

# Aproveitamento do biogás produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo para a secagem térmica de lodos de estações de tratamento de esgoto

*Use of biogas produced in upflow anaerobic sludge blanket reactors for the thermal drying of sludge from sewage treatment plants*

Julio Cezar Rietow<sup>1\*</sup> , Gustavo Rafael Possetti<sup>2</sup> , Charles Carneiro<sup>2</sup> , Ronald Gervasoni<sup>3</sup> , Miguel Mansur Aisse<sup>1</sup> , Adalberto Rubles Noyola<sup>4</sup> 

## RESUMO

O gerenciamento do lodo de esgoto é um dos principais responsáveis pelos elevados custos de operação de estações de tratamento de esgoto no Brasil. Isso se deve, principalmente, pela necessidade de etapas de desidratação e higienização desse material, sendo essa última realizada quando o uso agrícola do lodo é escolhido como forma de destinação. Para tentar reduzir os custos e melhorar o gerenciamento do lodo em uma estação de tratamento de esgoto, uma opção que vem sendo amplamente discutida é o aproveitamento do biogás, produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo, para a secagem térmica do lodo. Nesse contexto, o presente trabalho vem relatar um estudo sobre a secagem térmica, de diferentes tipos de lodos, em um sistema piloto envolvendo o aproveitamento energético do biogás produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo, de uma estação de tratamento de esgoto de médio porte. O secador reduziu em aproximadamente 80% a massa dos diferentes tipos de lodos submetidos ao processo de secagem térmica, aumentando a concentração de sólidos totais nesses materiais de 20 para 80%. Os valores da demanda energética do secador para remoção de 1 kg de água presente nos diferentes tipos de lodos variaram de 1.195 a 1.323 kcal. Adicionalmente, as características microbiológicas dos diferentes tipos de lodos, após o processo de secagem, evidenciaram a possibilidade da utilização agrícola desses materiais. Esses resultados apontam a secagem térmica do lodo, utilizando biogás produzido em sistemas anaeróbios de tratamento, como uma promissora ferramenta para a sustentabilidade no setor de esgotamento sanitário brasileiro.

**Palavras-chave:** aproveitamento do biogás; estação de tratamento de esgoto; reatores anaeróbios; secagem térmica do lodo; uso agrícola do lodo.

## ABSTRACT

The management of sewage sludge is one of the main responsible for the high operating costs of sewage treatment plants in Brazil. This is mainly due to the need for dewatering and sanitizing steps for this material, being the last one carried out when the agricultural use of the sludge is chosen as a form of destination. To try to reduce costs and improve sludge management at a sewage treatment plant, an option that has been widely discussed is the use of biogas, produced in upflow anaerobic sludge blanket reactors, for the thermal drying of sludge. In this context, the present work reports a study on the thermal drying of different types of sludge, in a pilot system, involving the energy utilization of biogas produced in upflow anaerobic sludge blanket reactors, of a medium-sized sewage treatment plant. The dryer reduced the mass of the different types of sludge subjected to the thermal drying process by approximately 80%, increasing the concentration of total solids in these materials from 20 to 80%. The energy demand values of the dryer to remove 1 kg of water present in the different types of sludge ranged from 1,195 to 1,323 kcal. Additionally, the microbiological characteristics of the different types of sludge, after the drying process, showed the possibility of agricultural use of these materials. These results point to the thermal drying of sludge, using biogas produced in anaerobic treatment systems, as a promising tool for sustainability in the Brazilian sewage sector.

**Keywords:** agricultural use of sludge; anaerobic reactors; use of biogas; sewage treatment plant; thermal drying of the sludge.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

<sup>2</sup>Fundação Getulio Vargas Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul - Curitiba (PR), Brasil.

<sup>3</sup>Companhia de Saneamento do Paraná, Gerência de Pesquisa e Inovação - Curitiba (PR), Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Nacional Autónoma do México - Cidade do México, Mexico.

\*Autor Correspondente: julio.rietow@gmail.com.

**Conflito de interesses:** os autores declaram não haver conflitos de interesse.

**Financiamento:** nenhum.

**Recebido:** 18/08/2020 - **Aceito:** 13/06/2021 - **Reg. ABES:** 20200286

## INTRODUÇÃO

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto foram amplamente empregados nas últimas décadas em países da América Latina e do Caribe. Muitas companhias de saneamento, especialmente no Brasil, adotaram a tecnologia de reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB)) (CHERNICHARO *et al.*, 2018). Isso ocorreu, principalmente, pelos recursos financeiros requeridos para a construção e operação desses reatores serem menos onerosos que aqueles exigidos por sistemas aeróbios de tratamento. Atualmente, o Brasil é caracterizado por possuir o maior parque de reatores anaeróbios do mundo, contando com 1.373 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) que empregam essa tecnologia de tratamento (BRASIL, 2020).

Outro atrativo que favoreceu a consolidação dos reatores UASB no país é a possibilidade de produção de biogás. Composto majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o biogás pode ser utilizado para fins energéticos dentro da própria planta de tratamento (ROSA *et al.*, 2016). Sendo o principal constituinte do biogás, o  $\text{CH}_4$  é um composto inflamável, inodoro e incolor. Apesar de possuir um elevado poder calorífico ( $8.570 \text{ kcal.m}^{-3}$ ) (CONSTANT *et al.*, 1989), o  $\text{CH}_4$  é um gás indutor do efeito estufa, com potencial de aquecimento global 34 vezes superior ao do  $\text{CO}_2$  (PACHAURIAND; MEYER, 2014).

Em que pesem as potencialidades do uso energético do biogás, destaca-se que, no Brasil, as ETE dotadas de reatores UASB tipicamente coletam e conduzem esse gás até queimadores abertos, onde é parcialmente destruído (BILOTTA; ROSS, 2016). As eficiências de destruição do  $\text{CH}_4$  nesses queimadores são tipicamente inferiores a 50% (KAMINSKI *et al.*, 2017). Isso faz com que a energia química presente no biogás seja desperdiçada e as taxas de emissão de gases de efeito estufa sejam pouco reduzidas. Desse modo, ainda que incipientes, testes e estudos envolvendo o aproveitamento energético do biogás estão sendo realizados no país (POSSETTI *et al.*, 2019).

Outro subproduto continuamente produzido em ETE é o lodo. Por apresentar quantidades significativas de matéria orgânica e nutrientes, esse material pode ser empregado como fertilizante na agricultura. Entretanto, o lodo também é caracterizado por conter elevados teores de água e de microrganismos patogênicos, havendo então a necessidade da realização de etapas de desaguamento e higienização. Com base nessas constatações, destaca-se que os custos inerentes ao gerenciamento do lodo podem atingir até 60% dos custos operacionais de toda a ETE (ANDREOLI *et al.*, 2014). Uma prática comum adotada em algumas regiões brasileiras para a destinação agrícola do lodo, sobretudo no estado do Paraná, é o desaguamento desse material seguido do processo de estabilização alcalina prolongada (EAP). Os entraves envolvendo tal prática dizem respeito à área significativa requerida na ETE para o processo, a necessidade de incorporação de produtos químicos, como a cal, por exemplo, e o tempo necessário de cura do lodo (30 a 45 dias) (BITTENCOURT *et al.*, 2017).

