

Análise de sustentabilidade energética na secagem térmica de sub-produtos do tratamento de esgoto

RESUMO

O objetivo deste artigo é analisar a sustentabilidade energética, econômico-financeira e operacional da implantação de secador térmico em estação de tratamento de esgoto de Curitiba. A metodologia se baseou na estimativa de geração de biogás, produção lodo e energia disponível, e avaliação de 3 alternativas (ou cenários): 1) armazenar o biogás nos meses em que a produção excede a demanda; 2) reduzir o teor de ST no lodo após o secador térmico; 3) complementar a energia do biogás com a energia liberada na combustão do lodo seco. Como resultado: obteve-se 40,1% de ST (cenário 1); alternativa 2) atende a demanda do equipamento (36,1 MWh) e fornece energia excedente (14,2 MWh). As duas alternativas garantem sustentabilidade energética. O lodo seco pode ser comercializado (R\$ 165,00 ton⁻¹). Como conclusão: a recuperação de biogás e lodo gera energia excedente (2.672,6% no processamento e 200% na armazenagem), reduz 85% da quantidade de lodo sem queimador e 96% com queimador.

PALAVRAS-CHAVE: Aproveitamento energético. Energia. Lodo. Biogás. Economia circular.

Renata Mulinari

Universidade Positivo, Curitiba,
Paraná

renata_mulinari@hotmail.com

Patricia Bilotta

Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento Local (PPGDL),
Universidade Augusto Motta
(UNISUAM), Rio de Janeiro, Rio de
Janeiro.

pb.bilotta@gmail.com

INTRODUÇÃO

O tratamento biológico de esgoto sanitário por processo anaeróbio, inevitavelmente, gera lodo e biogás como subprodutos da decomposição da matéria orgânica. Esses subprodutos podem comprometer a saúde humana e a qualidade ambiental quando seu manejo é inadequado, razão pela qual esse assunto tem sido objeto de muitos estudos (Paredes *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2017). No tratamento anaeróbio de esgoto, estima-se que cerca de 50 a 80% da demanda química de oxigênio (DQO) afluente pode ser convertida em biogás, 10 a 20% é transferida para o lodo (biomassa) e 10 a 30% permanece no efluente como DQO remanescente do tratamento (Chernicharo, 2007).

O lodo proveniente de sistemas de tratamento anaeróbio (reatores e lagoas) é constituído majoritariamente por água (cerca de 97%) e o restante sólidos totais (ST), que incluem partículas em suspensão e dissolvidas, orgânicas e inorgânicas (Tao *et al.*, 2012). O manejo do lodo inclui uma etapa de secagem para elevar o teor de ST e viabilizar o seu transporte, bem como procedimentos para a adequação da qualidade físico-química e biológica do lodo conforme a disposição final (Zhang *et al.*, 2017). O biogás é uma mistura de vários gases, principalmente, CH₄ (40 a 90%), CO₂ (10 a 50%) e, em menor quantidade, H₂, N₂, H₂S, CO, NH₃ e vapor de água (0 a 10%) (Noyola *et al.*, 2006). Todavia, o metano, principal componente do biogás, é considerado um dos gases de efeito estufa (GEE) e seu potencial de aquecimento global (PAG) é 21 vezes o valor do CO₂ (gás de referência) (IPCC, 2014).

Pode-se destacar algumas alternativas de tratamento e destinação de lodo biológico e biogás: 1) para o lodo a higienização e aplicação no solo para recuperação de áreas degradadas (Bittencourt *et al.*, 2012) e fertilização agrícola (Marin *et al.*, 2010), estabilização e utilização na fabricação de materiais cerâmicos (Silva *et al.*, 2015), higienização e envio para aterros sanitários (Werther e Ogada, 1999), secagem térmica para geração de energia (Rosa *et al.*, 2018a; Taschelmayer e Bilotta, 2021); 2) para o biogás o aproveitamento energético (Bilotta e Ross, 2016).

A higienização, que precede o uso agrícola do lodo biológico de ETE, comumente é realizada por meio de estabilização química, que consiste na adição de cal virgem para elevar o pH e a temperatura do lodo e promover a eliminação de agentes patogênicos (vírus, bactérias, helmintos) (EPA, 2003; Andreoli *et al.*, 2007). Ao final do tratamento, o lodo pode atender os limites biológicos estabelecidos pela Resolução CONAMA 375 para disposição no solo (Brasil, 2006). Todavia, a estabilização alcalina requer longo período de tratamento (40 a 60 dias) e ocupa grandes espaços físicos para implantação de pátios de cura. Além disso, se o revolvimento do lodo caleado for inadequado, ou se não forem utilizadas as quantidades corretas de cal, a higienização completa do lodo pode não ocorrer, comprometendo a qualidade do produto e inviabilizando o seu uso agrícola (Andreoli *et al.*, 2007).

O uso de biogás e lodo na geração de energia (térmica ou elétrica) tem sido estudado. Dentre as tecnologias para essa finalidade, tem-se os secadores térmicos mecanizados (Rosa *et al.*, 2018a; Michalovicz e Bilotta, 2022), cujas vantagens são: redução do volume de lodo na secagem térmica (cerca de 75% em massa) e consequente redução do custo de transporte para a disposição final do lodo (Rosa *et al.*, 2018a); potencial de aproveitamento da capacidade calorífica do biogás e do lodo seco (Taschelmayer e Bilotta, 2021); alta eficiência no controle de microrganismos patogênicos, devido à aplicação de temperaturas elevadas (acima de 200°C) (Possetti *et al.*, 2015); redução da quantidade de CO₂ equivalente emitido para a atmosfera quando o gás metano é utilizado como combustível (IPCC, 2014). Rosa *et al.* (2020) avaliaram dois cenários de recuperação de energia no tratamento anaeróbio de esgoto e verificaram que quanto maior o teor de sólidos totais no lodo, maior o aproveitamento energético do biogás (1,55 a 3,50 MJ m⁻³ de lodo). A Tabela 1 compara o poder calorífico do biogás e do lodo com outros combustíveis (Rosa *et al.*, 2021; Rosa *et al.*, 2018a; Michalovicz e Bilotta, 2022; Arjharn *et al.*, 2013; Atienza-Martínez *et al.*, 2013; Noyola *et al.*, 2006).

