

# Custos de processamento de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto com reatores anaeróbios de manto de lodo e pós-tratamento aeróbio: subsídios para Estudos de Concepção

*Costs of sludge processing in Waste Water Treatment Plants with Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors and aerobic post-treatment: resources for Conception Studies*

Pedro Lindstron Wittica Cerqueira<sup>1\*</sup> , Miguel Mansur Aisse<sup>1</sup> 

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi a avaliação dos custos de implantação (CAPEX) e de operação (OPEX) de diferentes alternativas de desaguamento e higienização de lodo, em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) com reatores anaeróbios de manto de lodo (UASB) e pós-tratamento aeróbio, visando fornecer subsídios para Estudos de Concepção. As tecnologias consideradas foram: leitos de secagem, centrífugas, *wetlands* construídos para lodo (WCL), estabilização alcalina prolongada (EAP) e secagem térmica. Curvas de custo para vazões de esgoto entre 5 e 750 L.s<sup>-1</sup> foram elaboradas, desconsiderando-se os custos de aquisição de área e destinação final do lodo. Verificou-se que o CAPEX das centrífugas pode ser inferior ao dos leitos de secagem para ETEs com vazões acima de 80 L.s<sup>-1</sup>. Porém, ao considerar-se o OPEX, os leitos se mantêm mais econômicos. Também foi avaliada uma alternativa mista, de leitos de secagem e centrífugas em paralelo, mas seus custos mostraram-se mais elevados que cada opção isoladamente. Os WCL apresentaram CAPEX superior ao das centrífugas para ETEs acima de 120 L.s<sup>-1</sup>, mas foi mantida a alternativa mais econômica de desaguamento quando considerado CAPEX + OPEX. Quanto à higienização, a secagem térmica apresentou CAPEX inferior ao da EAP para ETEs acima de 500 L.s<sup>-1</sup>. Porém, ao se considerar o OPEX, essa se manteve mais onerosa até 750 L.s<sup>-1</sup>, mesmo considerando-se o aproveitamento do biogás gerado nos reatores UASB.

**Palavras-chave:** custos de implantação; centrífugas; estabilização alcalina prolongada; leitos de secagem; custos de operação; secagem térmica; *wetlands* construídos para lodo.

## ABSTRACT

This research assessed the implementation costs (CAPEX) and the operational costs (OPEX) of different sludge dewatering and disinfection alternatives, considering WWTP with UASB reactors and aerobic post-treatment, aiming to provide resources for Conception Studies. The following technologies were considered: Drying Beds, Centrifuges, Sludge Drying Reed Beds (SDRB), Alkaline Stabilization Process (ASP), and Heat Drying. Cost functions for wastewater flows ranging from 5 to 750 L.s<sup>-1</sup> were elaborated, while disregarding area acquisition and sludge final disposal costs. It was determined that the Centrifuge's CAPEX could be lower than the Drying Bed's for WWTPs inflows above 80 L.s<sup>-1</sup>. Nonetheless, Drying Beds remained cheaper when OPEX was considered. A hybrid alternative with Drying Beds and Centrifuges in parallel was evaluated, but their combined costs remained higher than each option considered individually. Moreover, SDRB's CAPEX was higher than the Centrifuge's for WWTPs above 120 L.s<sup>-1</sup>, but the former remained the cheapest dewatering alternative when considered CAPEX + OPEX. Finally, Heat Drying had lower CAPEX than ASP for WWTPs above 500 L.s<sup>-1</sup>. Nonetheless, considering OPEX, the former remained more expensive up to 750 L.s<sup>-1</sup>, even when considering fully UASB biogas reclamation.

**Keywords:** implementation costs; centrifuges; prolonged alkaline stabilization; drying beds; operational costs; heat drying; sludge drying reed beds.

## INTRODUÇÃO

O processamento do lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) pode representar mais de 50% de seus custos operacionais, realidade que deverá ser agravada conforme se ampliam os índices de atendimento de esgoto sanitário

e, principalmente, a eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto. Os reatores anaeróbios de manto de lodo (UASB) possuem a vantagem de gerar quantidades de lodo relativamente baixas, se comparados aos sistemas aeróbios. Entretanto, por possuírem limitada capacidade de remoção de poluentes, tem

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

\*Autor correspondente: pedrolwcerqueira@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses. Financiamento: nenhum.

Recebido: 12/08/2019 - Aceito: 14/01/2020 - Reg. ABES: 20190244

sido necessária a implementação de sistemas de pós-tratamento aeróbio nas ETEs que os possuem.

No Brasil, os reatores UASB representam a segunda tecnologia mais utilizada, logo após lagoas anaeróbias seguidas de facultativa (ANA, 2017). Além da reduzida produção de lodo, os reatores UASB podem ser utilizados para o adensamento e a digestão do lodo aeróbio excedente da etapa de pós-tratamento, ainda que com algumas ressalvas operacionais (FLORIPES; CHERNICHARO; MOTA FILHO, 2018). Com isso, o lodo de excesso produzido em ETEs com os sistemas mencionados pode ser destinado diretamente às etapas de desaguamento e, quando necessário, higienização.

Entre as tecnologias mais utilizadas para o desaguamento de lodo, os leitos de secagem destacam-se por sua simplicidade construtiva e operacional. No entanto, em razão dos requisitos de área, tendem a ser inviáveis para ETEs de grande porte, sendo importante considerar as condições climáticas de cada região e a destinação final do lodo, visando otimizações de projeto (CERQUEIRA; AISSÉ, 2017). Além de promoverem o desaguamento, os leitos de secagem proporcionam reduções significativas de organismos patogênicos no lodo, porém não o suficiente para o uso irrestrito desse na agricultura (POMPEO, 2015; SANTOS *et al.*, 2017).

Na indisponibilidade de área para a implantação dos leitos de secagem, buscam-se alternativas de desaguamento de lodo compactas e mecanizadas, podendo-se destacar as centrífugas *decanter*, que vêm sendo largamente empregadas no Brasil, nos Estados Unidos e na Europa (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2014; JORDÃO; PESSÔA, 2017). Para ETEs com apenas reatores UASB, segundo Baré (2013), a vazão de 100 L.s<sup>-1</sup> pode ser uma referência a partir da qual as centrífugas se tornam mais econômicas que os leitos de secagem, quanto aos custos de implantação (CAPEX). Porém, para a definição da alternativa ótima, devem ser considerados também os custos operacionais (OPEX) (SANEPAR, 2018b; CERQUEIRA, 2019).

Mais recentemente, no Brasil, os *wetlands* construídos para lodo (WCL) também têm se mostrado atrativos, em razão da simplicidade construtiva e operacional, principalmente para sistemas de pequeno porte e para o desaguamento de lodo de fossas sépticas (SUNTTI; MAGRI; PHILIPPI, 2011). Também conhecidos como *Sludge Drying Reed Beds* (SDRB), os WCL são utilizados desde a década de 1980 para o desaguamento e a estabilização de lodo de esgoto em alguns países da Europa. Na Dinamarca, por exemplo, existem mais de 140 unidades em operação, atendendo populações de até 125 mil habitantes (UGGETTI *et al.*, 2010). Os *wetlands* para lodo são estruturas semelhantes aos *wetlands* para esgoto, porém projetados para o acúmulo de lodo por longos períodos de tempo (da ordem de 10 a 15 anos) (SUNTTI; MAGRI; PHILIPPI, 2011).

Quanto à higienização, a estabilização alcalina prolongada (EAP) é uma tecnologia consolidada, tendo sido utilizada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) para aplicação agrícola de lodo, desde o início dos anos 2000 (BITTENCOURT, 2014). Constante na Resolução SEMA 21, trata-se de um processo em que o lodo é mantido com pH igual ou superior a 12, durante um período mínimo de 30 dias (PARANÁ, 2009). A experiência da SANEPAR tem mostrado que a adição de cal ao lodo, em quantidades de 30 a 50% dos sólidos totais desse, permite atingir essas condições (BITTENCOURT; AISSÉ; SERRAT, 2017). Para tanto, equipamentos como silos de cal, misturador mecânico e roscas transportadoras são utilizados, em geral, quando o desaguamento é feito em centrífugas. O lodo caleado é levado a pátios, cobertos

e impermeabilizados, para o período de cura e formação de lotes. Já quando o lodo é desaguado em leitos de secagem, a mistura da cal ao lodo pode ser feita com o auxílio de betoneiras adaptadas ou maquinário, como retroescavadeiras hidráulicas. Em ambos os casos, os pátios de cura devem possuir área suficiente para o armazenamento, até que os lotes sejam liberados para a disposição agrícola (BITTENCOURT; AISSÉ; SERRAT, 2017; CERQUEIRA; BITTENCOURT; AISSÉ, 2019).

A secagem térmica também promove a higienização do lodo, com a vantagem da redução significativa do volume a ser transportado em razão da evaporação de boa parte de sua água. Entre algumas modalidades, no Brasil, tem sido comum a utilização dos tambores rotativos (BIELSCHOWSKY, 2014; JORDÃO; PESSÔA, 2017), em que o lodo é inserido no secador com teores de sólidos totais de 20 a 30% e removido com cerca de 80% (POSSETTI *et al.*, 2015). Algumas etapas complementares são necessárias, como a lavagem dos gases de exaustão do secador, e no caso de secadores diretos (quando o ar quente entra em contato com o lodo), uma unidade de separação dos gases e sólidos. Outra vantagem da secagem térmica é a possibilidade de aproveitamento do biogás gerado nos reatores UASB como fonte de energia térmica (POSSETTI *et al.*, 2015; ROSA *et al.*, 2016). Entretanto, toda uma estrutura de aproveitamento do biogás deve ser implantada, como o gasômetro, tubulações e filtros de biogás, além das obras civis, que devem ser consideradas na comparação de alternativas (VALENTE, 2015).