Para que a destinação agrícola do lodo se consolide no Brasil, torna-se fundamental que novas tecnologias de desaguamento e higienização sejam estudadas, de modo que reduza os custos e melhore o gerenciamento do lodo em uma ETE. Entre essas tecnologias, destacam-se os secadores térmicos. Tais equipamentos são responsáveis pelo aquecimento do lodo em um ambiente controlado, permitindo altas taxas de remoção de água e ainda possibilitando a higienização do material, sem a necessidade, portanto, da incorporação de produtos químicos (PANEPINTO *et al.*, 2016). Além disso, outra significativa vantagem do emprego de secadores é a possibilidade de utilização do biogás produzido em reatores UASB como fonte de energia térmica.

Em condições ideais, são necessários 600 kcal de energia para evaporar 1 kg da água presente no lodo. No entanto, em condições operacionais normais, esse valor pode ser significativamente maior (BENNAMOUN *et al.*, 2013). Desse modo, a demanda energética do processo de secagem dependerá da eficiência do secador escolhido e do combustível utilizado. Outro parâmetro que pode influenciar o consumo de energia do secador térmico é o tipo de lodo a ser processado. Entretanto, destaca-se não há estudos na literatura que reportem resultados de comparações da demanda energética do processo de secagem para diferentes tipos de lodo de ETE.

Embora os benefícios do aproveitamento do biogás para a secagem térmica do lodo sejam amplamente reconhecidos, destaca-se que o número de ETE no Brasil que realizam tal processo é ainda pouco expressivo (MOREIRA, 2017). Isso se deve, principalmente, à falta de informações consolidadas sobre a demanda energética de sistemas de secagem de lodo operando com biogás produzido em reatores UASB. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar, por meio de investigações experimentais, o desempenho de um sistema piloto de secagem térmica, alimentado com diferentes tipos de lodos, movido a biogás oriundo de reatores UASB. Os estudos pautaram-se na busca de informações sobre o consumo de energia e a capacidade de remoção de água e de microrganismos patogênicos presentes nos lodos oriundos de diferentes sistemas de tratamento de esgoto sanitário.

## METODOLOGIA

### Descrição do sistema de secagem térmica

Um sistema térmico piloto composto de um secador granulador rotativo (modelo Bruthus, Albrecht, Brasil), capaz de processar até  $100 \text{ kg.h}^{-1}$  de lodo desaguado foi instalado em uma ETE localizada na Região Sul do Brasil. A ETE atende a uma população de aproximadamente 200 mil habitantes e possui capacidade para tratar até  $420 \text{ L.s}^{-1}$  de esgoto sanitário. A planta de tratamento é dotada de seis reatores UASB (detalhes na Tabela 1), que produzem cerca de  $80 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$

**Tabela 1** – Principais características dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo implantados na estação de tratamento de esgoto em estudo.

Características	Reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB)
Vazão de projeto de cada reator ( $\text{L.s}^{-1}$ )	70
Tempo de retenção hidráulica (h)	8
Número de reatores	6 (divididos em três linhas)
Tipo	Retangular
Carga orgânica volumétrica de projeto ( $\text{kgDQO.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ )	2,0
Carga hidráulica volumétrica de projeto ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ )	3,0
Volume de cada reator ( $\text{m}^3$ )	2.000
Profundidade útil de cada reator (m)	4,5
Área da seção transversal de cada reator ( $\text{m}^2$ )	441
Velocidade superficial de fluxo de projeto ( $\text{m.h}^{-1}$ )	0,6
Eficiência média de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) (%)	60

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

de biogás, além de lagoa aerada para promover o pós-tratamento do efluente anaeróbio.

O biogás produzido nos reatores UASB foi coletado, condicionado e utilizado como fonte de energia térmica para o secador de lodos. Os gasômetros dos reatores UASB (Figura 1a) foram interligados, e o biogás foi então conduzido para uma câmara de combustão acoplada ao secador. O guiamento do biogás realizou-se por dois compressores radiais instalados em série e modulados por inversores de frequência (Figura 1b). Um tanque contendo limalha de ferro (Figura 1c) foi incorporado ao sistema a fim de reduzir a concentração de sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) presente no biogás.

O secador granulador rotativo (Figura 1d) foi confeccionado com chapa de aço carbono SAC 300, com isolamento de lã de rocha. Tais características construtivas do secador visavam à segurança operacional do sistema bem como à diminuição das perdas de calor para o ambiente externo. As dimensões do secador são de 2,5 m de largura, 3,5 m de altura e 6,0 m de comprimento. Em seu interior, o tambor rotativo contava com aletas direcionadoras de fluxo, moinhos e peneiras. Esses dispositivos possibilitaram a granulação do lodo e o aumento da taxa de transferência de calor para o material.

Na câmara de combustão do secador piloto (Figura 1e), as altas temperaturas da queima do biogás aqueciam o volume de ar contido em seu interior. O ar quente foi então introduzido no secador rotativo, sendo a transferência de calor para o lodo realizada de forma direta (convecção) e com fluxo corrente. A remoção de água presente no lodo ocorreu em um ambiente saturado de umidade, reduzindo assim eventuais problemas de autoignição do material seco.

Por fim, um separador multiciclone (Figura 1f) foi acoplado ao secador para segregar os compostos sólidos e gasosos disponibilizados na saída do sistema. Os compostos gasosos foram então conduzidos a um lavador de gases (Figura 1g) alimentado com água e um produto químico a base de ureia, utilizado para remoção de maus odores (*Nonox, Continuum Chemical*). Aproximadamente 70 mL de *Nonox* foram utilizados para cada 100 kg de lodo seco produzido. Os gases do processo foram exauridos do sistema por meio de uma chaminé, com 5,5 m de altura acoplada ao lavador de gases. Direcionou-se a água residual do processo para os reatores UASB da ETE. Já os compostos sólidos (lodo seco) foram coletados em sacos de ráfia e armazenados em um ambiente livre de umidade e de riscos de recontaminação.

### Processo de alimentação do secador térmico com diferentes tipos de lodo

O processo de alimentação do secador térmico de lodos ocorreu de forma contínua e foi dividido em quatro etapas distintas de investigação. Na primeira etapa (1ª ET), o secador foi alimentado com lodo anaeróbio oriundo de reatores UASB. Já na segunda etapa (2ª ET), a alimentação do secador ocorreu com lodo aeróbio produzido em um sistema de lodos ativados por aeração prolongada. Na terceira etapa (3ª ET), o secador foi alimentado com lodo anaeróbio de reator UASB misturado com lodo de flutador por sistema de ar dissolvido, obtido com emprego de cloreto férrico visando à remoção do fósforo presente no esgoto. A proporção de mistura empregada na terceira etapa de alimentação do secador entre lodo de reator UASB e lodo de flutador foi de 4:1, respectivamente.



**Figura 1** - Sistema de secagem térmica de lodos utilizado no presente estudo: (a) coleta e guiamento do biogás produzido nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo; (b) utilização de compressores radiais para guiamento do biogás; (c) reator com limalha de ferro para redução da concentração de  $H_2S$  no biogás; (d) secador granulador rotativo; (e) câmara de combustão do biogás; (f) separador de fases multiciclone; (g) lavador de gases para controle de emissões gasosas com chaminé acoplada.

