, empregaram-se sensores termopares tipo T, com limite de erro de $\pm 1^\circ\text{C}$, conectados a um módulo automático de aquisição e registro de dados. Os termopares foram inseridos no lodo em pontos e alturas diferentes, conforme apresentado na Tabela 1.

Para evitar a dispersão de calor e manter o teor de umidade, os protótipos foram cobertos com lona plástica por três dias (ciclo de higienização), e registrou-se a evolução da temperatura a partir dos termopares. Realizaram-se ainda o monitoramento e o registro das temperaturas na saída do reservatório, entrada e saída do(s) protótipo(s), entrada e saída do sistema de aquecimento em circuito fechado, temperatura ambiente e consumo de energia complementar; ao final de três dias, a cobertura do(s) protótipo(s) foi removida e manteve-se o aquecimento (ciclo de secagem). No restante do tempo, monitorou-se a espessura da camada de lodo depositada sobre os pisos radiantes, os teores de ST do lodo e a energia complementar consumida durante o ciclo de secagem.

A energia fornecida pelo sistema solar, bem como pela resistência elétrica, foi mensurada e comparada com o volume de metano produzido na ETE estudada.

Os resultados obtidos nos experimentos em escala reduzida, sobretudo durante o período com cobertura plástica (ciclo de higienização do lodo),

foram comparados com aqueles reportados na literatura para sistemas similares. Dessa forma, os parâmetros comparados foram: área e tipo de piso radiante (metálico ou concreto), espessura da camada de lodo sobre os protótipos, temperaturas médias e máximas da massa de lodo próximas à superfície, tempo e energia consumidos, e metano equivalente. O lodo foi considerado higienizado no momento em que atingiu temperatura de 70°C, permanecendo nessa temperatura por mais 30 minutos, ou quando atingiu 54°C, permanecendo nessa temperatura por mais 2 horas. Esses parâmetros foram usados para o cômputo da energia necessária para a higienização do lodo.

Após a retirada da cobertura plástica, período em que a massa de lodo começou a secar (ciclo de secagem do lodo), foram comparados os seguintes parâmetros: área e tipo de piso radiante (metálico ou concreto), espessura da camada de lodo sobre o protótipo, ST no início e no fim dessa etapa, taxa de sólidos no piso (kg.m⁻²), utilizando densidade do lodo igual a 1.020 kg m⁻³, considerando ausência de alterações até o teor de ST de 55% (MORETTO *et al.*, 2017), área necessária por kg de ST, tempo de secagem, energia consumida e metano equivalente. Descreveram-se também as massas iniciais de lodo, discriminando sólidos e água, a massa total de água evaporada e o consumo de energia por kg de água evaporada.

Os parâmetros obtidos em escala reduzida foram extrapolados visando à implementação em escala plena, a partir de análises das principais características dos processos de tratamento de lodo, incluindo as vantagens e desvantagens inerentes a uma ETE de pequeno porte. Assim, elaborou-se um quadro comparativo de alternativas, incluindo também experimentos de outros autores, e atribuiu-se de um até três sinais positivos para cada um dos parâmetros selecionados, em que, quanto mais sinais positivos, mais favorável é a alternativa em relação às demais.

A partir do resultado apresentado no quadro comparativo, realizou-se o pré-dimensionamento da alternativa mais favorável, dentre as investigadas, para a ETE em questão, considerando sua capacidade nominal de projeto.

A partir dos tempos de higienização e secagem do lodo observados nos experimentos em escala reduzida, definiu-se o número de ciclos ou bateladas a serem executadas mensalmente na ETE e determinou-se o volume médio mensal de metano necessário.

Para suprir as oscilações de geração de biogás no reator UASB, adotou-se um gasômetro para armazenamento, baseado nas orientações do *Guia de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto* (SILVEIRA *et al.*, 2015), o qual foi dimensionado para atender por 8 horas o

Tabela 1 - Posição dos termopares nos sistemas piloto nas três campanhas experimentais realizadas.

Termopar	Campanha 1	Campanha 2	Campanha 3
T1	16 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo de concreto
T2	11 cm do fundo do protótipo metálico	5 cm do fundo do protótipo metálico	5 cm do fundo do protótipo de concreto
T3	11 cm do fundo do protótipo metálico	9 cm do fundo do protótipo metálico	9 cm do fundo do protótipo de concreto
T4	11 cm do fundo do protótipo metálico/6,5 cm do fundo do protótipo após dois dias	5 cm do fundo do protótipo metálico	9 cm do fundo do protótipo metálico
T5	16 cm do fundo do protótipo metálico	5 cm do fundo do protótipo metálico	5 cm do fundo do protótipo metálico
T6	16 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo de concreto
T7	11 cm do fundo do protótipo metálico/6,5 cm do fundo do protótipo após um dia	3 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo metálico
T8	16 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo metálico	3 cm do fundo do protótipo metálico

déficit entre a demanda média e a situação de menor produção de biogás na ETE, considerada como 40% menor que aquela associada com o volume médio mensal de metano estimado em condições típicas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização preliminar da estação de tratamento de esgoto estudada

A Tabela 2 sumariza os principais parâmetros médios inerentes à ETE estudada. A vazão operacional média ($35,10 \text{ L.s}^{-1}$) corresponde a cerca de 50,14% da capacidade nominal disponível (70 L.s^{-1}). A DQO do esgoto na entrada está de acordo com os valores verificados na literatura (CHERNICHARO, 2007) para esgoto de origem doméstica.

Considerando a vazão média afluente de $3.032,64 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ ($35,10 \text{ L.s}^{-1}$) e a DQO de entrada de $592,48 \text{ mg.L}^{-1}$, de acordo com Chernicharo (2007), tem-se que a carga média de DQO aplicada ao sistema (CO_{DQO}) é de $1.795,32 \text{ kgDQO dia}^{-1}$, a produção de sólidos no sistema (P_{lodo}) é de $179,53 \text{ kgSST dia}^{-1}$ e a produção volumétrica de lodo (V_{lodo}) é de $3,52 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ ($105,5 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$). Extrapolando-se a operação da ETE para a capacidade nominal de 70 L.s^{-1} ($6.048 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$), a produção estimada de lodo torna-se igual a $211 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$.

Os volumes médios mensais de biogás e de metano estimados, por sua vez, para a capacidade nominal de tratamento da ETE foram iguais a $15.540 \text{ Nm}^3 \text{ mês}^{-1}$ ($518 \text{ Nm}^3 \text{ dia}^{-1}$) e $11.640 \text{ Nm}^3 \text{ mês}^{-1}$ ($388 \text{ Nm}^3 \text{ dia}^{-1}$), respectivamente. Esses volumes representam uma energia química média disponível mensalmente para conversão em calor para aquecimento do lodo de $116.490 \text{ kWh mês}^{-1}$.

As análises microbiológicas do lodo bruto descartado nos leitos de secagem da ETE resultaram em $2.541,72 \text{ NMP g ST}^{-1}$ de coliformes termotolerantes e $8,80 \text{ ovos g ST}^{-1}$ de ovos viáveis de helmintos, indicando a necessidade de higienização do material antes de sua utilização para fins agrícolas. Isso porque esses valores estão acima daqueles constantes na Resolução SEMA n° 021/2009, que considera o lodo higienizado caso tenha menos que $1.000 \text{ NMP g ST}^{-1}$ de coliformes termotolerantes e menos que $0,25 \text{ ovos g ST}^{-1}$ de ovos viáveis de helmintos.