Para a definição da melhor alternativa de tratamento de lodo, deve-se levar em conta os aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais. Entretanto, pouco se encontra na literatura sobre os aspectos econômicos referentes ao processamento de lodo, principalmente no que se refere aos custos operacionais. Além disso, segundo Jordão e Pessoa (2017, p. 799), “nem sempre as empresas de saneamento ou as empresas de consultoria dispõem de indicadores confiáveis para a estimativa e projeção de custos”, o que enfatiza a necessidade de mais estudos nesse sentido, visando subsidiar Estudos de Concepção.

Dado esse cenário, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação econômica das alternativas mencionadas de desaguamento e higienização de lodo, considerando-se ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio, visando fornecer subsídios para Estudos de Concepção.

## METODOLOGIA

O presente estudo foi dividido em três etapas. A primeira consistiu em pesquisa bibliográfica e, complementarmente, entrevistas com profissionais da área de saneamento, sobre questões não consolidadas, pouco abordadas ou variáveis na literatura, que interferem nos dimensionamentos das estruturas de tratamento de lodo, segundo Cerqueira *et al.* (2019):

- Descarte de lodo aeróbio de excesso aos reatores UASB, para adensamento e digestão;
- Faixas de vazão que viabilizam a implantação de sistemas de tratamento de lodo;
- Regime de operação de equipamentos de tratamento de lodo;
- Dimensionamento de tanques de equalização de lodo para o desaguamento mecânico;
- Dimensionamento de leitos de secagem;
- Dimensionamento de pátios de cura para higienização por EAP.

Os resultados da primeira etapa foram utilizados, também, como parte da metodologia do trabalho, pois permitiram um refinamento das etapas subseqüentes, que serão explanadas a seguir. Com os resultados referentes ao segundo item, por exemplo, definiram-se as faixas de vazões para cada tecnologia de tratamento de lodo considerada, da seguinte maneira:

- Leitões de secagem: 5 a 160 L.s<sup>-1</sup>;
- Centrífugas: 80 a 750 L.s<sup>-1</sup>;
- Leitões de secagem + centrífugas: 80 a 320 L.s<sup>-1</sup>;
- WCL: 5 a 320 L.s<sup>-1</sup>;
- EAP: 20 a 750 L.s<sup>-1</sup>;
- Secagem térmica: 80 a 750 L.s<sup>-1</sup>.

Como citado, considerou-se uma alternativa de leitões de secagem e centrífugas em paralelo, tendo-se adotado o desaguamento de 1/3 do lodo produzido nos leitões e 2/3 nas centrífugas, visando verificar possíveis economias de CAPEX e/ou OPEX.

Além disso, ainda com base nos resultados da primeira etapa, foram definidos: o regime de operação para as centrífugas e os secadores térmicos; o tempo de detenção para o dimensionamento de tanques de equalização; a taxa de aplicação de sólidos e o tempo de ciclo para dimensionamento dos leitões de secagem; e parâmetros de dimensionamento dos pátios de EAP.

A segunda etapa consistiu no dimensionamento das estruturas de tratamento de lodo, considerando-se parâmetros clássicos da literatura, mas também aqueles definidos na primeira etapa deste estudo. Os parâmetros de dimensionamento considerados são apresentados na Tabela 1.

Por fim, a terceira etapa consistiu no levantamento dos custos de implantação e operação das diversas tecnologias mencionadas. Para tanto, utilizaram-se orçamentos referenciais, projetos de concessionárias de saneamento, cotações de empresas fornecedoras de equipamentos e dados da literatura. Cada tecnologia teve seu custo estimado de maneira diferente, a depender das informações disponíveis. Não foram considerados os custos de transporte e disposição final do lodo, assim como de aquisição de áreas, em razão da grande variabilidade desses no território nacional, buscando-se, assim, avaliações mais precisas, porém restritas às intermediações da ETE. Dessa forma, reforça-se que o intuito do presente trabalho não foi definir a solução mais econômica, mas permitir que, conhecendo-se o custo de transporte e destinação final do lodo, possa ser feita uma análise econômica das alternativas de desaguamento e higienização de lodo.

Na seqüência, estão explanados, resumidamente, os procedimentos realizados para a estimativa do CAPEX e do OPEX de cada tecnologia considerada.

**Tabela 1 - Parâmetros de dimensionamento das estruturas de tratamento de lodo.**

Parâmetro	Valor	Unidade	Referência
<b>Reator UASB</b>			
DQO afluente (esgoto bruto)	600	mg.L <sup>-1</sup>	von Sperling (1996)
Coefficiente de produção de sólidos <sup>a</sup>	0,30	kgST.kgDQO <sup>-1</sup> <sub>aplicada</sub>	von Sperling e Gonçalves (2014)
Coefficiente de produção de biogás	85	NL.m <sup>3</sup> <sub>esgoto</sub>	Lobato (2011)
Teor de metano no biogás	75	%	Lobato (2011) e Rosa <i>et al.</i> (2016)
Poder calorífico do biogás	6.300	Kcal.m <sup>3</sup>	
<b>Leitões de secagem</b>			
Carga de aplicação de sólidos	15	kgST.m <sup>2</sup>	ABNT (2011)
Tempo de ciclo	18	dias	Cerqueira e Aisse (2017)
<b>Centrífugas<sup>b</sup></b>			
Regime de operação	4 a 13	h.d <sup>-1</sup>	(c)
Tempo de detenção hidráulica no tanque de equalização	14 a 20	horas	(c)
<b>Wetlands construídos para lodo</b>			
Taxa de aplicação de sólidos	120	kgST.m <sup>2</sup> .ano <sup>-1</sup>	Suntti, Magri e Philippi (2011)
<b>Estabilização alcalina prolongada</b>			
Aplicação de cal	40	% da massa de cal em relação à massa seca de lodo	Bittencourt (2014)
Taxa de aplicação de sólidos (pátios)	350	kgST.m <sup>2</sup> .ano <sup>-1</sup>	Cerqueira, Bittencourt e Aisse (2019)
Tempo de reposição da cal	15 a 60	Dias	(d)
<b>Secagem térmica</b>			
Regime de operação	4 a 13	h.d <sup>-1</sup>	(c)
Concentração inicial do lodo	20	% ST	(c)
Concentração final do lodo	80	% ST	(c)
Capacidade do gasômetro (estocagem complementar de biogás)	35	% do volume diário de biogás produzido	Valente (2015)

UASB: reatores anaeróbios de manto de lodo; DQO: demanda química de oxigênio; <sup>a</sup>considerado o descarte do lodo aeróbio de excesso ao reator UASB; <sup>b</sup>adotaram-se centrífugas com capacidades que permitissem manter o regime de operação inferior a 13 horas por dia, visando à redução do OPEX; (c) valores adotados a partir dos resultados da primeira etapa do trabalho; (d) adotados para o dimensionamento de silos de armazenamento.

## Leitos de secagem

Para a estimativa do CAPEX dos leitos de secagem, foi utilizado um projeto fornecido pela Companhia de Saneamento de Goiás (SANEAGO), contemplando 20 unidades de leitos com dimensões de 10×10 m. Dividindo-se o custo total da obra pela área de leitos de secagem, obteve-se um custo unitário, em R\$.m<sup>2</sup>. Paralelamente, para fins de análise de sensibilidade, foram verificados os custos unitários provenientes dos trabalhos de Pacheco (2011) e Baréa (2013), dividindo-se os valores informados pelos autores pelas respectivas áreas de leitos de secagem. Os valores foram atualizados para janeiro de 2019 utilizando-se o Índice Nacional de Custos da Construção (INCC).

Quanto ao OPEX, foram utilizados valores informados pela SANEPAR, que terceiriza, em algumas ETEs, os serviços de limpeza e manutenção dos leitos de secagem. No caso, obtiveram-se dois custos de referência, conforme apresentado na Tabela 2.

## Centrífugas

O CAPEX das centrífugas também foi calculado a partir de projetos fornecidos pela SANEAGO. Nesse caso, foram consultados dois projetos de edifícios de desidratação de lodo (EDL), os quais abrigavam o sistema de condicionamento, o tanque de equalização de lodo, as bombas de alimentação das centrífugas, um sistema de caleação composto de silo, dosador, roscas transportadores e misturador, além das próprias centrífugas (dois equipamentos com capacidade para toda a produção de lodo, sendo um de reserva).

Os projetos fornecidos foram dimensionados para vazões de lodo de 10 e 30 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> (lodo a 3% de sólidos totais — ST). Utilizaram-se os itens dos orçamentos originais desses projetos (construção civil, equipamentos, materiais hidráulicos e materiais elétricos), com exceção das centrífugas em si, para as quais foram realizadas novas cotações. Com isso, montaram-se composições, a depender de cada situação. Os itens referentes à caleação, por exemplo, só foram considerados quando da estimativa do custo da EAP, como será descrito mais adiante. Os custos foram atualizados para janeiro de 2019, com base no INCC.