Por fim, a quarta etapa (4ª ET) consistiu na alimentação do sistema piloto com lodo anaeróbio de reator UASB misturado com espuma. Definida como uma camada de materiais flutuantes que se desenvolve na superfície de reatores anaeróbios, a espuma é composta principalmente de gorduras, óleos e lodo flotado (ROSS *et al.*, 2016). A proporção de mistura adotada entre lodo de reator UASB e espuma também foi de 4:1, respectivamente.

Nas quatro etapas de investigação, o secador térmico foi alimentado manualmente, sendo os lodos previamente desaguados em centrífugas até um teor de sólidos totais (ST) de aproximadamente 20%, conforme recomendado pela Normativa Brasileira NBR 12.209 de 2011 (ABNT, 2011). As condições operacionais empregadas nas etapas de investigação do processo de secagem térmica, de diferentes tipos de lodos, estão apresentadas na Tabela 2. As massas de lodo foram quantificadas com o auxílio de uma balança digital de resolução de 1 g.

Amostras de lodos antes do processo de secagem foram submetidas às análises de conjunto de sólidos, elementar, nutrientes, óleos e graxas e cloretos. Os parâmetros de ST, sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT), nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito, potássio, fósforo total, magnésio, óleos e graxas e cloretos foram quantificados conforme as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Para determinar os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, utilizou-se o analisador elementar CHNS EA1100 e o eletrodo de íon seletivo (Cole-Palmer).

## Redução de umidade e higienização dos lodos

Durante cada etapa de investigação, análises de ST foram realizadas em amostras dos diferentes tipos de lodos, antes e depois do processamento no secador. Esse procedimento permitiu verificar a eficiência de remoção de água no equipamento. Realizaram-se também análises microbiológicas preconizadas pela Resolução CONAMA 375 de 2006, que dispõe sobre os critérios de uso agrícola do lodo (BRASIL, 2006). Sendo assim, a contagem de ovos viáveis de helmintos foi determinada via extração, incubação e microscopia das amostras de lodos (USEPA, 2003). A análise de *salmonellas* foi realizada por meio do método *Standard Methods* 9260/D, com incerteza expandida de  $\pm 6,8\%$  (APHA, 2012). O método de imunocromatografia foi utilizado para a análise de vírus entéricos (adenovírus, rotavírus e enterovírus) (WILHELM *et al.*, 2003). Para obtenção da concentração dos coliformes termotolerantes, empregou-se o método *Standard Methods* 9225, com incerteza expandida de  $\pm 2,0\%$  (APHA, 2012). Essas análises foram realizadas em triplicata e tiveram por objetivo verificar a

**Tabela 2 - Condições operacionais dos ensaios de secagem térmica dos diferentes tipos de lodos.**

Parâmetros	1ª ET	2ª ET	3ª ET	4ª ET
Massa total de lodo processada (kg)	4.582	3.705	4.268	3.561
Número de ensaios realizados	9	6	7	9
Duração total de cada etapa (h)	47	43	40	47
Rotação do secador (rpm)	12 - 16			
Tempo de retenção do lodo no secador (h)	0,3 - 0,5			

1ª etapa (ET): lodo do reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB); 2ª ET: lodo aeróbio; 3ª ET: lodo do reator UASB misturado com lodo de flotador (relação 4:1); 4ª ET: lodo do reator UASB misturado com espuma (relação 4:1).

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

eficiência do secador quanto à remoção de microrganismos patogênicos presentes nos lodos. Para cada ensaio realizado nas diferentes etapas de investigação, efetuaram-se três coletas de lodo.

## Controle do consumo de biogás no processo de secagem térmica

A quantidade de biogás requerida pelo secador térmico foi controlada por meio da temperatura de entrada dos gases quentes, oriundos da câmara de combustão. Desse modo, para evitar eventuais problemas de autoignição do lodo, a temperatura de entrada utilizada no secador foi estabelecida dentro da faixa de 200 - 250°C. As temperaturas do ar, tanto na entrada quanto na saída do secador, foram medidas com termopares do tipo K com resolução de 0,1°C. A vazão e a temperatura do biogás coletado nos reatores UASB durante a operação do secador foram mensuradas com o auxílio de um transmissor por dispersão térmica Thermathel® (TA2, Magnetrol), com resoluções de 5,6 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e 0,1°C, exatidões de  $\pm 1,0$  Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e  $\pm 1,0$ °C. O teor de CH<sub>4</sub> presente no biogás foi determinado com um transmissor óptico seletivo, com resolução de 0,1% volume por volume (v.v<sup>-1</sup>), exatidão de  $\pm 2,5\%$  v.v<sup>-1</sup> e repetibilidade de  $\pm 2,0\%$  v.v<sup>-1</sup>, operando na faixa do infravermelho (Guardian Plus, Edinburgh Sensors). Ainda se verificou, por meio do uso de um transmissor de pressão capacitivo (LD301, Smar), com resolução de 0,01 milímetro de coluna de água (mmca) e exatidão de  $\pm 0,04$  mmca, a pressão manométrica do biogás. Os equipamentos utilizados foram configurados para fornecer sinais analógicos padrão 4 - 20 miliampere (mA), os quais foram monitorados em intervalos de 30 segundos e armazenados em um aquisitor de dados (FieldLogger, Novus).

Os dados operacionais até aqui mencionados foram sistematizados para quantificação da demanda energética do processo de secagem térmica dos diferentes tipos de lodos avaliados. Desse modo, para cada ensaio realizado, objetivou-se encontrar os seguintes parâmetros de eficiência do secador: a) energia necessária para remoção de 1 kg de água presente no lodo; b) consumo de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado; c) consumo de CH<sub>4</sub> para cada 1 kg de lodo úmido processado; d) relação de consumo energético do secador térmico para vaporização da água presente no lodo. O parâmetro de relação de consumo energético tem por objetivo comparar a energia necessária para remoção de 1 kg de água, presente no lodo, com o calor latente de vaporização da água a 0°C (600 kcal.kg<sup>-1</sup> de água evaporada). Em suma, essa relação sintetiza o incremento de consumo energético no processo de secagem em comparação com as condições ideais de evaporação de água.