Tabela 1. Comparação entre o poder calorífico de alguns combustíveis.

COMBUSTÍVEL	PODER CALORÍFICO	
Biogás 60% CH ₄ (típico)	6,0 kWh Nm ⁻³	5.143,8 kcal Nm ⁻³
Biogás 70% CH ₄	7,0 kWh Nm ⁻³	5.995,0 kcal Nm ⁻³
Gás natural	10,8 kWh Nm ⁻³	7.544,2 kcal Nm ⁻³
Metano	10,0 kWh Nm ⁻³	8.572,9 kcal Nm ⁻³
Lodo seco (65% de ST) (*) (**)	0,6 kWh kg ⁻¹	501,6 kcal kg ⁻¹
Lodo seco (90% de ST) (*) (**)	2,5 kWh kg ⁻¹	2.197,3 kcal kg ⁻¹
Bagaço de cana de açúcar (*) (**)	4,8 kWh kg ⁻¹	4.132,0 kcal kg ⁻¹
Madeira (*) (**)	5,0 kWh kg ⁻¹	4.299,2 kcal kg ⁻¹

*Poder calorífico inferior. ** Valor médio.

Quanto maior a eficiência de conversão de compostos complexos (carboidratos, proteínas, lipídeos) em metano, durante a degradação da matéria orgânica presente no lodo, maior será a quantidade de energia liberada na combustão do biogás (Bilotta e Ross, 2016; Rosa *et al.*, 2018a). Já em relação ao lodo, quanto maior o teor de sólidos totais (ST), menor a quantidade de umidade e maior será o seu poder calorífico. Os compostos orgânicos são os responsáveis pela capacidade calorífica do lodo seco (Carneiro *et al.*, 2020). Durante a combustão do lodo, que ocorre em temperaturas superiores a 200°C (Rodrigues *et al.*, 2013), a fração orgânica é convertida em CO₂ e há liberação de energia térmica, que pode ser aproveitada na própria ETE (Rosa *et al.*, 2018a).

Os secadores térmicos são equipamentos projetados para a evaporação da água existente no lodo (cerca de 80% de umidade em massa). O processo envolve a elevação da temperatura do lodo acima de 100°C, resultando em lodo com maior teor de sólidos totais (65% a 95%) (Michalovicz e Bilotta, 2022). Todavia, embora a secagem térmica seja eficiente, ela demanda alto investimento para implantação (Taschelmayer e Bilotta, 2021) e implica no consumo de energia para secar o lodo antes que ele seja utilizado como combustível - em torno de 670 kcal kg⁻¹ de lodo para elevar o teor de ST de 30% a 90% (David, 2002). Por isso, deve-se analisar caso a caso.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar a sustentabilidade energética, econômico-financeira e operacional da implantação de um secador térmico, movido a biogás e lodo seco, em uma ETE na cidade de Curitiba-PR. As hipóteses investigadas foram: 1) a energia térmica do biogás atende a demanda energética do secador térmico; 2) a energia térmica do biogás e lodo seco suprem a demanda energética do secador térmico; 3) a eficiência do secador térmico viabiliza economicamente a sua implantação e operação em substituição ao sistema de estabilização alcalina do lodo.

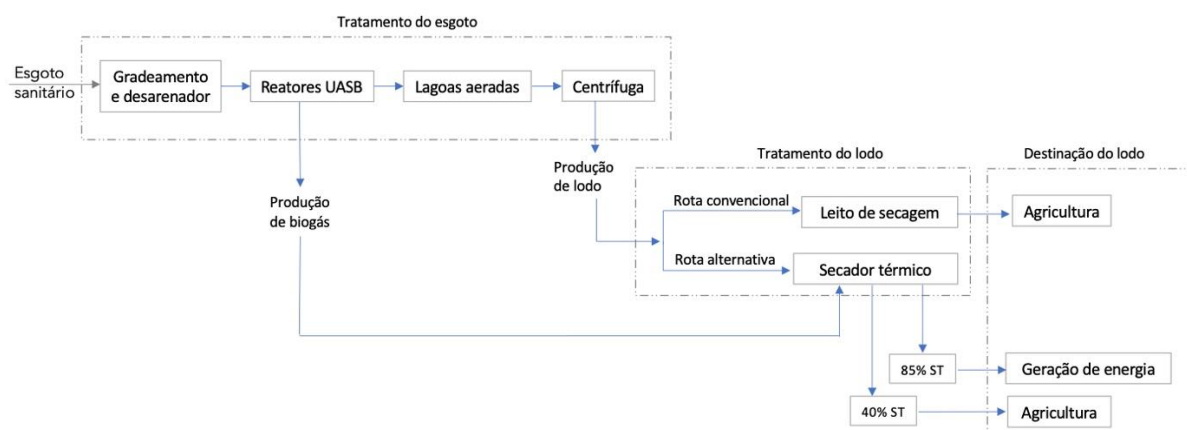
O aproveitamento energético de subprodutos do tratamento de esgoto doméstico (biogás e lodo) vem de encontro aos princípios do conceito de economia circular, tratado como uma abordagem para a implementação do desenvolvimento sustentável (Kirchherr *et al.*, 2017), particularmente na escala industrial, como é o caso de uma planta de tratamento de esgoto municipal, e para o cumprimento dos objetivos 7 (“Energia limpa e acessível”) e 11 (“Cidades e comunidades sustentáveis”) da Agenda 2030 da ONU (Schroeder *et al.*, 2018).

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em uma ETE localizada na cidade de Curitiba, Brasil, que atende cerca de 242 mil habitantes (vazão média 420 L s^{-1}) e possui tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), tratamento secundário (6 reatores anaeróbios do tipo UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, seguidos por 2 lagoas aeradas) e tratamento do lodo (tanque de equalização, centrífuga e leito de secagem). O biogás gerado nos reatores UASB é coletado e queimado e o lodo proveniente da centrífuga é submetido a desaguamento e higienização em pátio de cura, utilizando-se secagem alcalina prolongada e, posteriormente, é destinado ao uso agrícola.