Quanto à composição do OPEX das centrífugas, foram considerados: pessoal, manutenção, energia elétrica e produtos químicos. Os custos de pessoal foram estimados a partir dos valores pagos pela SANEAGO para os cargos de Agente de Operações e Técnico Industrial, incluindo-se os impostos, que totalizam cerca de 113% do salário base. Assim, os custos horários desses profissionais foram multiplicados pelo regime de operação das centrífugas, acrescido de uma hora (para limpeza dos equipamentos), obtendo-se os valores totais. Para o Técnico Industrial, entretanto, considerou-se 1/5 do tempo dedicado pelo Agente de Operações, já que esse ocuparia uma posição de supervisão. Os custos horários considerados foram R\$ 51,80 e R\$ 69,44 para Agente de Operações e Técnico Industrial, respectivamente.

**Tabela 2** – Serviços considerados no custo de operação dos leitos de secagem.

Item	Serviços	Unidade	Custo unitário (R\$)
1 (Pessoal)	Retirada manual de lodo do leito de secagem	t	20
2 (Manutenção)	Retirada e recolocação de areia	m <sup>2</sup>	2

Fonte: Sanepar (2018a).

Quanto aos custos de manutenção, em entrevistas com profissionais da SANEAGO, verificou-se que a empresa possui contratos anuais de manutenção preventiva e corretiva com os próprios fornecedores. Foi informado o valor médio dos contratos de manutenção das centrífugas com capacidade de 30 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, o qual foi adaptado às condições deste estudo. Para tanto, calculou-se o valor unitário, em R\$.m<sup>-3</sup>.d.ano<sup>-1</sup>, que, multiplicado às vazões diárias de lodo de cada cenário, resultou em custos proporcionais de manutenção. Conforme explicado pelos profissionais entrevistados, a frequência de manutenção depende, entre outros fatores, da qualidade do lodo. Como na ETE consultada, o lodo destinado às centrífugas era de baixa qualidade (lodo primário, com excesso de areia e materiais fibrosos) — adotou-se 80% do valor médio contratado pela SANEAGO. Como isso, obteve-se R\$ 220 m<sup>-3</sup>.d.ano<sup>-1</sup>.

O custo de energia elétrica foi composto de duas parcelas: parcela de consumo e parcela de demanda. A primeira foi calculada multiplicando-se a potência consumida dos equipamentos pelo tempo de funcionamento e pela tarifa de consumo de energia elétrica. Já a segunda foi calculada multiplicando-se a demanda medida pela tarifa da demanda de energia elétrica. A demanda medida foi adotada como sendo a própria potência consumida pelas centrífugas. Essa, por sua vez, foi estimada a partir de informações obtidas junto aos fornecedores (em que a potência efetivamente consumida representa 70% da instalada), e, para fins de comparação, solicitou-se à SANEAGO a medição da potência consumida em uma centrífuga em operação. À potência consumida da centrífuga foi acrescida uma potência de 20%, representando os equipamentos periféricos necessários ao processo, tais como: bombas de alimentação de lodo, misturador e bombas dosadoras de polímero, roscas transportadoras, entre outros.

A tarifa de consumo de energia elétrica foi adotada a partir da tarifa média nacional para o setor de saneamento, considerando-se a modalidade tarifária Horó-sazonal Verde, Subgrupo A4 (2,3 a 25 kV). Em relação à modalidade Horó-sazonal Azul, a Verde é, geralmente, mais vantajosa quando não se utilizam grandes equipamentos em horários de ponta, pois a tarifa em horas normais é relativamente baixa, compensando o alto custo nos horários de ponta. Considerou-se, também, o desconto de 15% aplicado às tarifas de energia, conforme previsto em legislação para o setor de Serviços Públicos (ANEEL, 2010). No ano de 2018, a tarifa média foi de 497,63 R\$.MWh<sup>-1</sup>. Adotou-se, neste estudo, 0,50 R\$.kWh<sup>-1</sup>, ao qual foi aplicado o desconto de 15%. A tarifa de demanda, por sua vez, foi adotada a partir de dados médios da SANEAGO (25 R\$.kW<sup>-1</sup>).

Por fim, os custos com produtos químicos foram levantados considerando-se a aplicação de 5 kg de polímero por tonelada de lodo em massa seca, valor médio da faixa apresentada por Gonçalves, Luduvic e Von Sperling (2014), para lodo misto. O custo do polímero foi obtido junto à SANEAGO, observando-se também o valor apresentado por Amaral (2018), como balizador. O valor adotado foi de R\$ 13 por quilograma de polímero (polímero catiônico em pó).

## Wetlands construídos para lodo

Neste estudo, foram realizados dois procedimentos para a estimativa do custo de implantação dos WCL. O primeiro foi a consulta a uma empresa especializada nessa tecnologia, a qual foi solicitado o custo unitário de implantação de WCL, em R\$.m<sup>-2</sup>. O segundo foi, a partir de contato com

engenheiros da referida empresa e de informações constantes na literatura, a orçamentação de um WCL de  $22 \times 44 \times 2$  m (largura  $\times$  comprimento  $\times$  profundidade), afim de se estimar o custo, em R\$.m<sup>2</sup>, para essa dimensão de *wetland*. Para tanto, foram elaborados croquis auxiliares e levantados os quantitativos principais, como movimentação de terra, impermeabilização e materiais do leito filtrante. O custo total foi calculado utilizando-se os preços e as composições unitárias constantes nas tabelas de preços da SANEPAR e da SANEAGO, disponíveis nos respectivos sítios eletrônicos (SANEPAR, 2018c; SANEAGO, 2017).

O OPEX foi calculado para pessoal e manutenção, não havendo produtos químicos e desprezando-se o consumo energético associado ao processo. Para pessoal, considerou-se o tempo de 6 a 15 horas por mês (aumentando conforme o tamanho da ETE) de um Agente de Operações, referente ao tempo gasto exclusivamente para as atividades operacionais decorrentes da implantação dos WCLs, tais como a abertura e o fechamento de válvulas, a realização de análises laboratoriais e o corte de grama no entorno dos *wetlands* — essas atividades podem ser rotineiras em uma ETE, mas considerou-se o aumento do tempo dispendido à essas ações, em razão da implantação do WCL. Quanto à manutenção, considerou-se o corte das plantas dos WCL, que, segundo a empresa especializada consultada, geralmente pode ser feito semestralmente. Esse custo foi estimado considerando-se a composição de custo de “roçada densa”, de R\$ 2,16 por m<sup>2</sup>, constante na tabela de preços da SANEPAR (2018c).

Por fim, considerou-se também a remoção, após 10 anos de utilização, do lodo seco acumulado nos WCLs. Adotou-se uma altura útil de 1,10 m de lodo, que foi multiplicada à área do WCL dimensionado para cada vazão de ETE, obtendo-se, assim, o volume de escavação. Feito isso, considerou-se 90% escavado mecanicamente e 10% escavado manualmente, com preços de escavação também da tabela da SANEPAR, respectivamente, de R\$ 7,07 m<sup>-3</sup> e R\$ 34,12 m<sup>-3</sup>. Destaca-se que esse custo foi considerado para após 10 anos de operação (acúmulo do lodo) — portanto, foi convertido em valor presente líquido (VPL) para ser somado aos demais.

## Estabilização alcalina prolongada

O CAPEX da EAP foi dividido em duas parcelas:

- aplicação de cal;
- pátio de cura.

A aplicação de cal foi considerada apenas para os casos de desaguamento mecanizado (centrífugas), quando a aplicação também é mecanizada, utilizando-se os silos de armazenamento, as roscas transportadoras e o misturador de cal e lodo. No caso de desaguamento em leitos de secagem, essa estrutura não é comumente utilizada, sendo a aplicação feita manualmente sobre o lodo descarregado em pátio. Os pátios de cura, entretanto, foram considerados para as duas situações de desaguamento.

Os custos de implantação do sistema de aplicação de cal foram levantados a partir dos dois projetos fornecidos pela SANEAGO, conforme mencionado na descrição das centrífugas. Nesses projetos, os silos de cal possuíam volume de 14 e 55 m<sup>3</sup> para as centrífugas de vazão 10 e 30 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, respectivamente. Os custos dos equipamentos foram atualizados pelo INCC e, em alguns casos, adaptados para as vazões de lodo e cal calculadas neste estudo. Para algumas ETEs, por exemplo, adotaram-se dois silos de 55 m<sup>3</sup>,

visando aumentar o tempo de reposição da cal. O CAPEX dos pátios de cura, por outro lado, foi estimado a partir do valor médio do Custo Unitário Básico (CUB) para Galpão Industrial (GI) dos estados do Paraná e de Goiás, publicados em janeiro de 2019 pelos respectivos Sindicato da Indústria da Construção (SINDUSCON).

Os procedimentos operacionais relacionados à EAP são pouco comentados na literatura. Portanto, grande parte das considerações dos custos desses foi feita a partir das informações obtidas nas entrevistas (etapa 1 da metodologia), tais como a forma de mistura da cal ao lodo, a depender do tipo de desaguamento, os equipamentos utilizados e a mão de obra necessária para cada ocasião. A partir das informações obtidas, foi calculado, separadamente, o OPEX da EAP por tipo de desaguamento, conforme explanado a seguir.