Todos os resultados adquiridos no presente trabalho estão reportados na forma de média e desvio padrão. Para cada ensaio realizado nas diferentes etapas de investigação, foram obtidos os quatro parâmetros de eficiência do secador. Adicionalmente, os resultados dos parâmetros energéticos avaliados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a diferença média significativa entre eles foi comparada pelo teste de Tukey, com probabilidade de erro igual a 5%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização dos diferentes tipos de lodos

Os resultados de caracterização dos diferentes tipos de lodos investigados no presente trabalho estão apresentados na Tabela 3. De modo geral, os quatro materiais avaliados mostraram-se estabilizados (relação SVT.ST-1  $\leq 0,7$ ) e

**Tabela 3 – Caracterização físico-química dos diferentes tipos de lodos utilizados nas etapas de investigação de secagem térmica\*.**

Parâmetros	1ª ET	2ª ET	3ª ET	4ª ET
Umidade após desaguamento (%)	76,6	82,8	79,6	76,2
Sólidos totais - ST (%)	23,4	17,2	20,4	23,8
Sólidos fixos totais - SFT (%)	11,7	6,1	9,2	11,6
Sólidos voláteis totais - SVT (%)	11,7	11,1	11,2	12,2
SVT:ST <sup>1</sup>	0,50	0,65	0,55	0,51
SFT:ST <sup>1</sup>	0,50	0,35	0,45	0,49
Carbono elementar (%)	8,0	3,0	7,6	26,0
Hidrogênio elementar (%)	15,8	0,2	7,5	3,3
Nitrogênio elementar (%)	1,8	1,44	0,4	3,0
Enxofre elementar (%)	< 0,1	10,1	< 0,1	< 0,1
Oxigênio elementar (%)	25,3	11,1	4,6	15,0
Fósforo total (% de ST)	0,32	0,31	0,38	0,20
Nitrogênio amoniacal (% de ST)	0,23	0,005	0,13	0,60
Nitratos (% de ST)	< 0,001	0,008	0,004	0,005
Nitritos (% de ST)	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Potássio (% de ST)	0,09	0,06	0,03	0,06
Magnésio (% de ST)	0,60	0,31	0,85	0,90
Óleos e Graxas (g.kg <sup>-1</sup> )	3,8	2,2	3,1	4,5
Cloreto (mgCl.kg <sup>-1</sup> )	6.127	1.200	8.458	4.326

1ª etapa (ET): lodo do reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB); 2ª ET: lodo aeróbio; 3ª ET: lodo do reator UASB misturado com lodo de flotador (relação 4:1); 4ª ET: lodo do reator UASB misturado com espuma (relação 4:1).

\*Resultados em base seca (b.s).

Fonte: Elaboração dos autores, 2022

com elevadas concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo), favorecendo o processo de uso agrícola. Entretanto, destaca-se que o lodo aeróbio, oriundo de sistema de lodos ativados por aeração prolongada, apresentou uma baixa concentração de nitrogênio amoniacal quando comparado com os outros tipos de lodos. Tal fato pode estar relacionado ao processo de nitrificação e desnitrificação do esgoto sanitário ocorrido no sistema. Desse modo, parcela significativa da amônia presente no meio é transformada em nitrogênio gasoso (VASILAKI *et al.*, 2019). O potássio, por sua vez, foi encontrado em pequenas concentrações nos lodos investigados. Assim, em caso de uso agrícola, pode haver a necessidade de complementação desse nutriente por meio da aplicação de fertilizantes minerais (BITTENCOURT *et al.*, 2017).

A elevada concentração de cloreto no lodo utilizado na etapa 3 se deve pela aplicação de cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub>), na coágulo-floculação do esgoto anaeróbio afluente ao flotador por ar dissolvido. A utilização desse produto químico também justifica a maior concentração encontrada de fósforo presente nesse lodo. Por ser caracterizado como um rejeito pela CONAMA 375 de 2006, a espuma não pode ser empregada, mesmo que misturada em diferentes proporções com lodo de esgoto, para fins agrícolas. Contudo, estudos realizados por Ross *et al.* (2016) evidenciaram que a incorporação de espuma, nas proporções de 10, 20

e 50% em massa, não alterou a composição do lodo de esgoto destinado ao uso agrícola. Isso se deve, principalmente, pela espuma possuir em sua composição quantidades significativas de lodo anaeróbio flotado. Por fim, as concentrações de nitrogênio elementar (3,0%, em base seca - b.s), no lodo de reator UASB misturado com espuma, e de enxofre elementar (10,1%, em b.s), no lodo aeróbio, sugerem a importância do monitoramento de efluentes gasosos, caso o lodo seco seja transformado termicamente em combustores, visto que esses compostos podem originar óxidos de nitrogênio e de enxofre (BATISTELLA *et al.*, 2015).

### Redução de massa de lodo no processo de secagem térmica

Na Tabela 4, estão apresentados os resultados do processo de remoção de água nos diferentes tipos de lodos investigados. Constatou-se que os teores de ST obtidos nos lodos, ao fim do processo de secagem térmica, variaram de 80 a 86%, estando essa faixa de valores dentro daquelas reportadas na literatura para secadores do tipo granulador rotativo (60 a 90% de ST) (ARLABOSSE *et al.*, 2012; BENNAMOUN *et al.*, 2013). Esses resultados favoreceram uma redução na massa dos diferentes tipos de lodos em aproximadamente cinco vezes, conforme apresentado nos gráficos da Figura 2. Teores de ST superiores aos encontrados no presente trabalho poderiam ser obtidos pelo aumento do tempo de retenção do lodo no secador térmico, bem como na elevação da temperatura do ar na entrada do sistema. Entretanto, pela possibilidade de autoignição do lodo seco e até mesmo de geração de finos e poeiras dentro do secador, optou-se por não elevar a temperatura de entrada do sistema.

Caso o emprego do lodo seco tenha por objetivo o uso na agricultura, torna-se fundamental o alcance de teores de ST superiores a 80%, uma vez que os custos de transporte até a área de aplicação estão correlacionados com o volume de lodo a ser manejado. Por sua vez, caso o emprego do lodo vise a seu aproveitamento energético dentro da própria planta de tratamento, teores de ST inferiores aos encontrados no presente estudo poderiam ser almejados, possibilitando, dessa forma, um menor consumo de biogás para a realização do processo de secagem. Estudos realizados por Septien *et al.* (2020) evidenciaram que o aumento do teor de ST no lodo, para valores superiores a 60%, não elevaram o seu poder calorífico. Acima desses valores, a demanda de energia necessária para a eliminação da água no lodo é superior à sua capacidade de geração de energia térmica, implicando ainda possíveis problemas de ignição do material no combustor.

### Características do biogás utilizado como fonte energética

Na Tabela 5, estão destacadas as principais características quantitativas e qualitativas do biogás utilizado como fonte energética no processo de secagem térmica. A vazão média de biogás demandada durante a operação do sistema piloto, para a secagem térmica dos diferentes tipos de lodos, variou de 13 a 25 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Durante a realização das etapas 1, 2 e 4, o teor médio de CH<sub>4</sub> presente no biogás, produzido nos reatores UASB da ETE, variou de 65,8 a 79,2% v.v<sup>-1</sup>. Segundo Noyola *et al.* (2006) e Cabral *et al.* (2017), o biogás oriundo do tratamento do esgoto doméstico normalmente apresenta em sua composição entre 60 e 85% v.v<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>. Desse modo, o teor de CH<sub>4</sub>, encontrado nas etapas mencionadas, apresentou valores nas faixas reportadas na literatura.