A pesquisa foi dividida em cinco etapas: 1) estimativa da produção de biogás (nos reatores anaeróbios) e de lodo (após centrífuga); 2) estimativa da quantidade de energia disponível a partir do biogás e lodo seco (com 85% de ST); 3) levantamento das características operacionais do secador térmico (equipamento utilizado no aproveitamento energético do biogás e lodo seco); 4) avaliação da sustentabilidade energética da rota alternativa em comparação com a secagem alcalina prolongada (rota convencional); 5) análise econômica comparativa das duas rotas analisadas (Figura 1).

Figura 1. Representação esquemática dos componentes da pesquisa.



Produção de biogás e lodo e quantidade de energia disponível

A produção de biogás foi estimada a partir dos 6 reatores UASB em operação na ETE e a quantidade de energia química disponível no biogás foi determinada por meio do *software* ProBio, desenvolvido no âmbito do Programa Probiogas, coordenado pelo Ministério das Cidades, em uma parceria realizada entre a Companhia de Saneamento do Paraná e a Universidade Federal de Minas Gerais (INCT, 2021). O *software* permite simular três diferentes cenários de desempenho de reator UASB (conservador, típico e ótimo), que variam de acordo com a eficiência de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) afluyente e o percentual de metano no biogás (isto é, a eficiência de conversão de matéria orgânica em metano). Utilizou-se o cenário típico, por se assemelhar às condições da ETE.

Para estimar a quantidade de lodo produzido, utilizou-se dados de monitoramento da ETE fornecidos pela empresa responsável pelos serviços de água e esgoto do Paraná, referentes a um intervalo de tempo de 11 meses. Os dados utilizados foram a massa média mensal de lodo (em kg) e o teor médio de sólidos totais (em %). Para os cálculos de quantidade de energia disponível no lodo seco, considerou-se a totalidade de lodo proveniente da centrífuga (isto é, reatores UASB e lagoas aeradas) e a secagem do lodo até o teor de sólidos totais de 85%, conforme especificação técnica do fabricante do secador térmico, para utilização do lodo seco como combustível (Albrecht, 2018). A Tabela 2 resume os parâmetros e as condições aplicadas à determinação da quantidade de energia disponível no biogás e lodo seco.

Tabela 2 – Condições utilizadas nos cálculos de energia disponível.

PARÂMETROS	CONDIÇÕES
Percentual de CH ₄ no biogás	75% (*)
Poder calorífico inferior do biogás	5.000 kcal Nm ⁻³ (**)
Poder calorífico inferior do lodo seco	2.800 kcal kg ⁻¹ (**)
Teor de sólidos totais no lodo seco	85% (**)
Energia para secagem do lodo	1.021,0 kcal.kg ⁻¹ de água removida (***)

(*) Cenário conservador definido pelo *software* Probio. (**) Dado fornecido pelo fabricante do equipamento. (***) Rosa *et al.* (2018a)

Características do secador térmico

O equipamento utilizado na análise energética foi um secador térmico do tipo granular rotativo (modelo Bruthus), com potência instalada de 70 kW e configuração para ser alimentado com gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP), biogás e lodo com 85% de sólidos totais (Albrecht, 2018). Todavia, neste estudo considerou-se apenas o uso de biogás e lodo seco por serem recursos disponíveis na ETE. Para a utilização de lodo seco como combustível foi necessário incluir um queimador (modelo Drako) do mesmo fabricante. Segundo especificações do fabricante, a carga máxima de lodo úmido no secador é 700 kg h⁻¹, o consumo de biogás é 105,8 Nm³ h⁻¹ e de lodo seco (com 85% ST) é 189 kg.h⁻¹ (Albrecht, 2018). Admitiu-se ainda 15 h de funcionamento diário do secador térmico (isto é, em escala intermitente de operação).

Análise energética

A análise do potencial energético da ETE consistiu no levantamento da quantidade de energia liberada na combustão do biogás e lodo seco (85%) e sua comparação com a quantidade de energia requerida pelo secador térmico para promover a secagem da totalidade de lodo proveniente da centrífuga no intervalo de 11 meses. A Tabela 3 apresenta as equações utilizadas

Tabela 3 – Equações utilizadas no estudo.

FÓRMULAS	VARIÁVEIS
$V_{\text{sólidos}} = V_{\text{lodo}} \cdot C_i$ (Equação 1)	V _{sólidos} = Volume de sólidos totais no lodo (m ³ .d ⁻¹) C _i = Teor de ST no lodo após centrifugado (%) V _{lodo} = Produção de lodo (m ³ .d ⁻¹)
$M_{\text{água}} = \left(V_{\text{lodo}} - \left(\frac{V_{\text{sólidos}}}{C_f} \right) \right) \cdot \gamma$ (Equação 2)	M _{água} = Massa de água evaporada (kg.d ⁻¹) C _f = Teor de ST no lodo após secagem (85%) γ = Densidade do lodo (1,000.0 kg.m ⁻³)
$E_{\text{total}} = E_{\text{nec}} \cdot M_{\text{água}}$ (Equação 3)	E _{total} = Energia total para secagem do lodo (kcal.d ⁻¹) E _{nec} = Energia para secar o lodo (1,021.0 kcal.kg ⁻¹ de água removida)

Análise econômico-financeira e operacional

A análise econômica consistiu na comparação entre o método atualmente utilizado pela ETE para secagem e higienização do lodo (estabilização alcalina) e o secador térmico mecanizado (modelo Bruthus), considerando-se como combustível o biogás e o lodo seco gerados na própria planta de tratamento. Para tanto, foram avaliados: a) os custos de operação do sistema de estabilização alcalina (consumo de cal virgem, mão de obra para revolvimento do material caleado no pátio de cura, transporte do lodo caleado para o uso agrícola); b) o investimento para implantação e operação do sistema de secagem térmica do lodo (aquisição dos equipamentos necessários, mão de obra para operar o secador, manutenção do sistema); c) os custos de manutenção do secador térmico (1% ao

ano sobre o investimento). Desconsideraram-se os custos com exames físico-químicos e biológicos de monitoramento da qualidade do lodo, bem como o salário de um funcionário e os produtos químicos utilizados na centrífuga, por serem itens necessários e comuns aos dois sistemas.