Experimentos para avaliação dos sistemas térmicos de tratamento do lodo em escala reduzida

Os resultados das três campanhas experimentais realizadas nos protótipos com o lodo anaeróbio da ETE são apresentados na Tabela 3.

Na Figura 2, é apresentada a evolução da temperatura na massa de lodo na primeira campanha. Aproximadamente 8,4 horas após o início de operação

do sistema, a massa de lodo atingiu sua temperatura de saturação (entre 40 e 50°C). Após a estabilização, as temperaturas médias registradas na massa de lodo próximo à superfície foram $45,7$, $44,6$, $45,8$ e $44,7^\circ\text{C}$ (termopares T1, T5, T6 e T8), e em nenhum momento superou 54°C , valor mínimo necessário para a higienização (HINDIYEH, 1995). A temperatura máxima registrada na região desses termopares foi de $48,6^\circ\text{C}$ (termopares T1, T6 e T8). Nesse período com cobertura, após a estabilização, as temperaturas médias registradas próximo à metade da altura da massa de lodo foram $48,1$ e $46,2^\circ\text{C}$ (termopares T2 e T3).

Já os termopares T4 e T7, inicialmente posicionados próximos à metade do lodo, durante o período com cobertura, foram reposicionados, e o T7 foi baixado até o fundo, em que se registrou 83°C , e depois ficou a aproximadamente 1/3 da altura da massa de lodo. O T4 foi baixado até o fundo do protótipo, registrando-se $85,4^\circ\text{C}$, e depois ficou a $6,50 \text{ cm}$ da superfície de fundo do protótipo. Nessa nova posição, os termopares T4 e T7 registraram temperaturas médias de $64,4$ e $59,2^\circ\text{C}$, respectivamente.

Ao final do terceiro dia, retirou-se a lona plástica que era mantida sobre o protótipo, sendo continuado o aquecimento da massa de lodo e, por cerca de 21 dias, monitorou-se a secagem, baixando-se os termopares em razão da redução da camada de lodo, que passou de 20 para 2,5 cm. O volume inicial de lodo, que era de aproximadamente 160 L, passou para, aproximadamente, 20 L, atingindo percentual de 76,44% de ST. Esse comportamento temporal de variação de temperaturas e dos teores de sólidos em função dos ciclos de higienização (com cobertura) e secagem do lodo (sem cobertura) também se verificaram nos experimentos relatados por Possetti *et al.* (2012), Wagner *et al.* (2015) e Gontijo *et al.* (2017). No entanto, para os experimentos registrados na literatura com lodo contendo ~20% ST, as temperaturas sempre estiveram acima dos valores mínimos necessários para a higienização, ao menos quando a espessura da camada de lodo também era de 20 cm (GONTIJO *et al.*, 2017).

Na Figura 3, é ilustrada a evolução da temperatura na massa de lodo durante quatro dos 11 dias da segunda campanha. A temperatura foi estabilizada, e aproximadamente 23 horas após o início de operação do sistema, atingiu-se 54°C , ou seja, o mínimo necessário para higienização (HINDIYEH, 1995). Considerou-se como tempo de higienização as 23 horas iniciais, acrescidas de 2 horas após a massa de lodo ter atingido 54°C (das 23 às 25 horas após o início dos experimentos), em que a temperatura média registrada foi de $54,7^\circ\text{C}$ e a máxima, $55,4^\circ\text{C}$ (termopar T3). Nos termopares T2, T4 e T5, fixados próximos à metade da massa de lodo, nas 2 horas, foram registradas temperaturas médias de $64,0$, $62,5$ e $59,4^\circ\text{C}$, respectivamente. Enquanto nos termopares T1, T6, T7 e T8, posicionados a 3 cm do fundo, registraram-se temperaturas médias, nas 2 horas, de $70,9$, $68,7$, $64,3$ e $69,5^\circ\text{C}$, respectivamente. No termopar T1 (próximo ao fundo), registrou-se $71,4^\circ\text{C}$.

Esses resultados apontam de forma positiva para o comportamento do lodo higienizado por via térmica nessa concentração de ST, bem como para considerável redução do volume de lodo, com consequente redução da área requerida para o processo. A partir do estudo de Andreoli *et al.* (2001), houve redução de 87,5% do volume de lodo, quando o material saiu de 5% de ST da primeira campanha para 40% de ST na segunda campanha.

Após o terceiro dia, retirou-se a lona plástica, manteve-se o aquecimento da massa de lodo e por quase oito dias monitorou-se a secagem. Observou-se que, depois de algum tempo, a aplicação de calor não resultava mais em alteração significativa no teor de ST do lodo, pois, em quatro dias, passou de 50,78 para 66,13%, e nos três dias seguintes, atingiu-se 70,86% de ST.

Tabela 2 - Parâmetros operacionais da estação de tratamento de esgoto estudada.

Parâmetro	Valores médios
Vazão de esgoto operacional (L.s^{-1})	35,10
DQO do esgoto afluente (mg.L^{-1})	592,48
Produção de lodo (5% ST) para capacidade nominal ($\text{m}^3 \text{ mês}^{-1}$)	211
Produção de biogás para capacidade nominal ($\text{Nm}^3 \text{ mês}^{-1}$)	15.540
Produção de metano para capacidade nominal ($\text{Nm}^3 \text{ mês}^{-1}$)	11.640
Energia química disponível para capacidade nominal (kWh mês^{-1})	116.490

DQO: demanda química de oxigênio; ST: sólidos totais.

Tabela 3 - Resumo das três campanhas experimentais realizadas em escala reduzida.

Campanha	Período total	Período com cobertura	Período sem cobertura	Tipo de protótipo	Lodo no protótipo		Temperatura ambiente inicial	Temperatura da água de circulação com energia solar	Temperatura da água de circulação com a resistência
					ST (%)	H (cm)			
1	24 dias	3 dias	21 dias	Metálico	5	20	20,0°C	52,6°C	90°C
2	11 dias	3 dias	8 dias	Metálico	40	10	27,1°C	66,2°C	90°C
3	10 dias	2,92 dias	7 dias	Metálico	5	10	33,9°C	54,7°C	90°C
				Concreto					