## Lodo desaguado em leitos de secagem

O lodo desaguado naturalmente nos leitos é destinado aos pátios de cura, onde se aplica manualmente a cal e utilizam-se equipamentos auxiliares para promover a mistura, como betoneiras adaptadas ou retroescavadeira. Considerou-se o custo de transporte do lodo, dos leitos aos pátios de cura e da movimentação dos sacos de cal (20 kg), a partir de duas composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI):

- Transporte horizontal, massa/granel, em jérica de 90 L, 100 m – R\$ 57,15 m<sup>-3</sup>;
- Transporte horizontal, sacos de 20 kg, manual, 30 m – R\$ 50,72 t<sup>-1</sup>.

Esses custos foram considerados como sendo de pessoal. Além disso, considerou-se o custo de aquisição da cal, cujas quantidades foram calculadas pela relação de 40% de cal em relação à massa seca de lodo. O custo da cal, de R\$ 0,47 kg<sup>-1</sup>, foi obtido junto à SANEAGO.

## Lodo desaguado em centrífugas

Como a aplicação da cal ao lodo centrifugado foi considerada mecânica, para o custo com pessoal adotou-se o percentual de 10% do custo com pessoal da operação das centrífugas. Verificou-se, nas entrevistas realizadas, que o mesmo operador das centrífugas pode monitorar a caleação, por supervisor. Para o custo de manutenção dos equipamentos de aplicação de cal, considerou-se 1,5% do CAPEX desses, por simplificação. Desprezou-se o custo com energia elétrica e, quanto aos produtos químicos (aquisição da cal), adotaram-se os mesmos critérios que os descritos no item anterior.

Para os casos em que se considerou leitos de secagem e centrífugas em paralelo, os procedimentos de cálculo do OPEX foram os mesmos que os descritos para cada situação. Além disso, consideraram-se, também, outros itens associados à EAP:

- Apoio agrônomo: R\$ 5 por tonelada de lodo higienizado — adaptado de Amaral (2018);
- Análises laboratoriais: R\$ 2.917 por lote de lodo — adaptado de Amaral (2018);
- Mistura e empilhamento do lodo em pátios, com retroescavadeira: R\$ 1,44 m<sup>-3</sup>;
- Carga de caminhão basculante, com pá carregadeira: R\$ 1,50 m<sup>-3</sup>.

Os dois últimos itens foram adaptados de composições da tabela de preços da SANEAGO. O último, especialmente, permite considerar que o processo da EAP vai até o carregamento do caminhão para transporte.

## Secagem térmica

O CAPEX da secagem térmica foi composto de duas parcelas: equipamentos (secadores, gasômetro e sistema de filtragem de biogás) e obras civis. Os secadores tiveram seus custos levantados por cotação com duas empresas fornecedoras. Já os equipamentos de aproveitamento energético do biogás foram adotados a partir dos valores apresentados por Valente (2015), atualizados pelo INCC para janeiro de 2019. As obras civis foram estimadas em 3% do custo dos equipamentos, já que se considerou o aproveitamento do EDL, com o secador alocado na área inicialmente projetada para o sistema de caleação. Assim, seriam necessárias apenas algumas adaptações/ampliações no projeto.

Para o OPEX, adotaram-se custos de maneira semelhante ao que foi realizado para as centrífugas: para pessoal, um Agente de Operações e um Técnico Industrial, sendo o segundo dedicado em 1/5 do tempo em relação ao primeiro. Observa-se que o regime de operação dos secadores adotado foi igual ao das centrífugas, pressupondo-se que os equipamentos seriam instalados em série. O custo de manutenção foi calculado pelo índice de 4% do CAPEX dos equipamentos, e a energia elétrica, com as mesmas considerações feitas para as centrífugas. Por fim, considerou-se também o custo de complementação energética, quando não atingida a autonomia do sistema de secagem com o biogás da própria ETE.

A complementação energética adotada foi por gás liquefeito de petróleo (GLP), considerando-se um poder calorífico de 11.100 kcal.kg<sup>-1</sup> e o custo unitário variando de R\$ 4,60 a R\$ 4,10 por quilograma de GLP (a depender do consumo), informado por uma das empresas fornecedoras do gás.

Finalmente, levantado o OPEX anual de cada tecnologia, esse foi projetado para um período de 15 anos de operação e trazido a valor presente líquido (VPL), com taxa de juros de 6,50% ao ano. Essa taxa equivale à taxa de longo período (TLP) adotada pelo Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), para financiamentos de investimentos na área de saneamento ambiental e recursos hídricos. O valor mencionado corresponde à taxa publicada em maio de 2019 (BNDES, 2019). Cabe observar que outras taxas devem ser imputadas quando do financiamento (remuneração do BNDES e taxa de risco de crédito). Porém, por simplificação, adotou-se apenas a parcela da TLP.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, na Tabela 3, os resultados dos dimensionamentos das unidades de desaguamento e higienização de lodo.

Observa-se que as capacidades das centrífugas e dos secadores térmicos não foram dimensionadas linearmente com o aumento das vazões de esgoto. Aproveitando-se os dados disponíveis, optou-se por trabalhar com dois portes de equipamentos — exceto no caso da ETE de 80 L.s<sup>-1</sup>, com desaguamento misto, em que se adotou uma centrífuga de 5 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> —, alterando-se o regime de operação desses. Dessa forma, para o dimensionamento, definiu-se o regime máximo de funcionamento de 13 h.d<sup>-1</sup>, visando à redução do OPEX, pela não operação nos horários de ponta de energia elétrica e no período noturno.

Cabe mencionar que, para a faixa de vazão estudada, não se obteve autonomia no sistema de secagem térmica do lodo com o uso do biogás. Logo, calculou-se o déficit energético e o consumo de GLP estimado para supri-lo.

Apresentam-se, na sequência, as curvas de custo geradas para as tecnologias em estudo. Para verificação do impacto do OPEX sobre a comparação das alternativas, apresentam-se duas situações: CAPEX e CAPEX + OPEX. Nas Figuras 1 e 2, apresentam-se os resultados referentes às tecnologias de desaguamento consideradas: leitos de secagem, centrífugas e WCLs.

Como é possível observar, a consideração dos custos operacionais alterou a ordem de economicidade das alternativas avaliadas. Os leitos de secagem e os WCLs mostraram-se mais onerosos que as centrífugas, quanto à implantação, a partir das vazões de 80 e 110 L.s<sup>-1</sup>, respectivamente. Porém, ao considerar-se o OPEX, ambos se mantiveram mais econômicos que as centrífugas para as faixas de vazão em que foram considerados. A opção mista de desaguamento (leitos + centrífugas), em geral, apresentou-se como a de maior custo entre as alternativas. Por outro lado, os WCLs, quando considerado o OPEX, mostraram-se como a opção mais econômica.

A curva das centrífugas, inicialmente dividida em dois patamares de custo de implantação por conta dos equipamentos adotados, sofreu certa linearização quando considerado o OPEX. Com isso, observou-se que as inclinações dos trechos antes de 240 L/s e depois de 320 L.s<sup>-1</sup> são diferentes, indicando um barateamento do custo operacional quando utilizados equipamentos de maior porte, pela atenuação da inclinação.

Destaca-se, ainda, que na composição do OPEX, o custo com pessoal foi computado de acordo com o regime de operação dos equipamentos, e não pelos salários integrais dos operadores. Essa consideração implica na suposição de que os operadores não ficariam dedicados exclusivamente à operação das centrífugas, mas realizariam outras tarefas decorrentes das ETEs, necessárias mesmo sem a existência das centrífugas. Todavia, a depender de cada situação, novos profissionais poderiam ser contratados por conta da operação das centrífugas, mesmo com regimes de operação inferior a 8 h/d (carga horária normal), de forma que o custo levantado neste trabalho ficasse inferior ao real, ou otimizado. Ademais, também não foram consideradas horas dispendidas de engenheiros e outros profissionais à operação das centrífugas. Essas questões são relativamente complexas e de difícil levantamento, variando conforme a política de trabalho de cada empresa, podendo ser um tema de aprofundamento para trabalhos futuros.

Nas Figuras 3 e 4, apresentam-se os resultados referentes ao desaguamento seguido de higienização por EAP, para as diferentes formas de desaguamento consideradas (exceto WCL).

Como é possível observar, quando considerada a higienização do lodo por EAP, os leitos de secagem permanecem mais viáveis que as centrífugas até a faixa de 130 L.s<sup>-1</sup>, principalmente em razão do custo elevado do sistema de caleação mecanizada, adotado para higienização do lodo centrifugado. A opção mista permaneceu a mais onerosa.

Assim como nos casos anteriores, a consideração dos custos operacionais provocou uma linearização dos custos totais. Notou-se que a consideração da EAP praticamente não alterou a ordem de economicidade das alternativas de desaguamento de lodo, quando considerado CAPEX + OPEX.

Nas Figuras 5 e 6, estão comparadas as alternativas de EAP e secagem térmica — lembrando-se que a secagem só foi considerada para vazões acima de 80 L.s<sup>-1</sup>.

Verificou-se que, quanto ao custo de implantação, a secagem térmica só se tornou mais vantajosa que a EAP a partir de vazões próximas a 500 L.s<sup>-1</sup>.