Para a análise financeira foram considerados os seguintes indicadores: valor presente líquido (VPL), taxa mínima de atratividade (TMA) e *payback* (Gitman, 2014). Para o cálculo do VPL, admitiu-se como saída do fluxo de caixa no sistema de secagem térmica o investimento inicial (aquisição do equipamento) e os custos médios mensais com operação do sistema, e como entrada do fluxo de caixa o custo evitado com a substituição do sistema de higienização alcalina por secagem térmica (consumo de cal e transporte do lodo para a agricultura ou aterro sanitário). Os valores aplicados ao estudo foram: horizonte de projeto de 20 anos e TMA de 12% (conforme diretrizes adotadas pela companhia de saneamento). Realizou-se também a análise comparativa de condições operacionais dos dois sistemas, considerando-se: a) quantidade de lodo processado (higienização e secagem); b) área para estocar o lodo processado; c) quantidade de lodo após secagem.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 2 e 3 mostram os resultados do levantamento da produção de biogás (nos reatores UASB) e lodo (após a centrífuga), respectivamente. A vazão média afluyente no período foi $26.657,78 (\pm 1.707,77) \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ e a DQO afluyente foi $567,15 (\pm 82,57) \text{ mg L}^{-1}$.

Figura 2. Estimativa da produção de biogás no período.

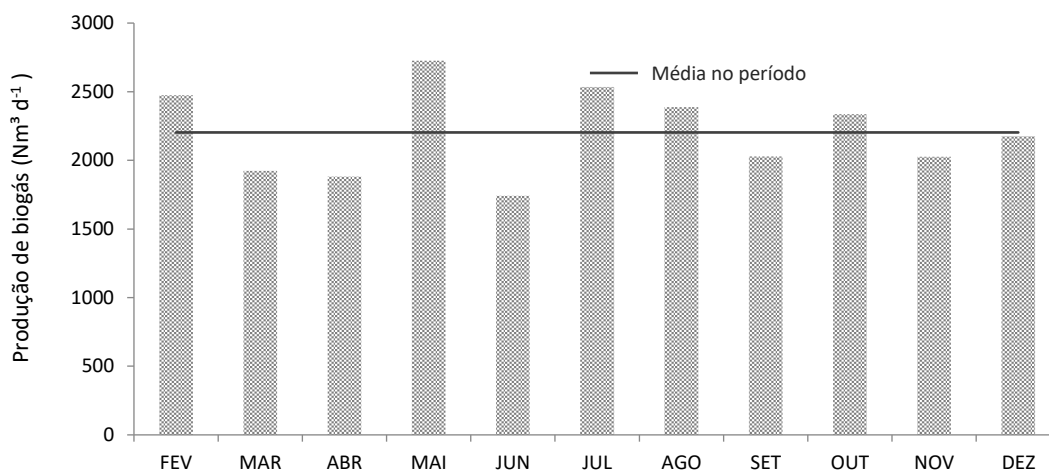
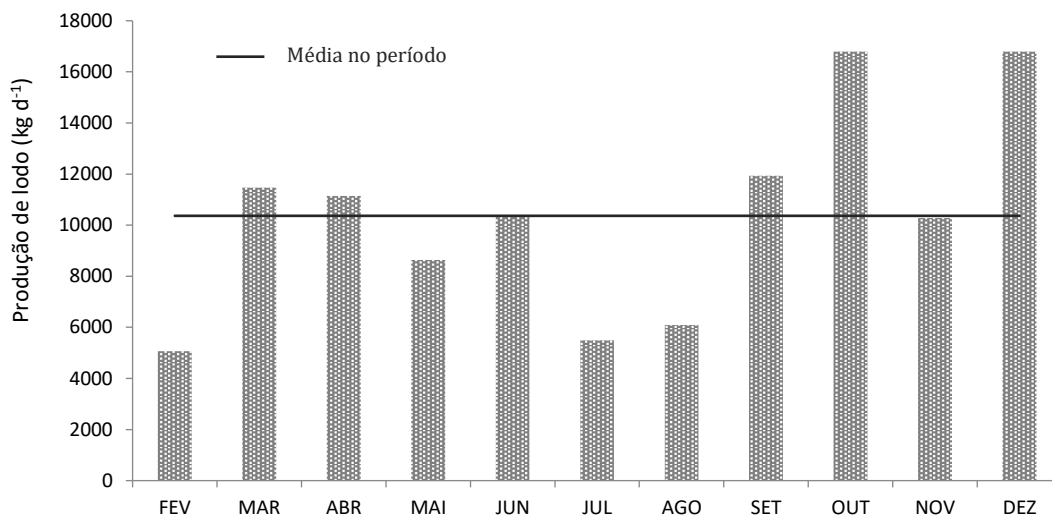


Figura 3. Produção de lodo úmido (20% ST) no período.

Constatou-se variação mensal da produção de biogás ($2.203,31 \pm 310,63 \text{ Nm}^3 \text{ d}^{-1}$) e de lodo com 20% de ST ($10.365,64 \text{ kg d}^{-1} \pm 4.002,52 \text{ kg d}^{-1}$) ao longo do tempo, como era esperado, pois a DQO média mensal afluyente também sofreu variação na entrada da ETE durante o mesmo período ($436,23$ a $710,83 \text{ mg L}^{-1}$). Vários fatores podem estar associados a alterações na produção de biogás, como redução significativa na temperatura do ambiente nos meses de inverno, oscilação no pH do esgoto afluyente, mudanças nas características físico-químicas do esgoto bruto, descargas clandestinas de águas pluviais e efluentes industriais na rede coletora de esgoto, problemas operacionais no reator anaeróbio, entre outros (Metcalf e Eddy, 2016).

A produção de lodo, por outro lado, depende da frequência de retirada do lodo dos reatores biológicos. Na ETE investigada não há uma regularidade nesse processo, em razão, principalmente, de problemas nas bombas de dragagem, por isso a grande variação na produção de lodo entre os meses analisados.

Análise energética do aproveitamento do biogás e lodo

Para analisar a sustentabilidade energética do aproveitamento do biogás pelo secador térmico, comparou-se a produção média mensal de biogás com a demanda média mensal de energia requerida pelo equipamento, para elevar o teor de sólidos totais no lodo de 20% para 85%, considerando-se eficiência de 80% na conversão da energia química do biogás em energia térmica (Wellinger *et al.*, 2013). Admitiu-se ainda 15 h diárias de funcionamento do equipamento, com carga máxima de 700 kg h^{-1} de lodo úmido (especificação do fabricante). O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 1 – Estimativa mensal da oferta e demanda de energia do biogás para o secador térmico.