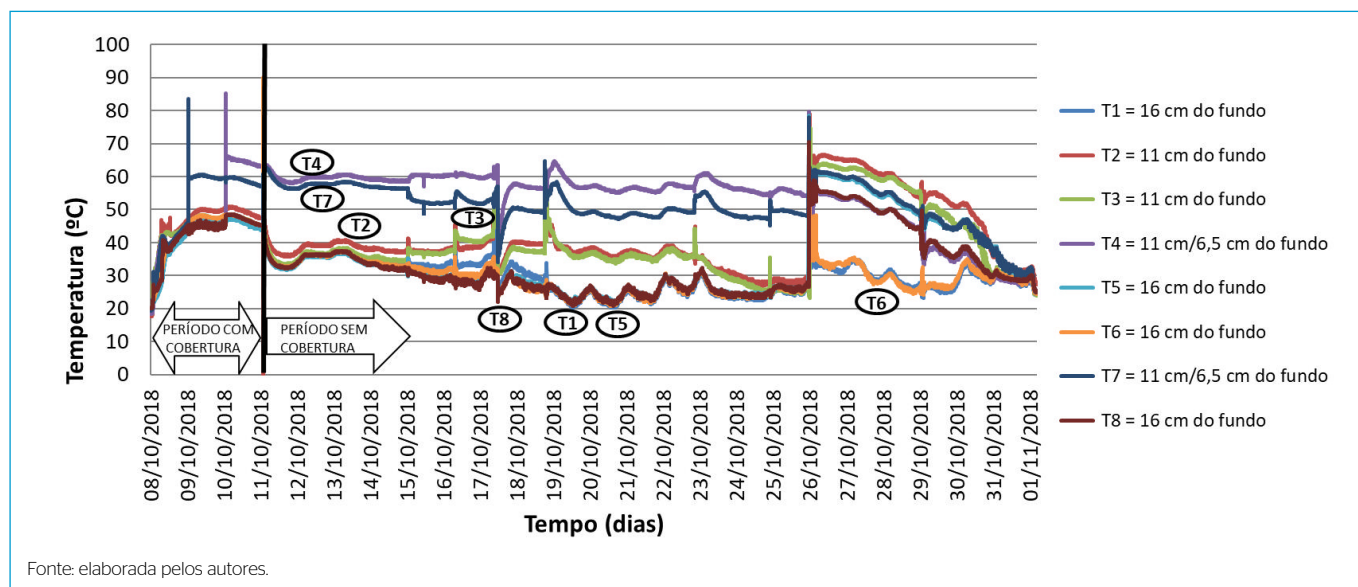


Figura 2 - Evolução da temperatura nos 24 dias da primeira campanha experimental.

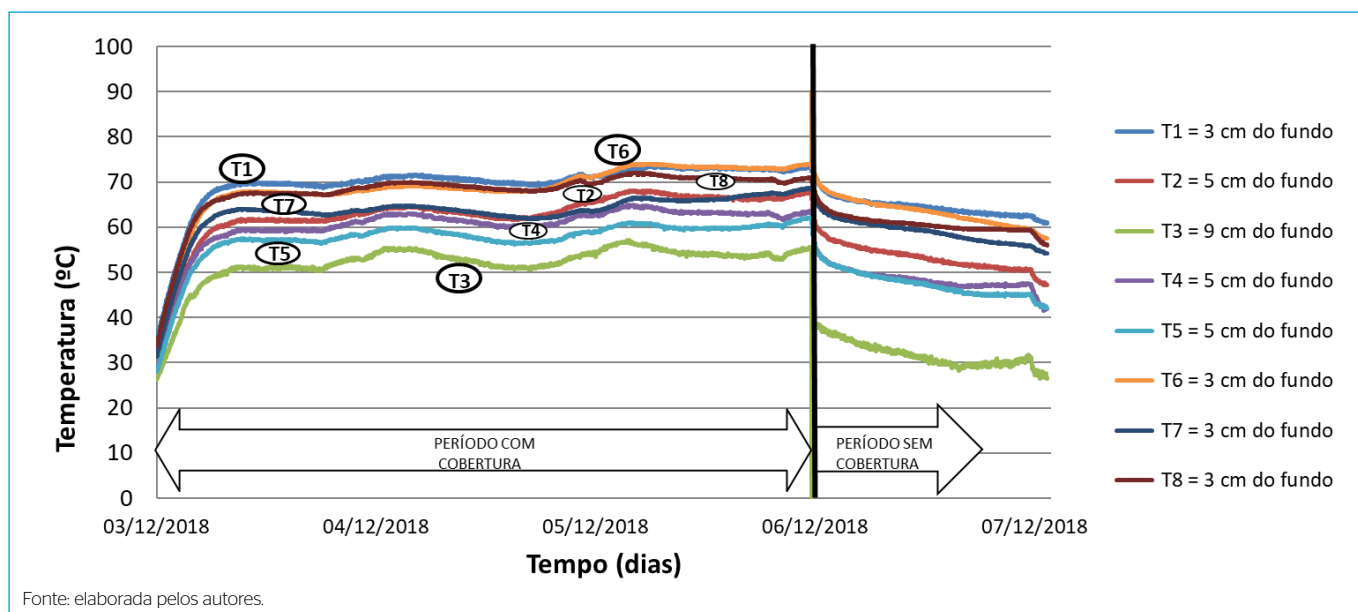


Figura 3 - Evolução da temperatura nos quatro primeiros dias da segunda campanha.

Nas Figuras 4 e 5, são apresentadas as evoluções da temperatura na massa de lodo, nos protótipos em concreto e metálico, respectivamente, ao longo da terceira campanha experimental. As temperaturas registradas na massa de lodo disposta no protótipo metálico foram maiores que aquelas obtidas no protótipo

com fundo em concreto, ou seja, a capacidade de transmissão de calor para a massa líquida foi maior no protótipo metálico, demonstrando que a difusividade térmica dos materiais é essencial para o dimensionamento de equipamentos (ÇENGEL *et al.*, 2012).

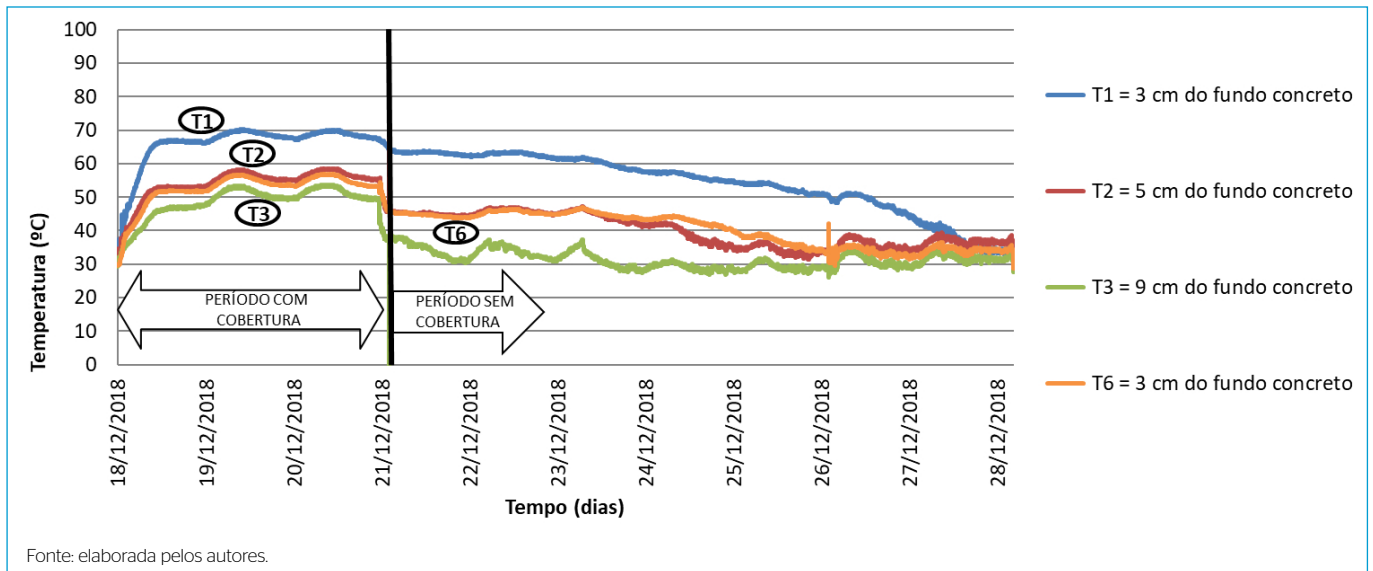


Figura 4 - Evolução da temperatura no protótipo com piso em concreto, nos dez dias da terceira campanha.