Porém, quando considerados os custos de operação, a EAP se manteve mais econômica para toda a faixa de vazão considerada. Isso se deve, principalmente, pelo elevado custo da complementação energética (mesmo considerando-se o aproveitamento pleno do biogás) e de pessoal da secagem térmica, comparativamente à EAP que, para essa faixa de vazão, teve seu custo de pessoal bastante reduzido (uma vez que a mistura de cal ao lodo seria mecanizada).

Para a verificação do impacto dos custos de complementação energética no OPEX da secagem térmica, apresentam-se, na Figura 7, as curvas de custo geradas sem a consideração desse item.

Observa-se, com esses resultados, que quando desconsiderado o custo de complementação energética para a secagem térmica, essa passa a ser mais econômica que a EAP para ETEs com vazões acima de 570 L.s<sup>-1</sup>, aproximadamente. No entanto, sem a complementação energética, não seria possível levar a mesma quantidade de lodo ao teor de 80% de ST, premissa adotada neste estudo.

Cabe mencionar também que, apesar de o custo com energia elétrica não ter se destacado no OPEX da secagem térmica, este, isoladamente, foi equivalente a cerca de 45% dos custos operacionais da EAP. A potência dos secadores térmicos foi estimada exclusivamente com base em informações de fabricantes (lembrando que, no caso das centrífugas, foram solicitadas à SANEAGO medições em campo, para fins de verificação e análise de sensibilidade), e pode ser um ponto de aprofundamento para a composição dos custos operacionais dessa tecnologia. A redução do volume do lodo seco, a cerca de 80% de ST, no entanto, torna-se um aspecto importante na decisão da tecnologia a ser escolhida.

## CONCLUSÕES

No presente estudo, foram avaliados os custos de diferentes alternativas de desaguamento e higienização de lodo para ETEs com reatores UASB + pós-tratamento aeróbio. Desconsiderando os custos de aquisição de área e transporte e disposição final do lodo, pôde-se concluir que:

**Tabela 3 - Resultados dos dimensionamentos das estruturas de tratamento de lodo.**

Parâmetro	Vazão de esgoto (L.s <sup>-1</sup> )											
	5	10	20	40	80	160	240	320	400	500	750	
Produção de lodo (kgSST.d <sup>-1</sup> )	156	311	622	1.244	2.488	4.977	7.465	9.953	12.442	15.552	23.328	
Leitos de secagem												
Área total (m <sup>2</sup> )	100	200	480	960	1.680	3.120	-	-	-	-	-	
Leitos de secagem + centrífugas												
Área de leitos (m <sup>2</sup> )					720	1.200	1.680	2.160				
Capacidade das centrífugas (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )					5	10	10	10				
Regime de operação (h.d <sup>-1</sup> )					-	5	5	8	11			
Volume do tanque de equalização (m <sup>3</sup> )					25	45	60	75				
Centrífugas												
Capacidade (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )					10	10	10	30	30	30	30	
Regime de operação (h.d <sup>-1</sup> )					-	4	8	12	5	7	9	13
Volume do tanque de equalização (m <sup>3</sup> )					-	35	70	100	130	160	170	225
Wetlands construídos para lodo												
Área total (m <sup>2</sup> )	240	480	1.008	1.920	3.872	7.700	11.550					
Estabilização alcalina prolongada - Lodo desaguado em leitos de secagem												
Área total de pátio (m <sup>2</sup> )			324	649	1.297	2.595						
Estabilização alcalina prolongada - Lodo desaguado em leitos + centrífugas												
Área total de pátio (m <sup>2</sup> )					1.254	2.508	3.763	5.017				
Volume do silo de cal (m <sup>3</sup> )					14	55	55	55				
Estabilização alcalina prolongada - Lodo desaguado em centrífugas												
Área total de pátio (m <sup>2</sup> )					1.233	2.465	3.698	4.930	6.163	7.704	11.556	
Volume do silo de cal (m <sup>3</sup> )					55	55	55	55	55	110	110	
Secagem térmica												
Capacidade do secador (kg.h <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	2.000	2.000	2.000	4.500	4.500	4.500	4.500	
Regime de operação (h.d <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	4	8	12	5	7	9	13	
Déficit energético (kcal.d <sup>-1</sup> .1.000 <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	964	1.928	2.893	3.857	4.821	6.026	9.040	
Consumo de GLP (kg.d <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	87	174	261	347	434	543	814	

GLP: gás liquefeito de petróleo.

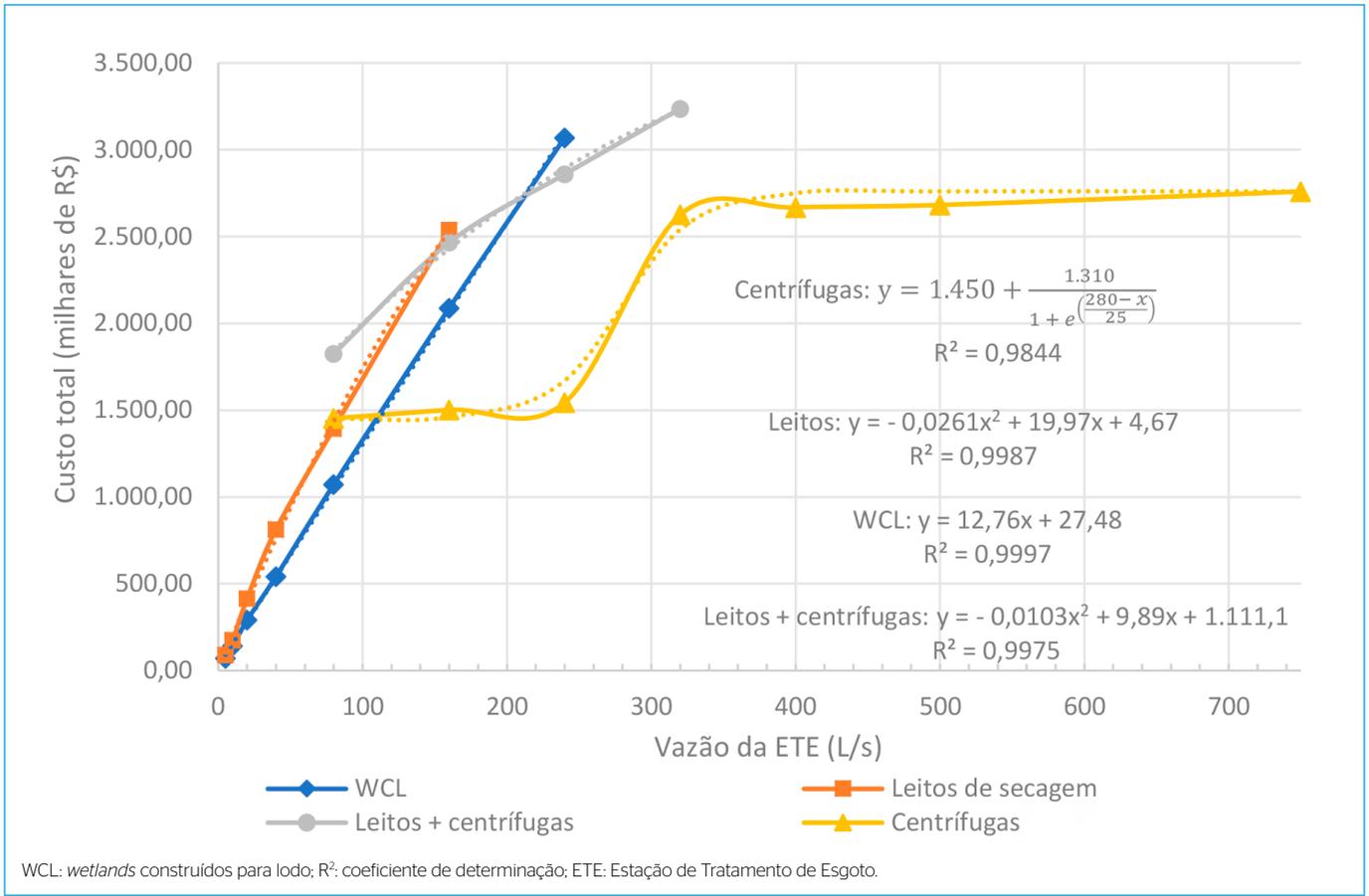


Figura 1 - CAPEX: wetlands construídos para lodo, leitos de secagem e centrífugas.