Mês	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Biogás ^(*) (10 ³ kcal d ⁻¹)	8.085	6.254	5.738	9.442	5.457	8.563	7.884	6.072	7.466	6.041	7.187
Demanda ^(**) (10 ³ kcal d ⁻¹)	4.060	9.186	8.947	7.071	8.422	4.417	4.922	9.602	15.006	8.139	14.466

(*) Quantidade média disponível. (**) Quantidade média requerida pelo secador térmico.

O Quadro 1 mostra que em 7 dos 11 meses analisados a produção média mensal de biogás foi inferior à quantidade requerida pelo equipamento para secar o lodo úmido. Os cálculos revelaram potencial de 7.108.085,27 (\pm 1.296.154,05) kcal d⁻¹ de energia no biogás e demanda do equipamento de 8.567.161,88 (\pm 3.620.954,49) kcal d⁻¹ para remover 8.390,96 (\pm 3.546,48) kcal d⁻¹ de água do lodo. Portanto, a utilização apenas do biogás produzido na ETE não foi suficiente para atender a necessidade energética do equipamento, diante do montante de lodo produzido na ETE.

A partir desses resultados, analisou-se três alternativas (ou cenários): 1) armazenar o biogás nos meses em que a produção do gás excede a demanda para secagem do lodo; 2) reduzir o teor de ST no lodo na saída do secador térmico; 3) complementar a produção do biogás com a energia liberada na combustão do lodo seco (85% ST) nos meses em que a quantidade de gás é inferior à demanda.

Alternativa 1: Utilização de um gasômetro

Em países como a Alemanha, onde o aproveitamento energético do biogás em ETEs é uma prática comum, é usual dimensionar um gasômetro para armazenar 30 a 50% do volume diário de biogás gerado na planta (Valente, 2015). Porém, a utilização de um gasômetro encarece o sistema de secagem térmica do lodo (cerca de R\$ 265 mil para armazenar até 700 Nm³ d⁻¹ de biogás) (Carvalho, 2016), por essa razão a alternativa 1 foi descartada.

Alternativa 2: Redução do teor de sólidos totais no lodo

Na alternativa 2 avaliou-se qual o teor máximo de ST que se poderia alcançar nos 7 meses de déficit de biogás, utilizando-se apenas a produção de biogás da ETE. Partindo-se dessa premissa, calculou-se a massa de água evaporada com a quantidade de energia disponível, utilizando-se as informações das Tabelas 2 e 3, e subtraiu-se esse valor da massa de lodo úmido para determinar a massa de lodo seco. Por fim, estimou-se o teor de ST alcançados, por meio de correlação simples (Quadro 2).

Verificou-se que a alternativa 2 otimiza as condições de transporte e manuseio do lodo, pois reduz a quantidade de água no lodo úmido (40,1 \pm 4,5% de ST) em comparação aos 20% obtidos na saída da centrífuga, tornando o sistema de secagem térmica autossustentável energeticamente, visto que não requer energia complementar para secar o lodo nos meses de déficit de biogás. Todavia, essa alternativa inviabiliza a utilização do lodo seco como combustível nos meses de déficit, pois o teor mínimo de ST de 85% (estabelecido pelo fabricante do secador térmico) não foi alcançado.

Quadro 2 – Redução do teor de ST no lodo nos meses com deficit de biogás.

Mês*	MAR	ABR	JUN	SET	OUT	NOV	DEZ
Energia disponível (10^3 kcal h ⁻¹)	416,9	382,5	363,8	404,8	497,7	402,7	479,1
Massa de água a evaporar (kg h ⁻¹)	339,5	329,8	333,2	312,2	251,4	368,9	250,8
Massa de lodo seco (kg h ⁻¹)	360,5	370,2	366,7	387,8	448,5	331,1	449,2
Teor de ST após secador (%)	42,7	41,6	42,0	39,7	34,3	46,5	34,3

*Admitiu-se 15 h diárias de funcionamento do secador térmico.

Alternativa 3: Utilização de lodo seco para complementar a energia do biogás

O Quadro 3 apresenta os resultados da estimativa de demanda de lodo seco (85% de ST) para suprir o déficit de energia do secador térmico nos meses em que a produção de biogás é insuficiente. Os cálculos foram realizados a partir das informações das Tabelas 2 e 3.

Quadro 3 – Utilização de lodo seco nos meses com deficit de biogás.

Mês*	MAR	ABR	JUN	SET	OUT	NOV	DEZ
Energia em déficit (10^3 kcal h ⁻¹)	195,5	213,9	197,7	235,3	502,7	139,9	485,7
Produção de lodo seco (kg h ⁻¹)	107,7	104,6	105,7	99,1	79,8	117,0	79,6
Demanda de lodo seco (kg h ⁻¹)	58,5	67,7	66,5	66,6	93,1	47,1	93,1

*Admitiu-se 15 h diárias de funcionamento do secador térmico.

Os resultados revelaram que a produção média de lodo seco foi superior à demanda requerida pelo secador térmico para suprir o déficit de energia do biogás em 5 dos 7 meses de déficit. As únicas exceções foram observadas nos meses de novembro e dezembro, em que a produção de lodo desaguado foi inferior à demanda. A estratégia adotada nesses casos pode ser reduzir o teor de ST no lodo úmido, utilizando-se apenas a quantidade de energia disponível no lodo seco. Sendo assim, a alternativa 3 mostrou que a combinação do biogás e lodo seco produzidos na ETE garante a sustentabilidade energética do secador térmico.

O secador térmico é uma estratégia eficiente para minimizar a quantidade de lodo gerado nas ETEs, pois pode reduzir drasticamente a umidade presente no lodo desaguado e o custo da destinação do lodo seco para aterro sanitário e agricultura (Rosa *et al.*, 2018a). Além disso, o uso dessa tecnologia possibilita a adequação da qualidade microbiológica do lodo para uso agrícola (Possetti *et al.*, 2015), pois atende aos critérios e limites definidos na resolução 375/2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente. Além disso, as estimativas revelaram a oferta de energia excedente em quase todos os meses da pesquisa (Quadro 4). Os resultados apontam que há um saldo de energia com o aproveitamento do biogás e lodo seco da ETE, que pode ser utilizado nas instalações da própria planta, reduzindo, assim, o consumo e a dependência de energia da rede.