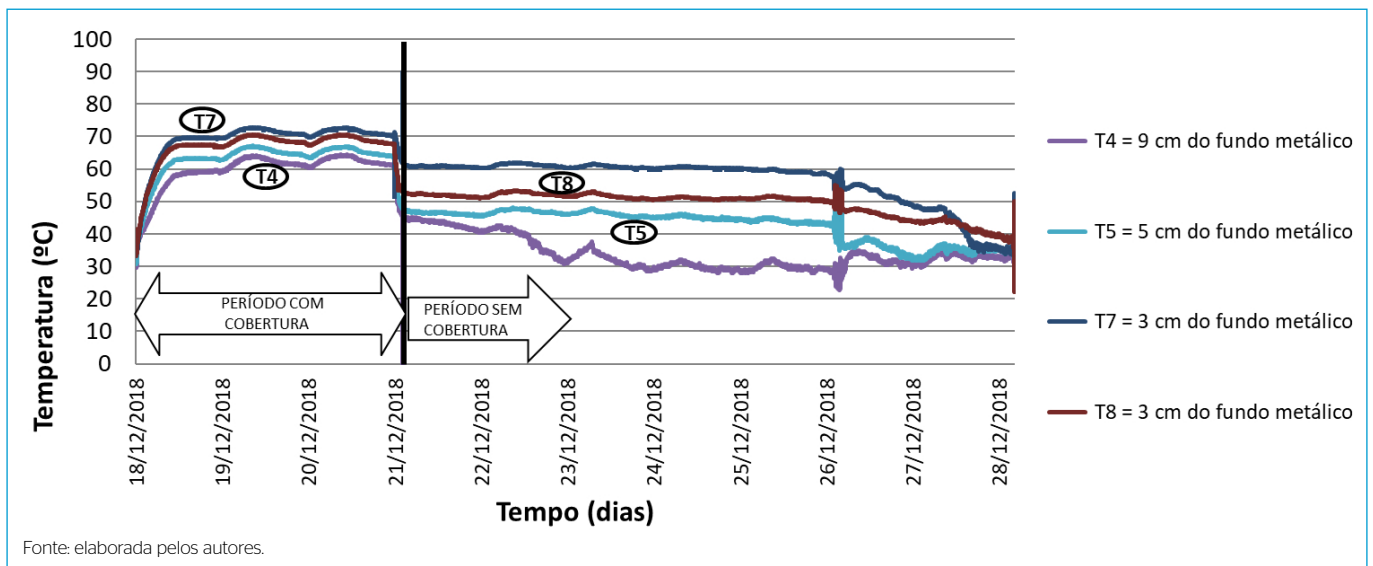


Figura 5 - Evolução da temperatura no protótipo metálico, nos dez dias da terceira campanha.

Para o protótipo com piso de concreto (Figura 4), aproximadamente 9,4 horas após o início de operação do sistema, a massa de lodo atingiu temperatura de saturação. Após a estabilização, as temperaturas médias registradas, em que estavam fixados os termopares T1, T2, T3 e T6, foram de 68,1, 55,3, 49,7 e 53,9°C, respectivamente, e as temperaturas máximas alcançadas, 70,3, 58,6, 53,8 e 57°C, respectivamente. Observou-se que no termopar T3 (próximo à superfície), mesmo com camada de lodo de 10 cm, não foi atingida a temperatura mínima de 54°C, necessária para a higienização (HINDIYEH, 1995).

Já no protótipo metálico (Figura 5), observou-se que aproximadamente 9,43 horas após o início de operação do sistema, o valor mínimo de temperatura de 54°C foi alcançado, e assim como na segunda campanha, embora o período com cobertura tenha durado 2,92 dias, considerou-se como 9,43 horas o tempo de higienização, acrescidas das 2 horas após a massa de lodo ter atingido o 54°C (das 9:43 às 11:43 horas após o início dos testes). Nas 2 horas, as

temperaturas médias registradas na massa de lodo, em que estavam fixados os termopares T4, T5, T7 e T8, foram de 55,6, 60,9, 67,1 e 65,2°C, respectivamente, e as temperaturas máximas, 57,1, 62,0, 68,3 e 66,3°C, respectivamente. Após 11,43 horas, as temperaturas continuaram estabilizadas, alcançando-se, em T4, T5, T7 e T8, as temperaturas de 64,4, 67,1, 72,8 e 70,5°C, respectivamente.

Ao final de 2,92 dias, retiraram-se as lonas plásticas dos protótipos, sendo mantido o aquecimento das massas líquidas de lodo por mais sete dias, acompanhando-se a secagem. No caso do protótipo com piso radiante de concreto, atingiu-se percentual de 77,02% de ST.

Comparação dos experimentos realizados com outras pesquisas

Os dados referentes aos ciclos de higienização e de secagem de lodos nas três campanhas experimentais foram comparados com aqueles obtidos em outras

pesquisas realizadas com lodo contendo 20% de ST (WAGNER *et al.*, 2015; GONTIJO *et al.*, 2017), e estão sumarizados nos Tabela 4 e 5, respectivamente.

Com base nos resultados em escala reduzida e nos autores citados nos Tabela 4 e 5, elaborou-se o Tabela 6, com o comparativo das alternativas estudadas, considerando-se aspectos construtivos, de eficiência e operacionais e os dados da ETE estudada.

Em relação aos parâmetros alcance das temperaturas e tempo de higienização, aqueles que proporcionaram a higienização nos protótipos foram considerados mais favoráveis.

Quanto à necessidade de equipamentos adicionais para desaguamento, como centrífugas ou leitos de secagem, lodos com percentual de 5% de ST foram considerados mais favoráveis que aqueles com percentuais de ST nas faixas de 20 e 40%.

Em relação à área do piso radiante, extrapolaram-se os valores dos protótipos para os volumes reais de lodo nas diferentes concentrações de ST estudadas e observou-se que a área requerida para higienização do lodo a 40% de ST foi de 12,5% da requerida para o lodo com 5% de ST. Quanto menos energia requerida, mais favorável é o sistema, e para a autonomia energética do biogás,

Tabela 4 – Comparações dos resultados obtidos com dados registrados na literatura para os protótipos cobertos (ciclo de higienização).