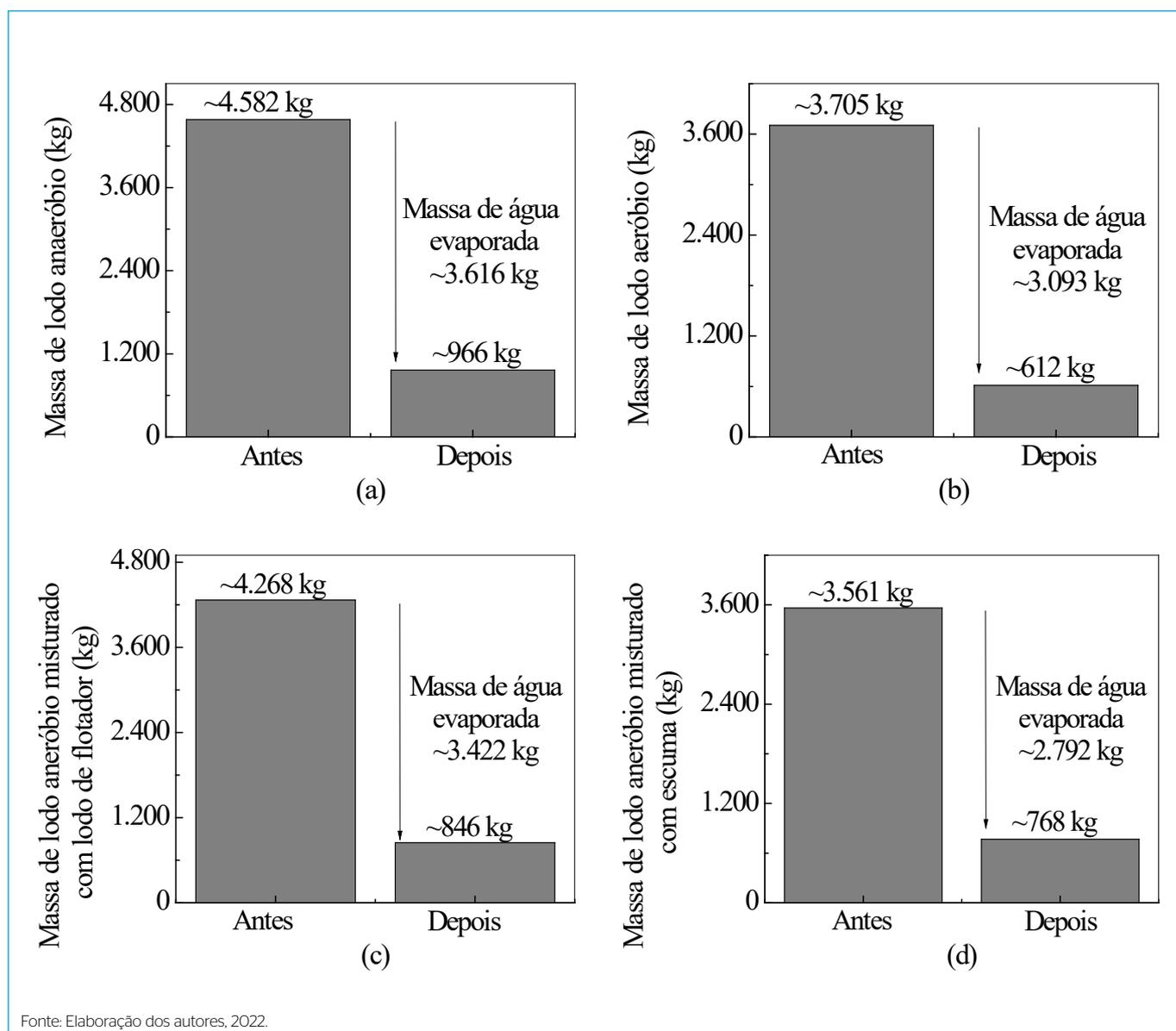
O maior consumo de biogás durante a etapa de secagem do lodo de reatores UASB misturado com lodo de flotador (3ª ET) pode ser explicado pelos baixos teores de CH<sub>4</sub> encontrados, sendo esses em média iguais a 47,9% v.v<sup>-1</sup>. Tal fato

**Tabela 4** - Resultados operacionais do processo de secagem térmica dos diferentes tipos de lodo\*.

Parâmetros operacionais do secador térmico	1ª ET	2ª ET	3ª ET	4ª ET
Teor de ST no lodo seco (%)	83,9 ± 1,3	80,1 ± 3,4	80,9 ± 1,7	86,5 ± 2,5
Temperatura do ar na entrada do secador (°C)	205,3 ± 17,0	212,4 ± 40,2	217,3 ± 30,2	207,9 ± 22,7
Temperatura do ar na saída do secador (°C)	96,1 ± 9,8	103,1 ± 10,8	109,6 ± 11,2	90,2 ± 5,3
Faixa operacional dos compressores de biogás (%)	50,7 ± 8,3	54,7 ± 11,9	74,8 ± 11,9	44,3 ± 6,4
Redução de massa do lodo (%)	78,9 ± 2,2	83,4 ± 3,1	80,1 ± 1,8	78,4 ± 2,9

1ª etapa (ET): lodo do reator anaeróbico de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB); 2ª ET: lodo aeróbico; 3ª ET: lodo do reator UASB misturado com lodo de flotorador (relação 4:1); 4ª ET: lodo do reator UASB misturado com espuma (relação 4:1); ST: sólidos totais.

\*Os valores apresentados remetem-se à média e ao desvio padrão dos resultados dos ensaios realizados nas etapas de investigação dos diferentes tipos de lodos investigados. Fonte: Elaboração dos autores, 2022.



**Figura 2** - Massas de lodos (a) de reator anaeróbico de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB), (b) de lodos ativados por aeração prolongada, (c) de reator UASB misturado com o de flotorador por ar dissolvido (relação 4:1) e (d) de reator UASB misturado com espuma (relação 4:1), antes e depois do processamento no secador térmico.

**Tabela 5 - Aspectos quantitativos e qualitativos do biogás utilizado no processo de secagem térmica dos diferentes tipos de lodo\*.**

Parâmetros avaliados	1ª ET	2ª ET	3ª ET	4ª ET
Vazão de biogás consumida (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	13,2 ± 6,5	16,1 ± 7,8	25,0 ± 3,9	13,9 ± 2,1
Teor de CH <sub>4</sub> no biogás (% vv <sup>3</sup> )	77,7 ± 5,6	79,2 ± 4,7	47,9 ± 3,3	65,8 ± 6,7
Temperatura do biogás (°C)	24,9 ± 2,7	24,1 ± 6,1	18,8 ± 2,1	31,5 ± 2,7
Pressão na tubulação de biogás (mmca)	776,4 ± 236,9	815,7 ± 171,1	1523 ± 190,5	600,2 ± 175,9

1ª etapa (ET): lodo do reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB); 2ª ET: lodo aeróbio; 3ª ET: lodo do reator UASB misturado com lodo de flotor (relação 4:1); 4ª ET: lodo do reator UASB misturado com espuma (relação 4:1).

\*Os valores apresentados remetem-se à média e ao desvio padrão dos resultados dos ensaios realizados nas etapas de investigação dos diferentes tipos de lodos investigados.

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

fez com que uma maior vazão de biogás fosse necessária para manter a temperatura de queima na câmara de combustão. Os períodos chuvosos ocorridos durante a etapa 3 podem ter sido responsáveis pela diluição do esgoto sanitário e, assim, pelo baixo teor de CH<sub>4</sub> presente no biogás. Os dados de uma estação climatológica instalada próxima à ETE evidenciaram durante essa etapa índices pluviométricos superiores em relação às demais etapas, com precipitação média acumulada igual a 58 mm. Durante a etapa 1, a precipitação acumulada foi igual a 18 mm. Na etapa 2, houve um acúmulo de 12 mm. Por fim, na etapa 4, foi registrada uma precipitação acumulada igual a 26 mm. O valor médio da demanda química de oxigênio (DQO) no esgoto sanitário afluente aos reatores UASB da ETE onde o secador foi instalado é de 516 mg.L<sup>-1</sup>. Durante a etapa 3, esse parâmetro apresentou um valor médio de 349 mg.L<sup>-1</sup>.