Quadro 4 – Energia total excedente na ETE analisada.

Mês	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Excedente (10 ³ kcal d ⁻¹)	10.196	1.592	1.187	8.384	1.476	10.096	8.896	631	0	2.818	0

Taschelmayer e Bilotta (2021) avaliaram o potencial de geração de energia elétrica nas ETEs da região metropolitana de Curitiba, a partir do levantamento de produção e aproveitamento de biogás e lodo como combustível. Segundo os autores, pode-se evitar o consumo de até 840 MWh mês⁻¹ no ano base de 2017 e 2.335 MWh mês⁻¹ no cenário de 2043 do plano diretor de esgotamento sanitário da empresa de saneamento do Paraná, e as ETEs de médio e grande porte são as instalações mais indicadas para essa finalidade, pois apresentam maior viabilidade econômica. Carvalho (2016) verificou que a implantação de tecnologias para aproveitamento de biogás (coletores, filtros, queimadores e motogeradores) em 219 ETEs anaeróbias do estado do Paraná pode fornecer anualmente 53,9 GWh. Bilotta e Ross (2016) analisaram o potencial de geração de energia elétrica de uma planta de tratamento de esgoto com capacidade para atender 190 mil habitantes, no município de Curitiba, e estimaram a produção de 65,3 MWh mês⁻¹ (cerca de 59% da demanda da ETE).

A destinação do lodo de ETE é uma questão de saúde pública que requer investimentos para melhoria das instalações das plantas de tratamento. O aproveitamento do biogás e do lodo seco é uma alternativa em expansão no país (Rosa *et al.*, 2018a; Taschelmayer e Bilotta, 2021) e demanda estudos para garantir processos mais eficientes e adequados às exigências ambientais (Batistella, 2015).

Análise econômico-financeira das alternativas

Na análise econômico-financeira foram investigados três cenários: a) manutenção do sistema em operação (estabilização alcalina do lodo); b) uso apenas do biogás (ausência de um queimador de lodo); b) uso combinado do biogás e lodo seco (inclusão de um queimador de lodo) (Quadro 4).

Quadro 4 – Investimentos e custos estimados para as alternativas investigadas.

ALTERNATIVA	ITENS	VALOR
Estabilização alcalina	Cal virgem e caleação	R\$ 138.144,67
	Transporte e disposição do lodo na agricultura (40 a 60% ST)	R\$ 497.299,22
	Total:	R\$ 635.443,89 ano ⁻¹
Uso de biogás	Coleta, armazenamento, purificação do biogás e secador térmico	R\$ 3.510.000,00
	Destinação do lodo seco para a agricultura (85% ST)	R\$ 119.870,88 ano ⁻¹
	Manutenção	R\$ 35.100,00 ano ⁻¹
	Total:	R\$ 3.664.970,88
Uso de biogás e lodo seco	Coleta, armazenamento, purificação do biogás e secador térmico	R\$ 3.510.000,00
	Queimador de lodo seco	R\$ 1.260.000,00
	Manutenção	R\$ 47.700,00 ano ⁻¹
	Total:	R\$ 4.817.700,00

A análise financeira para substituição da estabilização alcalina prolongada pela secagem térmica sem a combustão de lodo resultou em VPL negativo (R\$ 1.132.495,48) para o horizonte de 20 anos, TMA de 12% e TIR 6,49% ao ano,

tornando a alternativa 2 menos atrativa financeiramente. Todavia, a comercialização do lodo seco (cerca de 40,1% ST) como fertilizante agrícola (valor mínimo de venda: R\$ 165,00 ton⁻¹) torna o sistema financeiramente viável, resultando em TIR de 12,13% ao ano, VPL positivo de R\$ 27.126,61 e *payback* de 19 anos e 6 meses, compatível com o horizonte de projetos na área de saneamento.

A análise financeira para substituição da estabilização alcalina prolongada pela secagem térmica com o queimador de lodo resultou em fluxo de caixa positivo, porém, considerando-se a TMA de 12% e a TIR de 10,71% ao ano, o VPL foi negativo (R\$ 379.880,12) e a alternativa 3 se mostrou menos atrativa financeiramente. Por outro lado, o aproveitamento em conjunto do biogás e lodo seco permite a oferta de energia excedente (17,4 MWh ano⁻¹), que pode representar uma receita para a planta de tratamento, reduzindo despesas com o consumo de energia elétrica da rede. Nesse caso, a implantação do secador térmico movido a biogás e lodo seco pode trazer benefícios financeiros e autonomia energética para a planta de tratamento.

Amaral et al. (2020) avaliaram o custo do ciclo de vida da gestão do lodo produzido por uma estação de tratamento de esgoto (vazão média de 365 L.s⁻¹), comparando a substituição da estabilização alcalina prolongada (EAP) do lodo pelo uso de secador rotativo e combustão aliado a três cenários: (1) a queima do biogás gerado em reatores anaeróbios e destinação agrícola do lodo; (2) a queima do lodo seco e destinação agrícola das cinzas; (3) a queima do lodo seco e destinação das cinzas para o aterro sanitário. Os resultados do estudo mostraram que os três cenários apresentaram custo de implantação e operação muito superior ao sistema EAP (aproximadamente 173% no cenário 1, 189% no cenário 2 e 190% no cenário 3), devido, principalmente, ao elevado investimento necessário para a aquisição do secador térmico.

Por essa razão, dependendo do tamanho da população atendida pela estação de tratamento de esgoto, um projeto de aproveitamento energético do lodo utilizando secador térmico pode se tornar inviável, pois quanto menor a população, menor a capacidade de absorver esse custo (SILVA et al, 2023).

Análise operacional

O Quadro 5 resume os resultados da análise comparativa dos indicadores operacionais avaliados na estabilização alcalina prolongada e na secagem térmica.

Quadro 5 – Comparação entre as condições operacionais analisadas.