Autor	Característica da pesquisa (%ST e tipo de piso)	Espessura da camada de lodo no protótipo (cm)	Área do piso (m ²)	Etapa em cada trabalho (campanha)	Temperatura média na massa de lodo no ponto mais desfavorável (°C)*	Temperatura máxima na massa de lodo no ponto mais desfavorável (°C)	Tempo do processo de higienização (h)**	Alcançou temperatura mínima e tempo necessário? 70°C (30 min) ou 54°C (2h)	Energia consumida durante o tempo do processo de higienização (kW)	Metano total necessário na higienização (Nm ³)
Autores	5 concreto	10	1,0	3ª	49,3	53,8	70,16	Não	15,791	15,83
	5 metálico	10	0,8	3ª	55,6	61,0	11,72	Sim	25,07	2,51
	5 metálico	20	0,8	1ª	44,6	48,6	72,00	Não	128,98	12,93
Wagner <i>et al.</i> (2015)	20 concreto	10	1,0	1ª	64,3	65,6	26,00	Sim	71,29	7,15
	20 metálico	10	1,0	1ª	75,3	76,2	14,42	Sim	39,54	3,96
Gontijo <i>et al.</i> (2017)	20 metálico	10	0,8	1ª	55,8	-	11,00	Sim	15,13	1,52
	20 metálico	15	0,8	2ª	66,0	-	19,00	Sim	28,58	2,86
	20 metálico	20	0,8	3ª	53,0	-	68,25	Não	108,92	10,92
Autores	40 metálico	10	0,8	2ª	54,7	55,4	25,00	Sim	47,56	4,77

ST: sólidos totais; *média no período compreendido entre a estabilização da temperatura até o fim dos três dias, quando não se alcançaram as temperaturas mínimas; ou média no período compreendido entre o instante em que se atingiram as temperaturas mínimas mais o tempo recomendado (30 minutos para 70°C ou 2 horas para 54°C); **tempo compreendido entre o início da campanha até o limite de aproximadamente três dias quando não se alcançaram as temperaturas mínimas; ou tempo entre o início da campanha mais o tempo recomendado mantendo-se as temperaturas mínimas para higienização (30 minutos para 70°C ou 2 horas para 54°C).

Tabela 5 – Comparações dos resultados obtidos com dados registrados na literatura para os protótipos sem cobertura (ciclo de secagem).

Autor	Característica da pesquisa (% ST e tipo de piso)	Espessura da camada de lodo no protótipo (cm)	Área do piso (m ²)	Etapa em cada trabalho (campanha)	ST início da secagem (%)*	Taxa de sólidos no piso (kg/m ²)**	Área necessária (m ² /kg de ST)	Tempo do processo de secagem (h)	ST após processo de secagem (%)	Energia consumida no processo de secagem (kW)	Metano total necessário na secagem (Nm ³)	Massa inicial de lodo = água + sólidos (kg)	Massa inicial de sólidos (kg)	Massa inicial de água (kg)	Total de água evaporada durante a secagem (kg)	Consumo de energia por kg de água evaporada (kW/kg de água)
Autores	5 concreto	10	1,0	3ª	4,41	4,5	0,22	168	77,02	443	44,41	102,0	4,50	97,50	96,16	4,61
	5 metálico	10	0,8	3ª	4,41	4,5	0,22	168	49,07	443	44,41	81,6	3,60	78,00	74,27	5,97
	5 metálico	20	0,8	1ª	6,52	13,30	0,08	498	76,44	849	85,14	163,2	10,64	152,5	149,2	5,69
Wagner <i>et al.</i> (2015)	20 concreto	10	1,0	1ª	21,75	22,19	0,05	175	86,69	480	48,16	102,0	22,19	79,82	76,41	6,29
	20 metálico	10	1,0	1ª	19,21	19,59	0,05	175	88,07	480	48,16	102,0	19,59	82,41	79,75	6,02
Gontijo <i>et al.</i> (2017)	20 metálico	10	0,8	1ª	22,96	23,42	0,04	168	91,64	282	28,33	81,6	18,74	62,86	61,16	4,62
	20 metálico	15	0,8	2ª	20,26	31,00	0,03	169	41,32	284	28,49	122,4	24,80	97,60	62,38	4,56
	20 metálico	20	0,8	3ª	22,24	45,37	0,02	168	40,21	269	26,99	163,2	36,30	126,9	72,93	3,69
Autores	40 metálico	10	0,8	2ª	40,35	40,35	0,02	191	70,86	296	29,69	81,60	32,28	49,32	36,04	8,22

ST: sólidos totais; *embora o referencial das comparações sejam ST de 5, 20 e 40%, para a entrada na tabela, foi considerado o teor de sólidos inicial real dos testes; **utilizando densidade inicial do lodo como 1.020 kg.m³ (ANDREOLI *et al.*, 2001), considerando que esse valor sofre pouca variação até um teor de sólidos totais de aproximadamente 55% (MORETTO *et al.*, 2017).

Tabela 6 – Comparação entre as alternativas considerando-se aspectos construtivos, de eficiência e operacionais.

Parâmetro	ST 5% piso de concreto e = 10 cm	ST 5% piso metálico e = 10 cm	ST 5% piso metálico e = 20 cm	ST 20% piso concreto e = 10 cm	ST 20% piso metálico e = 10 cm	ST 20% piso metálico e = 10 cm	ST 20% piso metálico e = 15 cm	ST 20% piso metálico e = 20 cm	ST 40% piso metálico e = 10 cm
Alcance das temperaturas para higienização	+	+++	+	+++	+++	+++	+++	+	+++
Tempo de higienização	+	+++	+	++	+++	+++	++	+	++
Equipamentos adicionais para desaguamento	+++	+++	+++	+	+	+	+	+	++
Área do piso radiante	+	+	++	++	++	++	++	+++	+++
Energia para higienização	+	+++	+	++	++	+++	+++	+	++
Energia para secagem	+++	++	++	++	++	+++	+++	+++	+
Autonomia energética do biogás (teórica)	+	+	+	+	+	+	+++	+++	+++
Custo de investimento	+	+	+	++	++	++	++	++	+++
Custo de operação	+	+	+	++	++	++	++	++	+++
Manuseio do lodo	+++	+++	+++	+	+	+	+	+	++
Complexidade de operação	+	+	+	++	++	++	++	++	+++
Total	17	22	17	20	21	23	24	20	27

e: espessura da camada de lodo; +++: mais favorável; ++: intermediário; +: menos favorável.

comparou-se o valor estimado disponível na ETE (11.640 Nm³ mês⁻¹) com os valores requeridos para cada concentração de ST. Nesses casos, os lodos com percentuais de 20% de ST (15 e 20 cm de espessura) e 40% de ST (10 cm de espessura) foram considerados mais favoráveis.

No que tange à análise de custos de investimento e operação, considerou-se como mais favorável o processo que exigiu menores áreas e dispositivos acessórios. Em relação ao manuseio, o lodo com 5% de ST foi considerado mais favorável pela operação ser via descarga direta; entretanto, na concentração de 20% de ST, ele se torna menos favorável pela característica pastosa, quando comparado com a concentração de 40% de ST.

Quanto ao aspecto complexidade de operação, considerou-se menos favorável a higienização do lodo com 5% de ST em comparação ao lodo mais desaguado, tendo em vista a maior experiência prática dos operadores da ETE com lodos em teores mais elevados de ST.

Assim, o comparativo das alternativas mostradas na Tabela 6 indicou que o mais favorável para a implantação na ETE estudada deve ser um sistema com piso radiante metálico que receba camada de 10 cm de lodo com 40% de ST (após operação em leito de secagem).

Pré-dimensionamento do sistema térmico em escala plena para a estação de tratamento de esgoto estudada

De acordo com o estudo de Andreoli *et al.* (2001), para o descarte de 211 m³ mês⁻¹ de lodo nos leitos de secagem convencionais, quando a concentração de ST estiver em 40%, o volume será de 26,38 m³. Assim, para a camada de 10 cm de lodo depositado, a área mensal necessária é de 263,80 m².