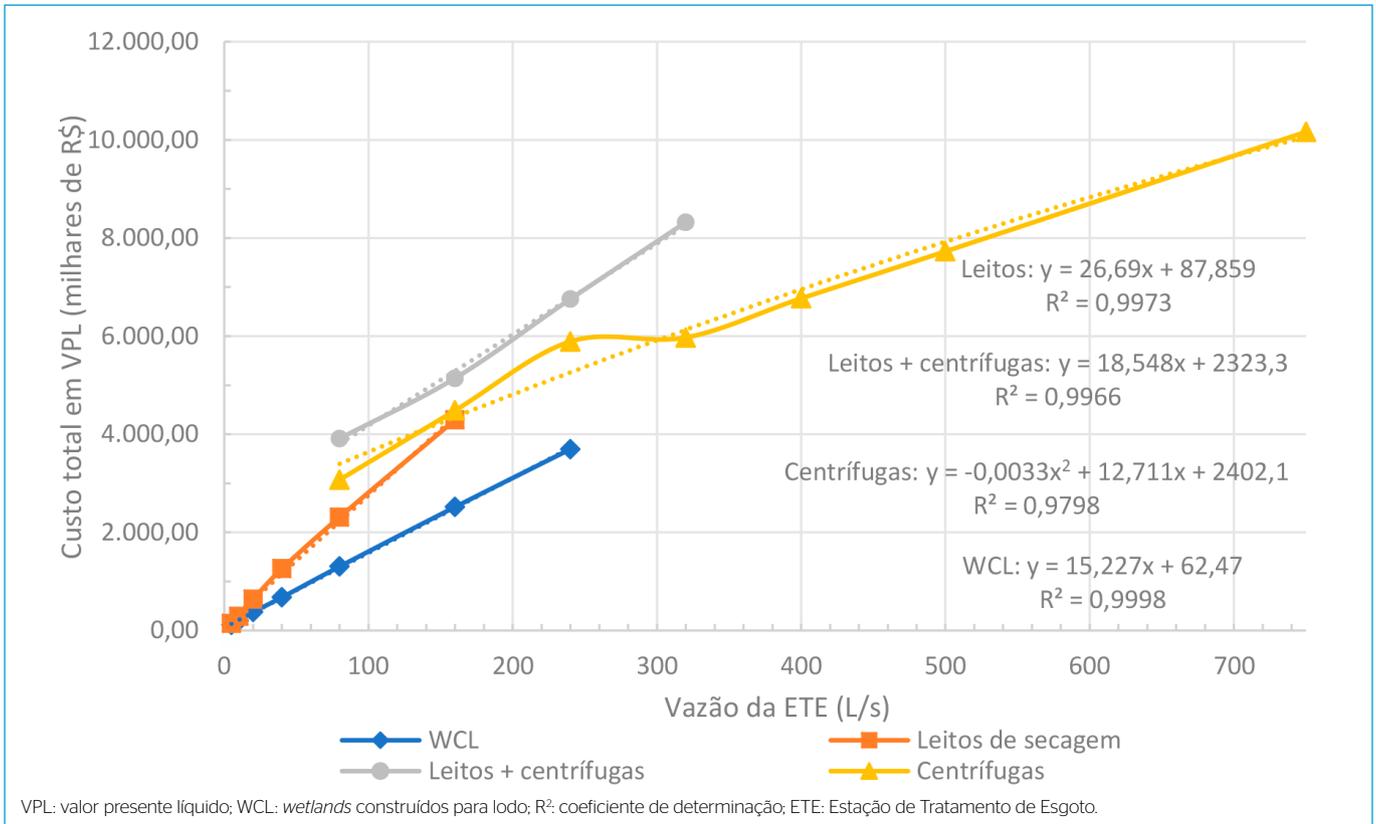


Figura 2 - CAPEX + OPEX: wetlands construídos para lodo, leitos de secagem e centrífugas.

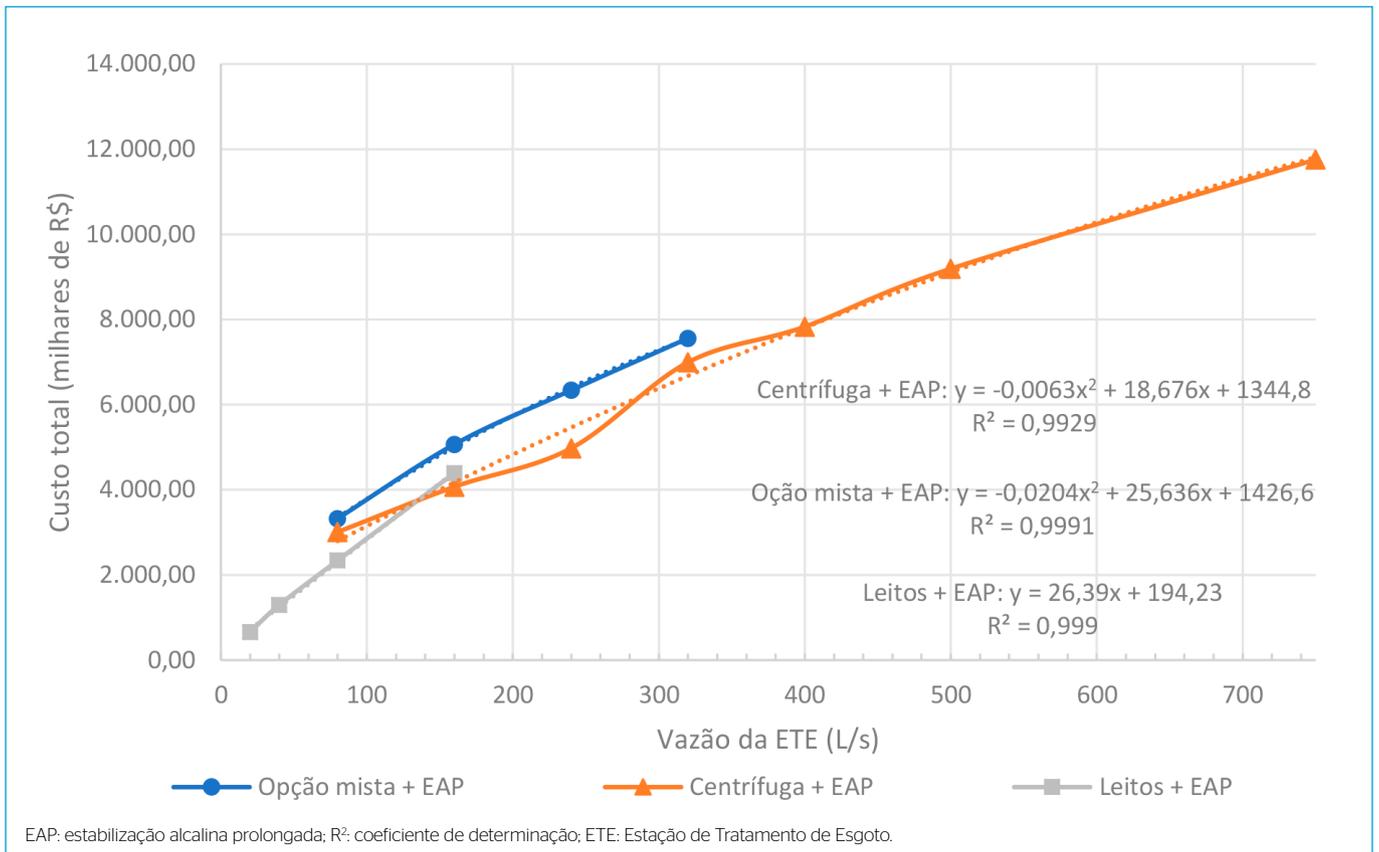


Figura 3 - CAPEX: desaguamento + estabilização alcalina prolongada.

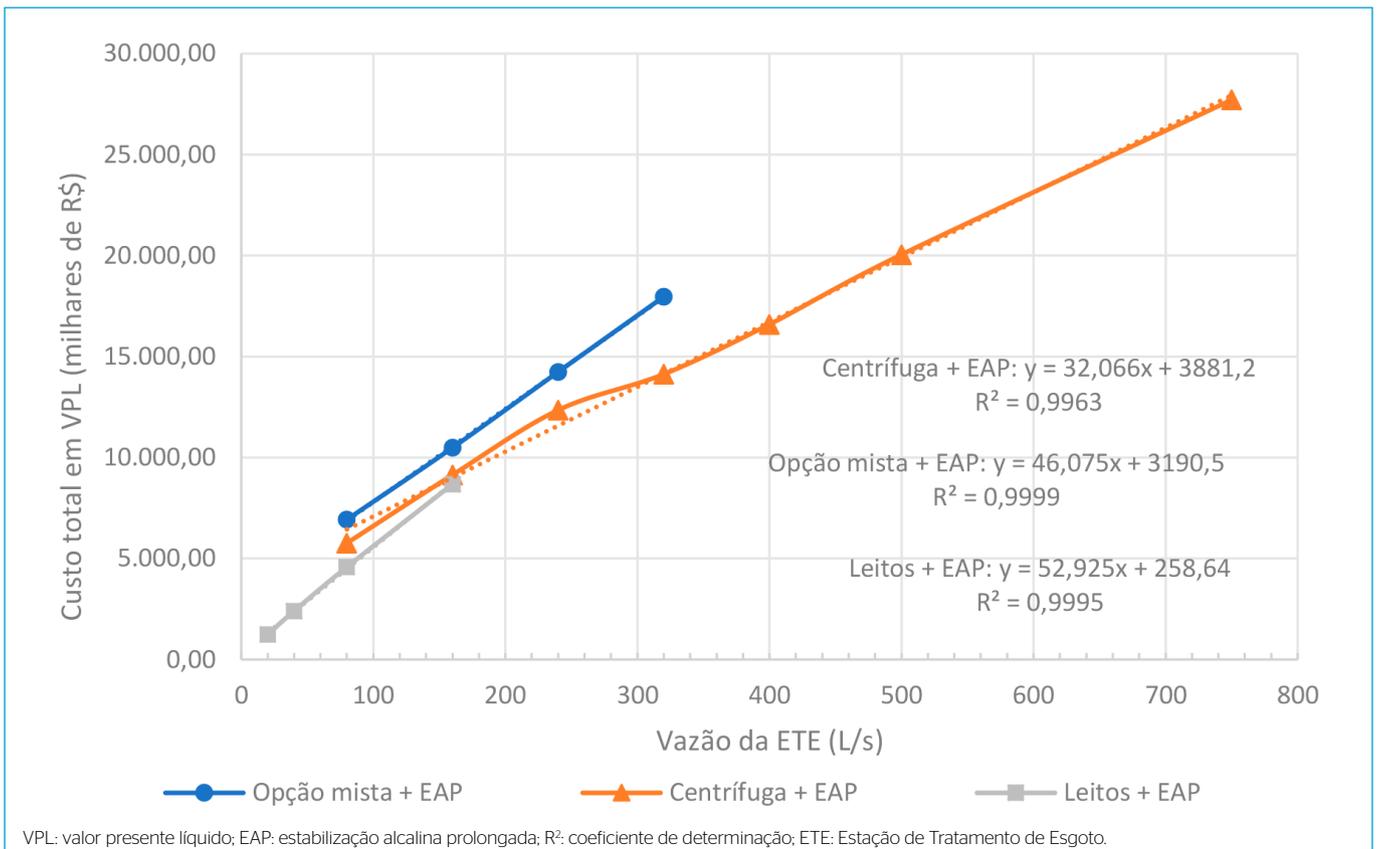


Figura 4 - CAPEX + OPEX: desaguamento + estabilização alcalina prolongada.