	LODO PROCESSADO (ton d ⁻¹)	ÁREA NECESSÁRIA (ton m ⁻²)	LODO APÓS TRATAMENTO (*) (ton d ⁻¹)
Estabilização alcalina	10,6	0,75	4,2 (39,6%) a 6,4 (60,4%)
Secagem sem queima de lodo	283,3	1,5	42,5 (15,0%) (**)
Secagem com queima de lodo	283,3	1,5	11,5 (4,1%) (***)

* Higienização e secagem. ** 85% de ST no lodo seco. *** 27.1% de cinzas no lodo anaeróbio (ROSA et al., 2019).

Para os cálculos considerou-se 60 dias de armazenamento do lodo na alternativa de secagem térmica, para as análises de conformidade do lodo, 120 dias para a estabilização alcalina (caleação, caracterização do lodo), área do pátio

para estocagem do lodo de 630 m² (medida levantada na ETE estudada) e densidade do lodo seco de 1,5 ton m⁻³ (Rosa *et al.*, 2018b). Portanto, os resultados mostram que a secagem térmica é vantajosa para os 3 indicadores, em comparação ao sistema de higienização em operação. Houve incremento médio de 2.672,6% na capacidade de processamento do lodo, 200% na capacidade de armazenagem do lodo e redução de 85% (secagem térmica sem queimador de lodo) e 96% (com queimador de lodo) na quantidade de lodo após o tratamento, contra 39,6 a 60,4% na massa de lodo resultante da estabilização alcalina.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biogás, no cenário conservador, não foi suficiente para suprir à demanda do secador térmico em todos os 11 meses da pesquisa. Por isso, as alternativas investigadas foram: 1) reduzir o teor de sólidos totais (ST) no lodo na saída do secador; 2) complementar o biogás com a energia do lodo seco. Para a alternativa 1 obteve-se teor médio de sólidos totais (ST) de 40,1 (± 4,5%) no lodo seco, enquanto o lodo úmido apresentou cerca de 20% de ST. Na alternativa 2, a combustão do lodo seco teve potencial para atender a demanda do secador térmico (36,1 MWh), no período analisado, e fornecer energia excedente (14,2 MWh) para suprir parte do consumo de energia elétrica da própria ETE. Assim, as duas alternativas são sustentáveis do ponto de vista energético.

A comercialização do lodo seco (85% de ST) como fertilizante agrícola (R\$ 165,00 ton⁻¹) garante viabilidade financeira para a secagem térmica sem o queimador de lodo, resultando VPL positivo (R\$ 27.126,61) e *payback* de 19 anos e 6 meses, compatível com o horizonte de projetos na área de saneamento. A inclusão do queimador de lodo resultou em VPL negativo (R\$ 379.880,12) no horizonte de 20 anos, porém o aproveitamento combinado do biogás e lodo seco permite a oferta de energia excedente, que pode representar uma receita para a ETE, reduzindo o consumo de energia elétrica da rede. Nesse caso, a implantação do secador térmico movido a biogás e lodo seco pode trazer benefícios financeiros, além de autonomia energética para a planta de tratamento.

Concluiu-se ainda que há um incremento médio de 2.672,6% na capacidade de processamento do lodo e 200% na capacidade de armazenagem do lodo. Além disso, houve redução de 85% (secagem térmica sem queimador de lodo) e 96% (com queimador de lodo) na quantidade de lodo após o tratamento, em comparação aos 39,6 a 60,4% na estabilização alcalina. Portanto, o secador térmico também apresenta benefícios operacionais.

Como limitação da pesquisa, destaca-se a necessidade de implantação de um medidor de produção de biogás nos reatores UASB, para minimizar o erro na estimativa da geração de energia com a queima do biogás, e o levantamento de novos modelos de secador térmico, adaptados para a realidade econômica brasileira. Como recomendação de trabalhos futuros, sugere-se a análise da sustentabilidade energética e econômica do sistema considerando-se a centralização de lodo do município em uma única estação de tratamento de esgoto.

Analysis of energy sustainability of by-products from thermal drying in wastewater treatment

ABSTRACT

The objective of this article is to analyze the energy, economic-financial and operational sustainability of the installation of a thermal dryer in a sewage treatment plant in Curitiba. The methodology was based on the estimation of biogas generation, sludge production and available energy, considering 2 evaluation scenarios: 1) reducing the total solids (TS) content in the sludge; 2) supplement biogas with energy from dry sludge. In alternative 1, 40.1% of ST was obtained. Alternative 2 meets the equipment demand (36.1 MWh) and supplies surplus (14.2 MWh). Both alternatives guarantee energy sustainability. The dry sludge can be sold (R\$ 165.00 ton⁻¹). As a conclusion: the recovery of biogas and sludge generates surplus energy (2,672.6% in processing and 200% in storage), reduces 85% of the amount of sludge without burner and 96% with burner.

KEYWORDS: Waste-to-energy. Energy. Sludge. Biogas. Circular economy.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, Equipamentos Industriais Ltda. **Características do secador térmico modelo BRUTUS**. Disponível em: www.albrecht.com.br/site/wp-content/uploads/2015/10/Bruthus2013curvas.pdf Acesso em: 21/05/2021.

AMARAL, K. G. C.; AISSE, M. M.; POSSETTI, G. R. C. 2020. Análise do custo de ciclo de vida do tratamento e destinação final do lodo e biogás, provenientes de ETE que emprega reatores do tipo UASB. **Revista DAE**, **68**(226): 06-17.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. 2007. **Sludge treatment and disposal: Biological wastewater treatment series**. Ed. IWA Publishing, London, 244 pp.

ARJHARN, W.; HINSUI, T.; LIPLAP, P.; RAGHAVAN, G.S.V. 2013. Evaluation of an Energy Production System from Sewage Sludge Using a Pilot-Scale Downdraft Gasifier, **Energy e Fuels**, **27**: 229–236.

ATIENZA-MARTÍNEZ, M.; FONTS, I.; ÁBREGO, J.; CEAMANOS, J.; GEA, G. 2013. Sewage sludge torrefaction in a fluidized bed reactor. **Chemical Engineering Journal**, **222**: 534-545.

BATISTELLA, L. 2015. **Avaliação das emissões gasosas geradas na combustão de lodo de esgoto sanitário em combustor de leito móvel**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, 168 pp.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. 2016. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, **21**:275-282.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; MARIN, L. M. K. S.; SIMÃO, C. C. 2012. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, **17**(3):315-324.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2005. **Resolução n.º 357 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf Acesso em: 04/05/2021.