Estudos realizados por Possetti *et al.* (2013) e Duarte *et al.* (2018), em ETE de grande porte localizadas no sul do Brasil, também destacaram que eventos significativos de chuvas diminuíram a carga orgânica afluente à ETE, reduzindo, consequentemente, a produção de biogás e o teor de CH<sub>4</sub> nele contido. Os autores ainda evidenciaram que, em períodos com elevados índices pluviométricos, os teores de CH<sub>4</sub> presentes no biogás podem ser inferiores àqueles minimamente detectados pelo equipamento de medição. Desse modo, em sistemas de escala real visando ao aproveitamento energético do biogás, torna-se indispensável o uso de um gasômetro para diminuir os eventuais efeitos de períodos chuvosos, na quantidade e qualidade do biogás.

De modo geral, constatou-se que a temperatura do biogás foi similar à temperatura ambiente em todas as etapas de investigação. Quanto à pressão manométrica do biogás, a etapa 3 apresentou os maiores valores desse parâmetro. Isso se deve, principalmente, pela maior demanda de biogás no processo. Desse modo, os compressores radiais acoplados à tubulação de biogás exerceram maior pressão no sistema, fazendo com que a secagem térmica do lodo ocorresse com temperaturas do ar, assim como nas outras etapas de investigação, próximas a 200°C na entrada do secador rotativo.

### Demanda energética do sistema de secagem térmica

Nos gráficos da Figura 3, estão apresentados os resultados da demanda energética do sistema de secagem nas diferentes etapas de investigação. Com base nas informações reportadas sobre o biogás utilizado como fonte de energia, foi possível verificar a demanda energética em cada etapa do processo de secagem. Desse modo, constatou-se que a energia necessária para remover 1 kg de água presente nos diferentes tipos de lodos variou de 1.195 a 1.323 kcal. Os resultados aqui reportados de demanda energética do sistema piloto apresentaram valores

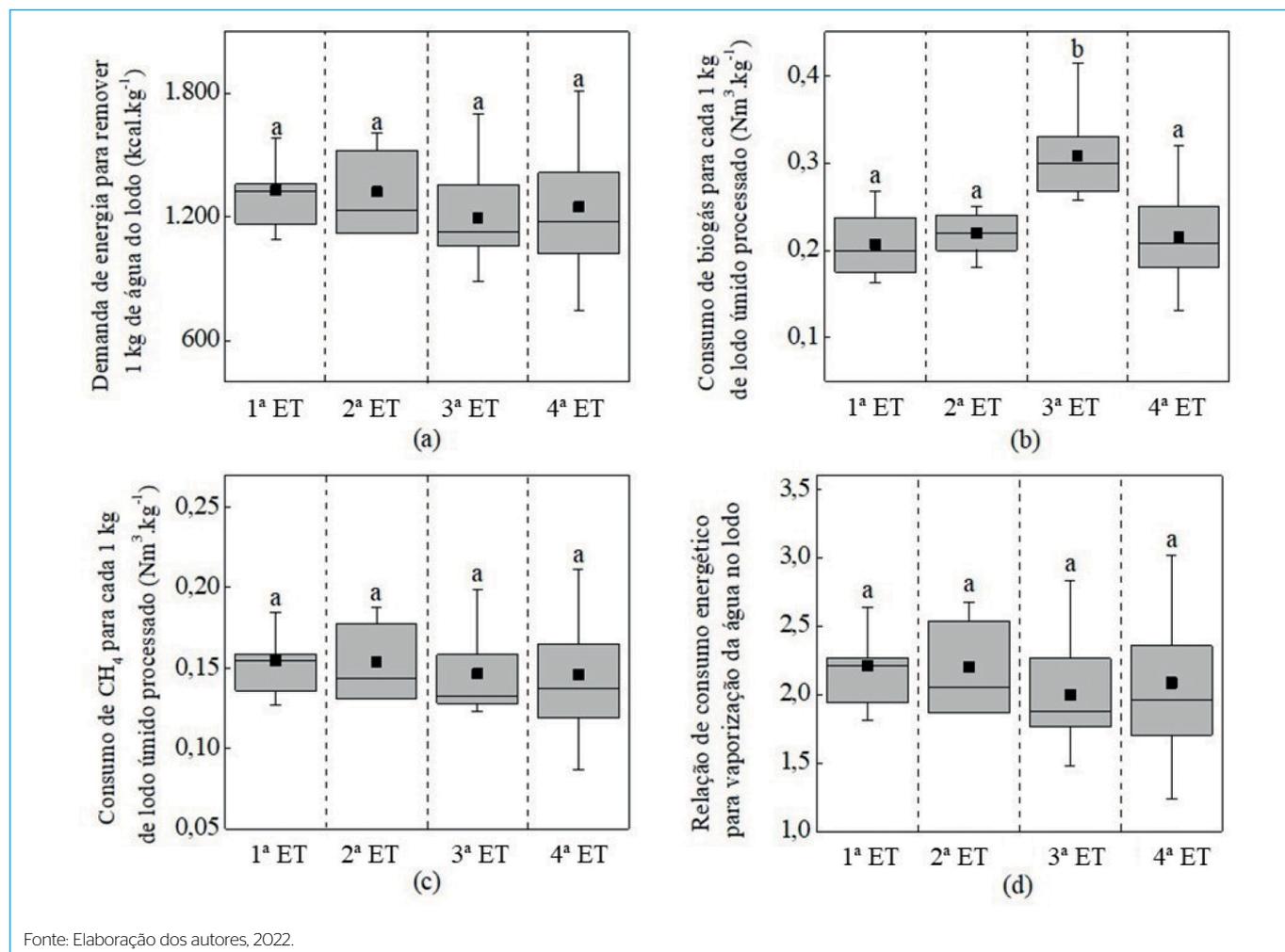
próximos daqueles encontrados na literatura para secadores do tipo granular rotativo. De acordo com Arlabosse *et al.* (2012), Bennamoun *et al.* (2013) e Possetti *et al.* (2015), as faixas típicas de demanda energética nesses secadores variam entre 750 e 1.200 kcal para cada 1 kg de água evaporada.

Os resultados de consumo de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado variaram de 0,21 a 0,30 Nm<sup>3</sup>. O maior valor de consumo encontrado para esse parâmetro se deu durante a realização da terceira etapa de investigação. Por sua vez, os valores de consumo de CH<sub>4</sub> necessários para secar cada 1 kg de lodo úmido variaram de 0,14 a 0,16 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>. Ante esses resultados, destaca-se que o emprego do parâmetro de consumo de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado deve ser utilizado com ressalvas em estudos e projetos de dimensionamento de sistemas de secagem, uma vez que a concentração de CH<sub>4</sub> presente no biogás pode variar consideravelmente por meio de fatores de natureza bioquímica no processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica no reator, bem como pela diluição do esgoto sanitário por eventos significativos de chuvas (MELO *et al.*, 2020). A relação de consumo energético do secador para vaporização da água presente nos diferentes tipos de lodos variou de 1,9 a 2,2 vezes mais do que o consumo ideal de 600 kcal.kg<sup>-1</sup> de água removida. Esses resultados se mostram dentro da faixa de 1,1 a 2,5 reportada na literatura para secadores rotativos (BENNAMOUN *et al.*, 2013; TUNÇAL *et al.*, 2015).