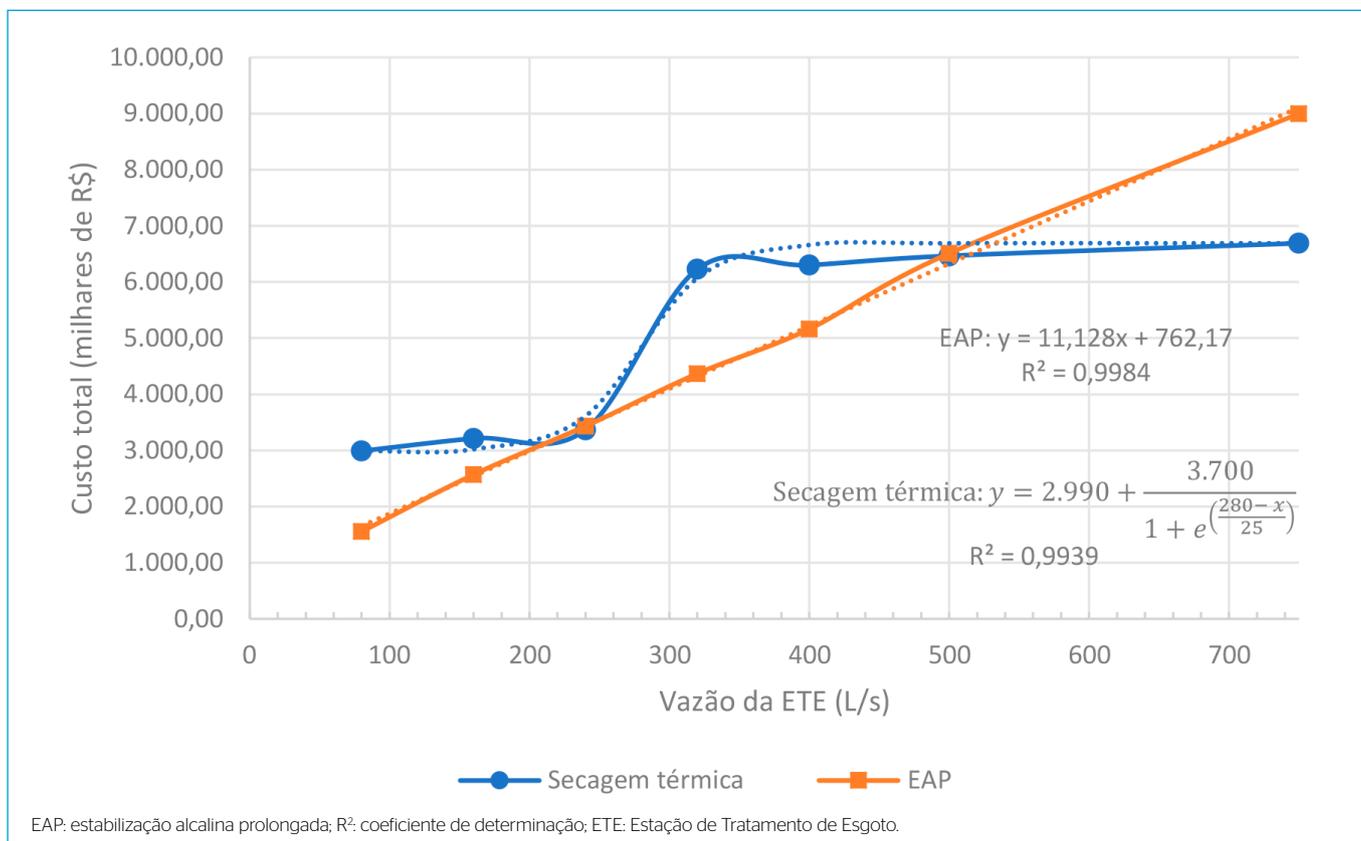


Figura 5 - CAPEX: estabilização alcalina prolongada e secagem térmica.

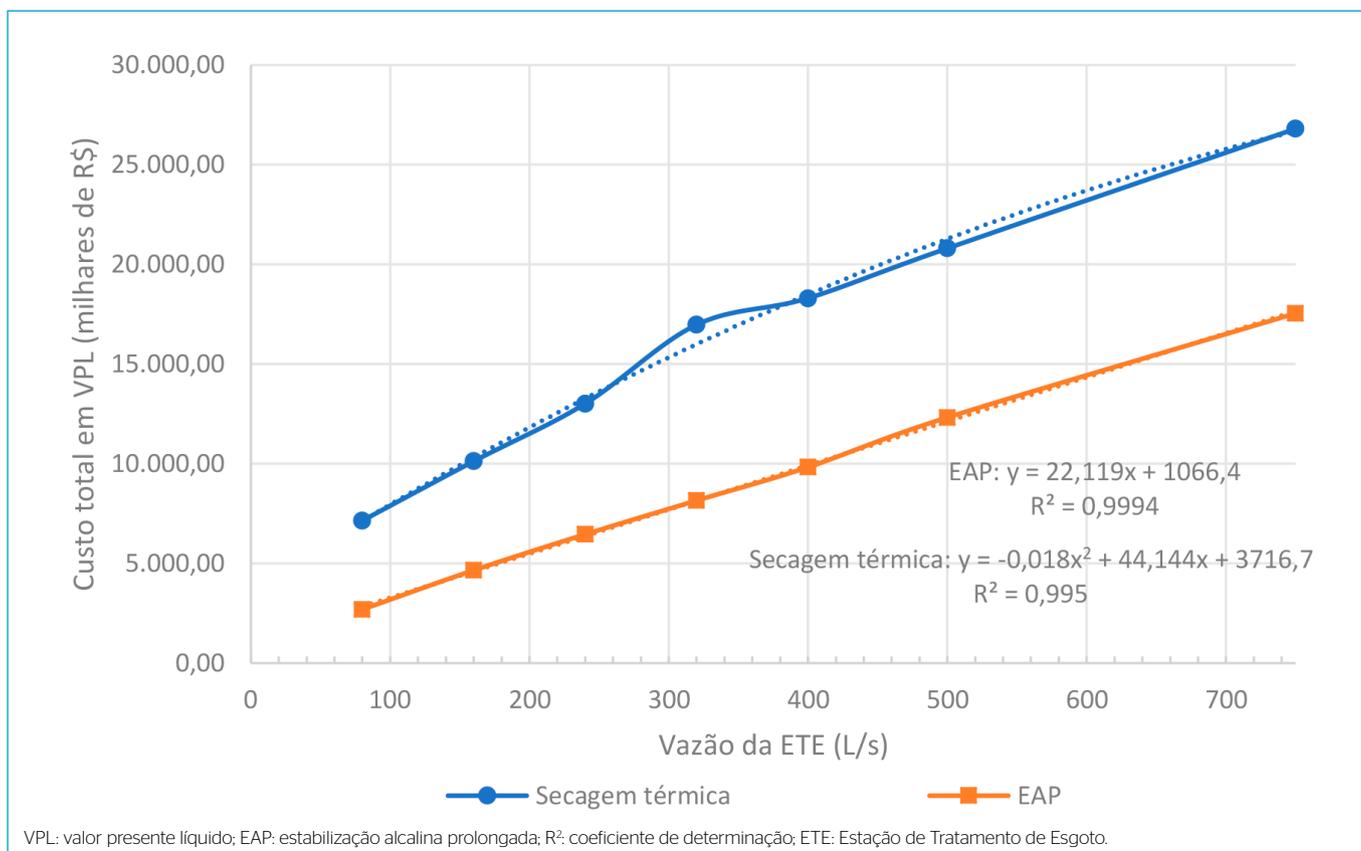
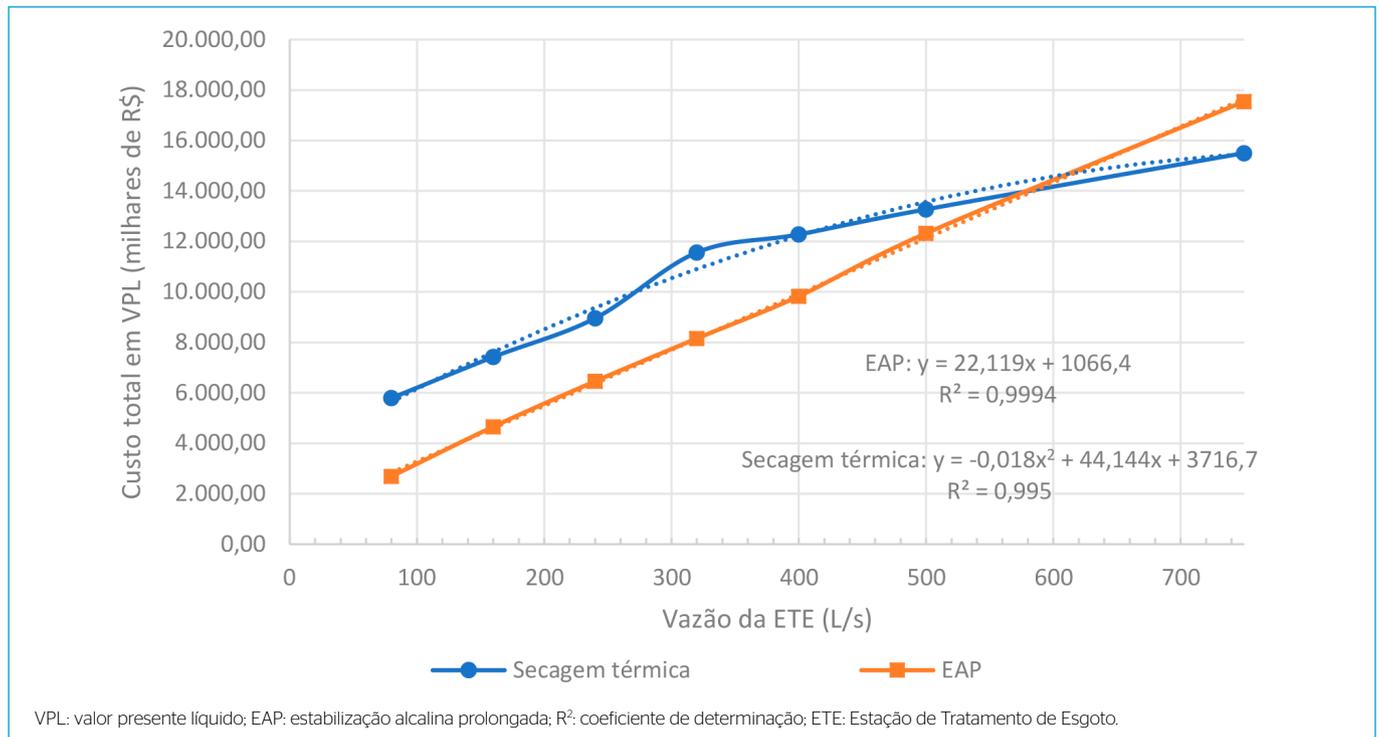