CARNEIRO, M.; BILOTTA, P.; MALUCELLI, L. C.; OCH, S. H.; CARVALHO FILHO, M. A. S. 2020. Sludge and scum blends from water and wastewater plants for energy recovering toward a circular economy perspective. **International Journal of Environmental Science and Technology**, **17**:3847-3856. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02727-8>

CARVALHO, M. E. 2016. **Diretrizes para promoção de uma economia de baixo carbono no setor de esgotamento sanitário paranaense a partir da recuperação do biogás gerado em reatores anaeróbios**. Dissertação (Mestrado em Governança

e Sustentabilidade) - Instituto Superior de Administração e Economia, ISAE-FGV, 118 pp.

CHERNICHARO, C. A. L. 2007. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2. Ed., 380 p.

DAVID, A. C. 2002. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Universidade de São Paulo, 163 pp.

EPA, Environmental Protection Agency. 2003. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR, part 503**. Office of water/office science and technology sludge/risk assessment branch. Washington: USEPA.

GITMAN, L. J. 2002. **Princípios de administração financeira**. São Paulo: Ed. Harbra, 610 pp.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. **Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf> Acesso em: 10/06/2021.

INCT, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia. 2021. **ETEs Sustentáveis: softwares e programas**. Disponível em: <https://etes-sustentaveis.org/where-we-work/> Acesso em 06/06/2021.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. 2017. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, 127:221-232.

MARIN, L. M. K. S.; BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C. V.; CARAFINI, C.; LIMA, M. R.; SERRAT, B. M.; MOCHIDA, G. A. 2010. Determinação da taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado por processo alcalino em solos da região metropolitana de Curitiba. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, 15(2):113-118.

METCALF, L.; EDDY, H. P. 2016. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. Ed. McGraw-Hill, 4. ed., 1824 p.

MICHALOVICZ, D.T.; BILOTTA, P. (2022) Impact of a methane emission tax on circular economy scenarios in small wastewater treatment plants. **Environ Dev Sustain**. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02317-3>

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. 2006. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, 5(1):93-114.

PAREDES, M. G.; GÜERCA, L. P.; MOLINA, L. T.; NOYOLA, A. 2019. Methane emissions from anaerobic sludge digesters in Mexico: On-site determination vs. IPCC Tier 1 method. **Science of Total Environment**, **656**:468-474.

POSSETTI, G. R. C.; GERVASONI, R.; RIETOW, J. C.; ALTHOFF, C. A.; CARNEIRO, C. 2015. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás, XXVIII **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, Brasil.

RODRÍGUEZ, N. H.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; BLANCO-VARELA, M. T.; DONATELLO, S.; GUILLEM, M.; PUIG, J.; FOS, C.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. 2013. The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. **Journal of Cleaner Production**, **52**:94-102.

ROSA, A.P.; LOBATO, L.C.S.; CHERNICHARO, C.A.L. 2020. Mathematical model to predict the energy potential of UASB-based sewage treatment plants. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, **37**:73-87.

ROSA, A. P.; NEVEZ, R. C.; CHERNICHARO, C. A. L. 2018a. Aproveitamento energético dos subprodutos, lodo e biogás, a partir do tratamento anaeróbico de efluentes pelo uso de processos termoquímicos. **Revista Engenharia na Agricultura**, **26**:26-34.

ROSA, L. G.; CANOVA, A. D.; SOUZA, G. C. B.; BILOTTA, P.; CARNEIRO, M.; POSSETTI, G. R. C.; CARVALHO FILHO, M. A. S. 2019. Energia liberada na combustão de lodo anaeróbico, aeróbico e mistura provenientes de estação de tratamento de esgoto. In: Marielle Feilstrecker, Mônica Beatriz Kolicheski (Org.). **Meio Ambiente Urbano e Rural: Tecnologias Ambientais**. Curitiba: Ed. UFPR, 119-129.

ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; LOBATO, L. C. S.; SILVA, R. V.; PADILHA, R. F.; BORGES, J. M. 2018b. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. **Renewable Energy**, **124**:21-26.

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. 2018. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. **Journal of Industrial Ecology**, **23**(1):77-95.

SILVA, C. R. L.; CHINELATTO, A. L.; CHINELATTO, A. S. A. 2015. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. **Cerâmica**, **61**(357):31-40.

SILVA, A. P. M.; BARROS, R. M.; LORA, E. E. S.; SANTOS, I. F. S.; RIBEIRO, E. M.; FREITAS, J. V. R.; CRISPIM, A. M. C. 2023. Study on preliminary economic availability of electric energy use from drying bed sludge by biogas from anaerobic digestion and incineration in Brazil. **Cleaner Waste Systems**, **6**: 100117.

TAO, J.; WU, S.; SUN, L.; TAN, X.; YU, S.; ZHANG, Z. 2012. Composition of Waste Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant. **Procedia Environmental Sciences**, **12**(part B):964-971.

TASCHELMAYER, C.; BILOTTA, P. (2021) Análise espacial e temporal de estratégias de recuperação energética de subprodutos do tratamento de esgoto na região metropolitana de Curitiba. **Revista Geosul**, **36**(79):495-517. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e67732>

VALENTE, V. B. 2015. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 198 pp.

ZHANG, Q.; HU, J.; LEE, D-J; CHANG, Y.; LEE, Y-J. 2017. Sludge treatment: current research trends. **Bioresource Technology**, **243**:1159–1172.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. 2013. **The biogas handbook: science, production, and applications**. IEA Bioenergy. Cambridge: Woodhead Publishing, 512 p.

WERTHER, J.; OGADA, T. 1999. Sewage sludge combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, **25**:55–116.

Recebido: 02/01/2023

Aprovado: 09/02/2024

DOI: 10.3895/rts.v20n59.16281

Como citar:

MULINARI, Renata; BILOTTA, Patricia. Análise de sustentabilidade energética na secagem térmica de resíduos do tratamento de esgoto. *Tecnol. Soc.*, Curitiba, v. 20, n. 59, p. 291-308, jan./abr., 2024. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/16281>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