Com base na análise estatística de variância (ANOVA) e do teste de Tukey (a 5% de probabilidade de erro), constatou-se que os valores médios obtidos durante as etapas de investigação para o parâmetro de energia necessária para remoção de 1 kg de água presente no lodo não variaram significativamente entre si. O mesmo ocorreu para o parâmetro de consumo de CH<sub>4</sub> para cada 1 kg de lodo úmido processado e relação de consumo energético para vaporização da água presente no lodo. Sendo assim, pode-se afirmar que, para as condições operacionais impostas no presente trabalho, a eficiência de remoção de 1 kg de água presente nos diferentes tipos de lodos foi a mesma em todas as etapas de investigação. Entretanto, no parâmetro de consumo de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado, constatou-se que a média encontrada durante a realização da etapa 3 (lodo de reator UASB misturado com lodo de flotor) variou de forma significativa em relação às médias das outras etapas de investigação. Conforme já destacado, tal fato pode ser explicado pelo baixo teor de CH<sub>4</sub> presente no biogás durante a etapa 3.

### Higienização dos lodos

A Tabela 6 apresenta os resultados das análises microbiológicas dos diferentes tipos de lodos, antes e depois do processo de secagem térmica. De modo geral,



**Figura 3** - Aspectos energéticos nas diferentes etapas de investigação da secagem térmica: (a) demanda energética do sistema piloto para remoção de 1 kg de água presente nos diferentes tipos de lodos; (b) consumo de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado; (c) consumo de CH<sub>4</sub> para cada 1 kg de lodo úmido processado; (d) relação de consumo energético entre a energia necessária para remover 1 kg de água presente no lodo e o calor latente de vaporização da água a 0°C. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. 1ª etapa (ET): lodo do reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB); 2ª ET: lodo aeróbio; 3ª ET: lodo do reator UASB misturado com lodo de flutuador (relação 4:1); 4ª ET: lodo do reator UASB misturado com espuma (relação 4:1).

**Tabela 6** - Indicadores de contaminação biológica dos diferentes tipos de lodos antes e depois do processamento térmico\*.

Etapas de investigação		Indicador biológico			
		Ovos viáveis de helmintos (ovo.g <sup>-1</sup> de ST)	<i>Salmonellas</i> (UFC.g <sup>-1</sup> de ST) <sup>a</sup>	Vírus entéricos (UFF.g <sup>-1</sup> de ST) <sup>b</sup>	Coliformes termotolerantes (UFC.g <sup>-1</sup> de ST)
1ª ET	Antes	5 ± 2	9,9 × 10 <sup>3</sup> ± 1,1 × 10 <sup>3</sup>	> 10	2,3 × 10 <sup>4</sup> ± 3,0 × 10 <sup>3</sup>
	Depois	< 0,1	Ausente	Ausente	70 ± 20
2ª ET	Antes	2 ± 0,5	832 ± 87	> 10	592 ± 110
	Depois	Ausente	Ausente	Ausente	10 ± 4
3ª ET	Antes	> 10	320 ± 50	> 10	8,2 × 10 <sup>6</sup> ± 2,5 × 10 <sup>4</sup>
	Depois	Ausente	Ausente	< 0,1	20 ± 10
4ª ET	Antes	7 ± 3	-	> 10	-
	Depois	< 0,1	-	< 0,1	-
CONAMA 375 de 2006 (VMP) <sup>c</sup>		< 0,25	Ausente	< 0,25	< 10 <sup>3</sup>

A unidade formadora de colônia; bunidade formadora de foco; cVMP: valor máximo permitido.

\*Os valores apresentados remetem-se à média e ao desvio padrão dos resultados dos ensaios realizados nas etapas de investigação dos diferentes tipos de lodos investigados. 1ª etapa (ET): lodo do reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB); 2ª ET: lodo aeróbio; 3ª ET: lodo do reator UASB misturado com lodo de flutuador (relação 4:1); 4ª ET: lodo do reator UASB misturado com espuma (relação 4:1).

Fonte: Elaboração dos autores, 2022

verificou-se uma redução significativa nos teores de ovos viáveis de helmintos e de coliformes termotolerantes em todos os tipos de lodos avaliados. Para helmintos, pode-se dizer que a redução praticamente atingiu a totalidade. Além disso, o tratamento térmico do lodo promoveu a remoção de salmonellas e de vírus entéricos, fazendo com que todos os valores máximos permitidos preconizados na CONAMA 375 de 2006 fossem atendidos. Desse modo, pode-se constatar que o tempo de retenção empregado (0,3 a 0,5 horas) e a temperatura do ar utilizada na entrada do secador térmico (aproximadamente 200°C) foram suficientes para a higienização dos diferentes tipos de lodos.

De acordo com Hindiyeh (1995), o lodo submetido a uma temperatura constante de 54°C, por período mínimo de 2 horas, já pode ser considerado higienizado. Resultados similares aos obtidos no presente trabalho foram reportados por Borges *et al.* (2005) e Lobato *et al.* (2012), tendo esses autores conduzidos experimentos de tratamento térmico de lodo, utilizando biogás de reatores UASB como fonte de energia, em escala de protótipos. Estudos conduzidos por Batistella *et al.* (2015) em um secador granulador rotativo, semelhante ao empregado no presente estudo, também evidenciaram redução significativa nos indicadores biológicos para uso agrícola do lodo. Entretanto, a fonte de energia utilizada no secador térmico nos experimentos desses autores foi proveniente dos gases quentes de combustão do lodo seco.

## CONCLUSÃO

Os resultados apresentados no presente trabalho permitiram afirmar que os secadores térmicos, movidos a biogás produzido em reatores UASB, são uma promissora tecnologia para o gerenciamento de lodos e escumas em ETE, uma vez que permitem diminuir significativamente o volume do material que precisa ser estocado e transportado até seu destino final. De modo geral,