Figura 6 - CAPEX + OPEX: estabilização alcalina prolongada e secagem térmica.



**Figura 7 - CAPEX + OPEX: estabilização alcalina prolongada e secagem térmica sem complementação energética.**

- O CAPEX dos leitos de secagem superou o das centrífugas para ETEs com vazões acima de 80 L.s<sup>-1</sup>. Porém, considerando-se CAPEX + OPEX, os leitos mantiveram-se mais econômicos para toda a faixa de vazão em que foram considerados (5 a 160 L.s<sup>-1</sup>);
- A opção mista de desaguamento, com 1/3 do lodo sendo desaguado em leitos de secagem e 2/3 em centrífugas, apresentou-se mais onerosa que cada opção individualmente;
- A consideração da EAP, após o desaguamento, elevou de 80 para 130 L.s<sup>-1</sup> a vazão em que o CAPEX dos leitos de secagem passa a ser superior ao das centrífugas;
- Os WCLs apresentaram CAPEX superior ao das centrífugas para ETEs acima de 120 L.s<sup>-1</sup>; porém, quando considerado CAPEX + OPEX, resultaram na alternativa de desaguamento mais econômica;
- A EAP apresentou-se mais econômica que a secagem térmica para ETEs com vazões de até 500 L.s<sup>-1</sup>, quanto ao CAPEX, e para toda a faixa de vazão quando considerado CAPEX + OPEX;
- Não foi verificada a autonomia do sistema de secagem térmica com o uso do biogás gerado na própria ETE. Com isso, em razão do custo de complementação energética, essa alternativa manteve-se mais onerosa que a EAP para toda a faixa de vazão estudada.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Cerqueira, P. L. W.: Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação.  
Aisse, M. M.: Conceituação, Análise Formal, Supervisão, Validação.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Resolução Normativa 414/2010* – Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília: ANEEL, 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>. Acesso em: set. 2018.

AMARAL, K.G.C. *Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estações de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (BNDES). *Saneamento ambiental e recursos hídricos*. BNDES. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-saneamento-ambiental-recursos-hidricos>. Acesso em: maio 2019.

BARÉA, P.B. *Desaguamento e higienização de lodo de esgotos sanitários: pré-dimensionamento e estimativas de custos de implantação*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

- BIELSCHOWSKY, M.C. *Modelo de gerenciamento de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da bacia da baía de Guanabara*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- BITTENCOURT, S. *Gestão de processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da Resolução CONAMA 357/06*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M.; SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do Paraná, Brasil. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.22, n.6, p.1129-1139, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>
- CERQUEIRA, P.L.W. *Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2019.
- CERQUEIRA, P.L.W.; AISSE, M.M. Dimensionamento de leitos de secagem para desaguamento de lodo anaeróbio: uma análise crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2017. *Anais* [...]. São Paulo: ABES, 2017.
- CERQUEIRA, P.L.W.; BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M. Proposta de dimensionamento de pátios de higienização de lodo de esgoto, por Estabilização Alcalina Prolongada, com base em parâmetros operacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019. *Anais* [...]. Natal: ABES, 2019.
- CERQUEIRA, P.L.W. *et al.* Processamento de lodo em ETEs que possuem reatores UASB e pós-tratamento aeróbio: reflexões e informações úteis. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE ETES SUSTENTÁVEIS, 1., 2018. *Anais* [...]. Curitiba: ISAE-FGV, 2019.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DE GOIÁS (SANEAGO). *Tabela de Preços: Composições Analíticas*. Goiás: Saneago, 2017. Disponível em: <http://www.saneago.com.br/2016/arquivos/construcao-civil/Composicoes-Analiticas.pdf>. Acesso em: dez. 2018.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). *Contato pessoal*. Gerência de Tratamento de Esgoto (GTESG) / Gerência de Processo Esgoto (GPEG). Curitiba: SANEPAR, jun/dez. 2018a.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). *Manual de Projetos de Saneamento - MPS*. Curitiba: SANEPAR, 2018b. Disponível em: <http://site.sanepar.com.br/informacoes-tecnicas/1749>. Acesso em: jul. 2019.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). *Tabela de Preços Unitários Compostos*. Curitiba: SANEPAR, 2018c. Disponível em: [http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/tabelas-de-precos/jun2018\\_s\\_bdi-contratos\\_mos\\_4a\\_ed\\_v00\\_publica.pdf](http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/tabelas-de-precos/jun2018_s_bdi-contratos_mos_4a_ed_v00_publica.pdf). Acesso em: dez. 2018.
- FLORIPES, T.C.; CHERNICHARO, C.A.L.; MOTA FILHO, C.R. Avaliação do descarte de excesso de lodo secundário de FBP sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux - Itabira-MG. *Revista DAE*, São Paulo, v. 66, n. 211, p. 89-104, jul/set. 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.016>
- GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (org.). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p. 157-258.
- JORDÃO, E.P.; PESSÓA, C.A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017. 916 p.
- LOBATO, L.C.S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- PACHECO, R.P. *Custos para implantação de sistemas de esgotamento sanitário*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Resolução SEMA 21 de 22 de abril de 2009*. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. Paraná, 22 abr. 2009.
- POMPEO, R.P. *Influência da estocagem prolongada de lodos de esgoto, em diferentes condições operacionais, na redução de patógenos, visando a reciclagem agrícola*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- POSSETTI, G.R.C. *et al.* Investigação Experimental de um Sistema Piloto de Secagem Térmica de Lodo Movido a Biogás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2015. *Anais* [...]. Rio de Janeiro: ABES, 2015.
- ROSA, A.P. *et al.* Energy potential and alternative usages of biogás and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. *Water Science & Technology*, v. 73, n. 7, p. 1680-1690, 2016. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.643>
- SANTOS, D.S. *et al.* Efeito da secagem em leitos nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 341-349, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016100531>
- SUNTTI, C.; MAGRI, M.E.; PHILIPPI, L.S. Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical aplicados na mineralização e desaguamento de lodo de tanque séptico. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, n. 1, p. 63-72, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000100010>
- TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H.D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2014. 2018 p.
- UGGETTI, E. *et al.* Sludge treatment Wetlands: A review on the state of the art. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 9, p. 2905-2912, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.102>
- VALENTE, V.B. *Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de Tratamento de Esgoto no Brasil*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. v. 1.
- VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R.F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (org.). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2014. p. 15-66.