Conforme os Tabela 4 e 5, o tempo para um ciclo de higienização será de 25 horas, e para a secagem até a concentração de 75% de ST, 191,75 horas, totalizando 216,25 horas ou nove dias. Dividindo-se a área mensal necessária de 263,80 m² em três ciclos mensais, tem-se uma área de 87,9 m² para cada ciclo.

Como a ETE investigada possui 12 leitos de secagem convencionais, cada um com 50 m² (5,0×10,0 m) de área, será necessário transformar dois desses leitos em tanques de higienização, resultando em 100 m² de área disponível

para cada batelada, admitindo-se adicional de 12,1% como fator de segurança. Na Figura 6, é apresentado o esquema proposto para os tanques de higienização e secagem do lodo da ETE estudada.

Os tanques aquecidos por meio de serpentinas com circulação de água quente deverão ter fundos e laterais metálicos acoplados na parte interna de dois leitos de secagem já existentes, com resistência mecânica capaz de suportar os esforços de colocação e retirada manual de lodo por meio de pás e carriolas. Para a higienização, esses tanques deverão ser cobertos com lonas que suportem as movimentações constantes de fechamento e abertura. Será necessária uma cobertura evitando a entrada de águas pluviais, pois os tanques não serão drenantes.

Considerando a instalação de um sistema solar capaz de elevar a temperatura da água até 66°C para a higienização e a continuidade da secagem de um volume médio mensal de lodo de 26,38 m³, serão necessários 11.363,19 Nm³ de metano. Na situação típica média de produção de metano nessa ETE, a disponibilidade teórica é de 11.640 Nm³ mês⁻¹, sendo, assim, autossuficiente para a operação do sistema proposto, desde que haja o sistema de aquecimento solar implantado.

Para cada ciclo, serão 3.787,73 Nm³ de metano, equivalente a 420,86 Nm³ dia⁻¹ ou, em média, 17,54 Nm³ h⁻¹. Prevendo que, em algum momento, a produção de metano seja 40% menor que aquela verificada na média para um cenário típico, a produção de metano será de 255 Nm³ dia⁻¹, equivalente a 10,63 Nm³ h⁻¹, gerando um déficit de 6,91 Nm³ de metano ou 9,87 Nm³ de biogás.

Adotando-se um período de 8 horas, ocorrerá um déficit de 78,96 Nm³ de biogás em relação à média. Para compensar essa oscilação, propôs-se um gasômetro não pressurizado, capaz de armazenar 80 m³ de biogás, tipo bolsa inflável. Quando o gasômetro estiver cheio, o excesso será enviado para um queimador. A presença do gasômetro também auxiliará na regularização de energia a ser fornecida para compensar as eventuais variações de desempenho do sistema de aquecimento solar, o qual criticamente depende das condições locais e sazonais de irradiância (WAGNER *et al.*, 2015).

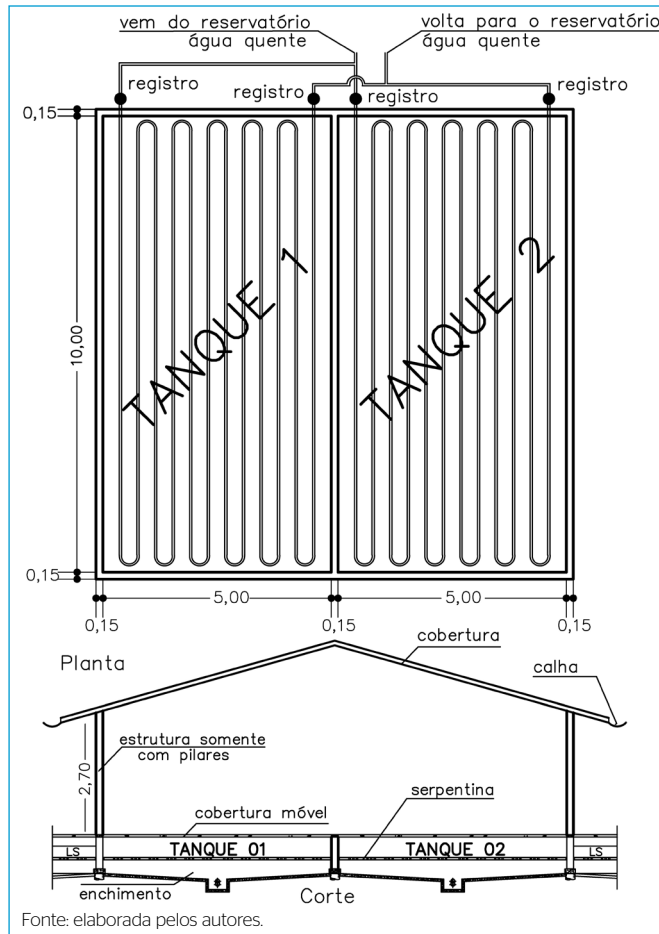


Figura 6 - Desenho proposto para os tanques de higienização e secagem do lodo para a estação de tratamento de esgoto investigada.

O fluxograma completo do sistema térmico de tratamento de esgoto proposto é apresentado na Figura 7. O biogás gerado no reator deverá ser purificado e armazenado no gasômetro. Antes do gasômetro, também haverá derivação (*by-pass*) para o queimador de emergência. O biogás armazenado será conduzido para o sistema térmico, conforme demanda requerida. Para segurança, deverão ser previstas válvulas corta-chamas, para proteção do gasômetro, instaladas antes do compressor e antes do queimador, e válvulas de alívio, para atuação em caso de sobrepressão (SILVEIRA *et al.*, 2015; POSSETTI *et al.*, 2019).

O aquecimento da água será por energia solar e por uma caldeira capaz de funcionar com o metano do biogás. A água aquecida circulará nas serpentinas dos tanques de higienização, retornando até a caldeira em um circuito fechado.

O lodo em excesso do reator será enviado, na forma de batelada, por gravidade, a leitos de secagem convencionais existentes na ETE, e quando alcançar a concentração de 40% de ST, deverá ser retirado manualmente e colocado nos tanques de higienização, destorroado e disposto em camadas de 10 cm. O tanque será coberto com lona acoplada a uma estrutura dinâmica de fechamento; a partir daí, será ligado o dispositivo, que, por meio da circulação ininterrupta de água quente nas serpentinas, permitirá que o lodo receba calor. Quando a massa de lodo atingir a temperatura mínima de 54°C, ainda permanecerá coberta por 2 horas, para, então, ser considerada higienizada (HINDIYEH, 1995), com permissão para remoção da cobertura. O sistema de aquecimento permanecerá ligado para continuidade da secagem. Atingindo-se 75% de ST, o lodo seguirá

a rotina de análises e destinação final agrícola, dispensando-se o transbordo para unidade de gerenciamento de lodo.