o processamento térmico foi responsável por reduzir em aproximadamente 80% da massa dos diferentes tipos de lodos avaliados. No que tange à eficiência energética do sistema térmico piloto, ressalta-se que os resultados das diferentes etapas de investigação evidenciaram que energia necessária para remoção de 1 kg de água presente nos diferentes tipos de lodo não apresentaram diferenças significativas entre si. Com base nisso, considerando as condições operacionais impostas no presente trabalho, as propriedades físico-químicas dos lodos avaliados não influenciaram o consumo de energia requerido pelo sistema de secagem térmica. Contudo, destaca-se que o consumo de biogás para cada 1 kg de lodo úmido processado durante a terceira etapa de investigação distinguiu-se estatisticamente dos demais. Tal fato pode estar associado aos eventos significativos de chuva ocorridos durante essa etapa. Por fim, comprovou-se ainda que o sistema térmico piloto foi capaz de higienizar os diferentes tipos de lodos em níveis que permitem seu enquadramento como classe A (uso agrícola), conforme preconizado pela CONAMA 375 de 2006.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Rietow, J. C.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Software, Supervisão, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Possetti, G. R.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Software, Supervisão, Visualização, Escrita – Primeira Redação. Gervasoni, R.: Conceituação, Obtenção de Financiamento, Investigação, Recursos. Carneiro, C.: Conceituação, Obtenção de Financiamento, Administração do Projeto, Recursos, Validação. Noyola, A. R.: Análise Formal, Validação. Aisse, M. M.: Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22 ed., 1496 p.; Washington, DC: APHA, 2012.
- ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. Sewage sludge: treatment and final disposal. In: *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG: Companhia de Saneamento do Paraná, 2001, 484 p.
- ARLABOSSE, P.; FERRASSE, J.H.; LECOMPTE, D.; CRINE, M.; DUMONT, Y.; LÉONARD, A. Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorization. *Modern Drying Technology: Energy Savings*, v. 4, p. 295 – 329, 2012. <http://doi.org/10.1002/9783527631728.ch28>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 12209: elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgoto*. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BATISTELLA, L.; SILVA, V.; SUZIN, R.C.; VIRMOND, E.; ALTHOFF, C.A.; MOREIRA, R.F.P.M.; JOSÉ, H.J. Gaseous emissions from sewage sludge combustion in a moving bed combustor. *Waste Management (Elmsford)*, v. 46, p. 430 – 439, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.039>
- BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 29 – 43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.043>
- BILOTTA, P.; ROSS, B.Z.L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 21, n. 2, p. 275 – 282, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016141477>
- BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M.; SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 22, n. 6, p.1129 – 1139, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>
- BORGES, E.S.M., GODINHO, V.M.; CHERNICHARO, C.A.L. Thermal hygienization of excess anaerobic sludge: a possible self-sustained application of biogas produced in UASB reactors. *Water Science and Technology*, v. 52, p. 227 – 234, 2005. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16459796/>>. Acesso em: 31 mar. 2022.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, DF: ANA, 2020, 44 p.

- BRASIL. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF: CONAMA, 2006.
- CABRAL, B.G.; CHERNICHARO, C.A.L.; PLATZER, C.J.; BARJENBRUCH, M.; BELLI FILHO, P. Evaluation of biogas production and energy recovery potential in 5 full-scale WWTPs with UASB reactors. *Chemical Engineering and Chemical Process Technology*, v. 3, p. 1 - 8, 2017. Disponível em: <<https://www.jscimedcentral.com/ChemicalEngineering/chemicalengineering-31043.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2022.
- CHERNICHARO, C.A.L.; RIBEIRO, T.B.; PEGORINI, E.S.; POSSETTI, G.R.C.; MIKI, M. K.; SOUZA, S.N. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 1: tópicos de interesse. *Revista DAE*, v. 66, p. 5 - 16, 2018. Disponível em: <<http://revistadae.com.br/downloads/edicoes/Revista-DAE-214.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2022.
- CONSTANT, M.; NAVEAU, H.; FERRERO, G.L.; NYNS, E.J. Biogas end-use in the European community. *Elsevier Science Publisher*, England, UK: 1989, 360 p. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/6987965>>. Acesso em: 31 mar. 2022.
- DUARTE, O.; SÁNCHEZ, L.; CÁRDENAS, M.; CANTÃO, M.; POSSETTI, G.R.C.; AISSE, M.M. Ventajas y desventajas del uso de la espectrofometría monitoreando la calidad del agua residual en un reactor anaeróbico. *Revista Científica Unet*, v. 30, p. 302 - 312, 2018.
- HINDIYEH, M.Y. *Enumeration and survival studies on helminth eggs in relation to treatment of anaerobic and aerobic sludges in Jordan*. 1995. Tese (Doutorado) - School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, England, UK, 1995, 368 p.
- KAMINSKI, G.F.; WAGNER, L.G.; SILVA, F.O.M.; POSSETTI, G.R.C. Análise crítica acerca da aplicação de queimadores enclausurados em ETEs para destruição de biogás. In: SIMPÓSIO MAUI BRASIL, 3 - Alemanha. *Anais [...]*. Curitiba, PR: Universität Stuttgart, UFPR, SENAI e ABES: ABES, 2017.
- 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, p. 159 - 167, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.549>.
- MELO, D.F.; NEVES, P.N.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; CHERNICHARO, C.A.L.; PASSOS, F. The effect of seasonality in biogas production in full-scale UASB reactors treating sewage in longterm assessment. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 39, p. 1 - 11, 2020. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1797741>
- MOREIRA, H.C. *Biogás em estações de tratamento de esgotos: os principais legados da cooperação técnica Brasil-Alemanha*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017, 174 p.
- NOYOLA, A.; MORGAN, J.M.S.; LÓPEZ, J.E.H. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Biotechnology*, v. 5, p. 93 - 114, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.08.024> 1: CAS:528:DC%2BD3sXovFGjs7g%3D
- PACHAURIAND, R.K.; MEYER, L.A. (ed.). Intergovernmental panel on climate change. *Climate change 2014: synthesis report*. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
- PANEPINTO, D.; FIORE, S.; GENON, G.; ACRI, M. Thermal valorization of sewer sludge: perspectives for large wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 1323 - 1329, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.014>
- POSSETTI, G.R.C.; JASINSKI, V.P.; MESQUITA, N.C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2013, *Anais [...]*. Goiânia, GO: ABES, 2013.
- 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. (ed.). *Anaerobic reactors for sewage treatment: design, construction and operation*. London: IWA Publishing, p. 194 - 236, 2019. <https://doi.org/10.2166/9781780409238>
- 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, *Anais [...]*. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2015.
- ROSA, A.P.; LOBATO, L.C.S.; BORGES, J.M.; MELO, G.C.B.; CHERNICHARO, C.A.L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso da estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 21, n. 2, p. 315 - 328, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>
- ROSS, B.Z.L.; CARNEIRO, C.; MARQUES, C.J.; COSTA, F.J.O.G.; FROEHNER, S.; AISSE, M.M. Impacto da incorporação de espuma em lodo de esgoto com fins agrícolas. *Revista DAE*, v. 64, p. 6 - 18, 2016. <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2015.001>
- SEPTIEN, S.; MIRARA, S.W.; MAKUNUNIKA, B.S.N.; SINGH, A.; POCOCK, J.; VELKUSHANOVA, K.; BUCKLEY, C.A. Effect of drying on the physical and chemical properties of faecal sludge for its reuse. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, p. 1 - 9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103652>
- TUNÇAL, T.; JANGAM, S.V.; MUJUMDAR, A.S. Physicochemical aspects of sludge drying. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). *Handbook of industrial drying*. 4. ed. New York, NY: CRC Press, 2015.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge*. EPA 815-R-06e002. USEPA, 2003. Revised edition.
- VASILAKI, V.; MASSARA, T.M.; STANCHEV, P.; FATONE, F.; KATSOU, E. A decade of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: a critical review. *Water Research*, v. 161, p. 392 - 412, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.022>
- WILHELM, I.; ROMAN, E.; SANCHEZ-FAUQUIER, A. Viruses causing gastroenteritis. *Clin Microbiol Infect.*, v. 9, p. 247 - 262, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1469-0691.2003.00560.x>