O volume calculado de lodo de 26,38 m³ mês⁻¹ refere-se à quantidade que será higienizada com redução posterior à etapa de secagem. Atualmente, com a higienização por meio da estabilização alcalina prolongada, ocorre aumento de cerca de 30 a 50% do volume final de lodo pela adição de cal (BITTENCOURT *et al.*, 2009; BITTENCOURT *et al.*, 2014). Em relação ao tempo total para higienização, é esperado que o tempo reduza dos atuais 30 dias para aproximadamente nove dias.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados reportados, pode-se concluir que:

- O sistema térmico aqui proposto é uma alternativa para higienizar e secar o lodo gerado na ETE investigada, a partir do uso do biogás e da energia solar disponíveis no local, podendo seu conceito ser replicado em outras ETEs de pequeno porte com características similares;
- A infraestrutura existente na própria ETE pode ser utilizada para a implantação do sistema térmico de tratamento do lodo proposto, demandando para tal a adaptação de dois dos 12 leitos de secagem disponíveis e a aquisição de componentes para recuperação, tratamento e armazenamento do biogás, para uso da energia solar e para transferência de calor para o lodo;
- Entre as configurações do sistema térmico estudadas, apenas duas não atingiram temperaturas compatíveis para a higienização do lodo: piso radiante metálico, carregado com lodo contendo 5% ST e disposto em camada com 20 cm de espessura; e piso radiante de concreto, carregado com lodo contendo 5% ST e 10 cm de espessura;
- Em relação à secagem do lodo, todas as configurações de sistema térmico estudadas permitiram valores de ST elevados em tempos menores que aqueles comumente verificados em ETEs de pequeno porte, que empregam leitos de secagem convencionais;
- A comparação dos resultados obtidos a partir dos experimentos em escala reduzida, quando extrapolados para a escala plena, indica que a alternativa mais favorável, entre aquelas avaliadas, a ser implantada na ETE investigada é a de um sistema com piso radiante metálico, carregado com lodo após o seu prévio desaguamento em leito de secagem (40% de ST) e depositado sobre o tanque de higienização em uma camada com espessura de 10 cm;
- O pré-dimensionamento da ETE estudada resultou em um sistema térmico de tratamento do lodo composto de dois tanques metálicos com 50 m² de piso radiante, cada um funcionando com três ciclos mensais de higienização e secagem, com duração de nove dias;
- Os volumes mensais de biogás e de metano gerados na ETE, quando convertidos em calor, associados ao pré-aquecimento com energia solar, são suficientes para atender a demanda de energia térmica do sistema proposto, sendo o gasômetro um componente importante para regularizar eventuais variações de disponibilidade energética;
- O sistema térmico de tratamento de lodo proposto é uma alternativa ao processo de higienização via estabilização alcalina prolongada, dispensando o uso de produto químico, reduzindo em cerca de 70% o tempo tipicamente necessário para higienizar o material, aumentando o teor de ST do lodo para até 75% e, conseqüentemente, minimizando o volume do material para disposição final.

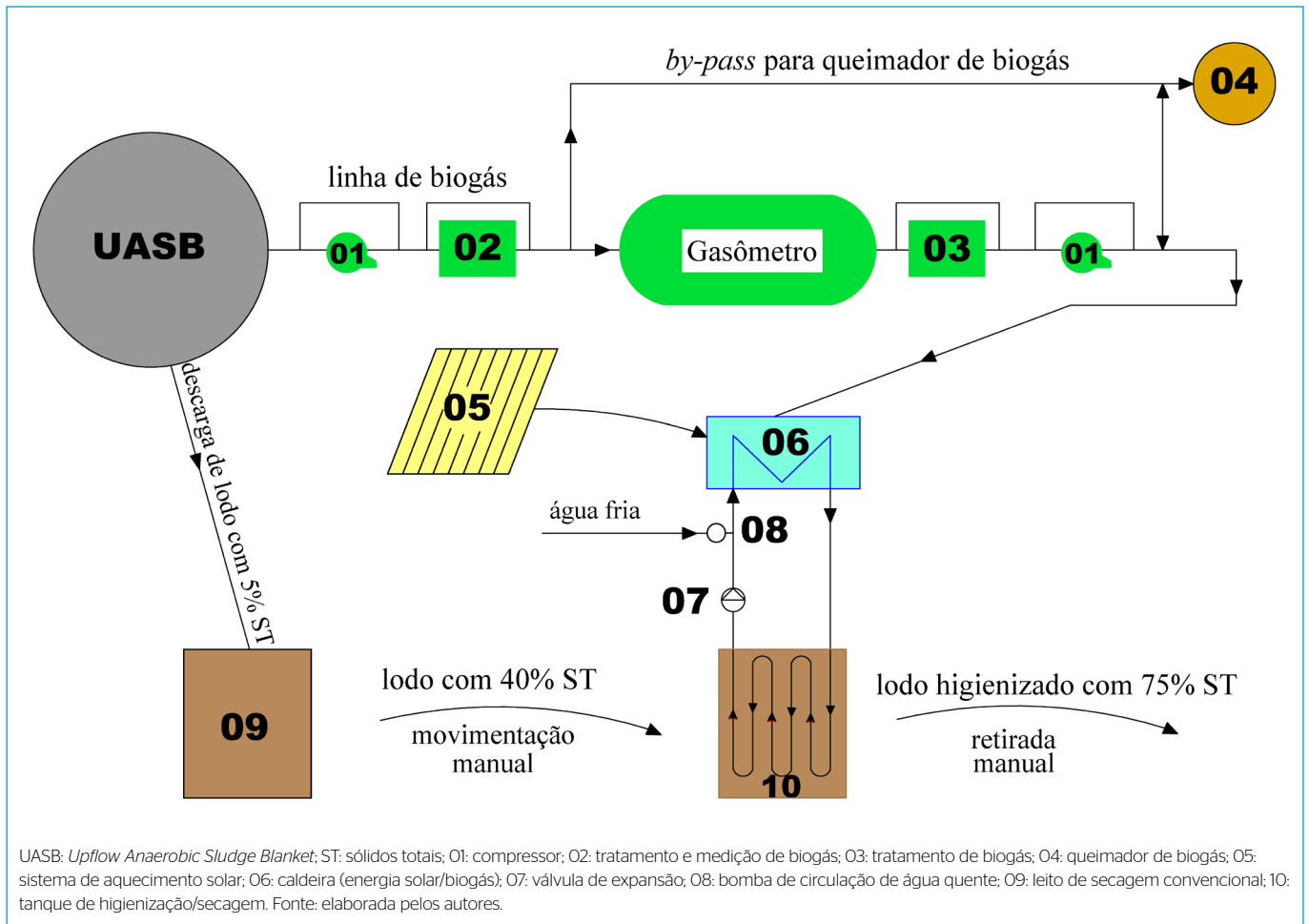


Figura 7 - Fluxograma do sistema proposto para a estação de tratamento de esgoto estudada.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Kuk, T.N.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Investigação, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Souza, J.B.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Supervisão,

Escrita – Revisão e Edição. Possetti, G.R.C.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição. Wagner, L.G.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Investigação, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

AMARAL, K.C.; AISSE, M.M.; POSSETTI, G.R.C.; PRADO, M.R. Use of life cycle assessment to evaluate environmental impacts associated with the management of sludge and biogas. *Water Science and Technology*, v. 77, p. 2292-2300, 2018. <http://doi.org/10.2166/wst.2018.146>

ANDERSSON, K.; ROSEMARIN, A.; LAMIZANA, B.; KVARNSTRÖM, E.; MCCONVILLE, J.; SEIDU, R.; DICKIN, S.; TRIMMER, C. *Sanitation, Wastewater Management and Sustainability: from Waste Disposal to Resource Recovery*. Nairobi and Stockholm: United Nations Environment Programme and Stockholm Environment Institute, 2016.

ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A.C.; CHERUBINI, C.; FRANÇA, M. Desinfecção e Secagem Térmica do lodo de esgoto anaeróbico pelo uso de biogás. In: *XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 2002. *Anais...Cancun*: Brazilian Journal of Water Resources, 2002.

ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 1. ed. Belo Horizonte: UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484p.

BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C.V.; MOCHIDA, G.A.; SOUZA, L.M.K.M.; SERRAT, B.M. Aspectos agrônômicos do uso agrícola de lodo de esgoto - região metropolitana de Curitiba. *Revista AIDIS, de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2009. <http://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2009.2.1.13099>

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B.M.; AISSE, M.M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. *Water Air Soil Pollut*, v. 225, p. 2074, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2074-y>

- BORGES, E.S.M.; GODINHO, V.M.; BEJAR, DO.; CHERNICHARO, C.A.L. 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, ABES. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 337-346, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300007>
- BRASIL. Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 de janeiro de 2007.
- BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União* Brasília, DF, 02 de agosto de 2010.
- BRASIL. Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, de 15 de julho de 2020.
- BRESSANI-RIBEIRO, T.; MOTA FILHO, C.R.; MELO, V.R.; BIANCHETTI, F.J.; CHERNICHARO, C.A.L. Planning for achieving low carbon and integrated resources recovery from sewage treatment plants in Minas Gerais, Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 242, p. 465-473, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.103>
- CHEN, G.; YUE, P.L.; MUJUMDAR, A.S. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. In: MUJUMDAR, A.S. *Handbook of industrial drying*. 4. ed. New York: CRC Press, 2015.
- CERQUEIRA, P.L.W. *Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio*: subsídios para estudos de concepção. 191f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- CHERNICHARO, C.A.L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 379p.
- ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. *Transferência de calor e massa*: uma abordagem prática. 4. ed. Editora AMGH: Porto Alegre, p. 902, 2012.
- DERESZEWSKA, A.; CYTAWA, S. Sustainability considerations in the operation of Wastewater Treatment Plant 'Swarzewo'. *E3S Web of Conferences*, n. 10, p. 14. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000014>
- FERREIRA, A.C.; ANDREOLI, C.V.; FRANÇA, M.; CHERUBINI, C. Desinfecção e secagem térmica do lodo de esgoto anaeróbio em leito de secagem pelo uso de biogás. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2003. *Anais...* Joinville: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11-32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- GONTIJO, C.J.; MADI, A.P.L.M. *Aproveitamento do biogás e da energia solar para secagem térmica e higienização de lodo de esgoto*. Curitiba: FAE Centro Universitário, 2017.
- GRULL, D. Remediação e readequação de sistemas aquáticos superficiais contaminados. In: CALIJURI, M.C.; GASPARINI, D.; CUNHA, F. (Coord.). *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- HINDIYEH, M.Y. *Enumeration and survival studies on helminth eggs in relation to treatment of anaerobic and aerobic sludges in Jordan*. Newcastle: Newcastle University, 1995.
- JENSSEN, P.D.; VRÅLE, L.; LINDHOLM, O. Sustainable wastewater treatment. In: SENG, L. (ed.). *Proc. International conference on natural resources and environmental management and environmental safety and health*, p. 1-17, 2007. Disponível em: https://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/JENSSEN%202007%20Sustainable%20Wastewater%20Treatment.pdf. Acessado em: 06 fev. 2020.
- LOBATO, L.C.S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos*. 187f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- LOBATO, L.C.S.; CHERNICHARO, C.A.L.; PUJATTI, F.J.P.; MARTINS, O.M.; MELO, G.C.B.; RECIO, A.A.R. Use of biogas for cogeneration of heat and electricity for local application: performance evaluation of an engine power generator and a sludge thermal dryer. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 1, p. 159-167, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.549>
- MORETTO, S.R.O.; RIBEIRO JUNIOR, S.; GODOI, W.C. Estudo comparativo da secagem natural de lodos de ETEs submetidos ao processo de centrifugação. In: *Congresso ABES FENASAN*, 2017. *Anais...* São Paulo: ABES FENASAN, 2017.
- NOYA, I.; ALDEA, X.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; GASOL, C.M.; MOREIRA, M.T.; AMORES, M.J.; MARÍN, D.; BOSCHMONART-RIVES, J. Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia - a strategy to work towards Circular Economy. *Science of the Total Environment*, v. 589, p. 122-129, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.186>
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SEMA). Resolução nº 21, de 22 de abril de 2009. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. *Diário Oficial do Estado do Paraná*, Curitiba, PR, 04 maio 2009.
- PASSAMANI, F.R.F.; MOTTA, J.S.; FIGUEIREDO, K.F.; GONÇALVES, R.F. Pasteurização do lodo de um reator UASB na remoção de coliformes fecais e ovos de helmintos. In: *Seminário Nacional de Microbiologia Aplicada ao Saneamento*, 2000. *Anais...* Vitória, 2000. p. 223-228.

- POSSETTI, G.R.C.; JASINSKI V.P.; ANDREOLI C.V.; BITTENCOURT S.; CARNEIRO C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. *In: XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15, 2012. *Anais...* Belo horizonte, 2012.
- POSSETTI G.R.C.; RIETOW, J.C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C.A.; CARNEIRO, C. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 28. ed. Rio de Janeiro, 2015.
- POSSETTI, G.R.C.; RIETOW, J.C.; CABRAL, C.B.G.; MOREIRA, H.C.; PLATZER, C.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy recovery from biogas in UASB reactors treating sewage. *In: CHERNICHARO, C.A.L.; BRESSANI-RIBEIRO, T. (eds). Anaerobic reactors for sewage treatment: design, construction and operation*. IWA Publishing: London, p. 194-236, 2019.
- SILVEIRA, B.; CHERNICHARO, C.A.L.; CABRAL, C.B.G.; SUIDEDOS, C.; PLATZER, C.; SILVA, G.; POSSETTI, G.R.C.; HOFFMANN, H.; MOREIRA, H.C.; ADAMATTI, H.B.; MIKI, M.; SILVA, M.; TAKAHASHI, R.; MIKI, R.; ROSENFELDT, S.; ARAÚJO, V.S.F.; VALENTE, V.B.; VILLANI, W. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto/Probiogás*. Brasília: GIZ/Ministério das Cidades, 2015.
- RIETOW J.C.; WAGNER L.G.; CARNEIRO C.; AISSE M.M.; POSSETTI, G.R.C. Estudo comparativo entre alternativas de sistemas de secagem e higienização térmica de lodo para estações de tratamento de esgoto de médio e pequeno porte. *In: 1º Seminário Nacional sobre Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto*, 2018. *Anais...* Curitiba: INCT ETEs Sustentáveis, 2018.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR); UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). *ProBio*. Versão 1.0, 2015.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Norma Técnica L5.551, de junho de 2013. *Diário Oficial do Estado de São Paulo*, v. 123, n. 192, 2013.
- SU, B.; HESHMATI, A.; GENG, Y.; YU, X. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, v. 42, p. 215-227, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Method 1681: Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by MultipleTube Fermentation using A-1 medium*. Washington: EPA, 2006.
- VALENTE, V.B. *Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil*. 198f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- WAGNER, L.G.; POSSETTI G.R.C.; CARNEIRO C.; URBANETZ JUNIOR, J. Sistema térmico de higienização e secagem de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás. *In: Congresso sobre geração distribuída e energia no meio rural - AGRENER GD*, 10., 2015. *Anais...* São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2015. p. ID 928/1-10. CD-ROM.