

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

Analysis of the cost of life cycle in the treatment and final destination of sludge and biogas, from WWTP employing reactor UASB

• **Data de entrada:**
30/07/2018

• **Data de aprovação:**
02/04/2019

Karina Guedes Cubas do Amaral^{1*} | Miguel Mansur Aisse¹ | Gustavo Rafael Collere Possetti²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.064>

ORCID ID

Amaral KGC  <https://orcid.org/0000-0002-8479-587X>

Aisse MM  <http://orcid.org/0000-0003-4620-559X>

Possetti GRC  <https://orcid.org/0000-0001-8816-5632>

Resumo

A Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) auxilia na verificação dos custos existentes em cada etapa de ciclo de vida de um determinado produto, ajudando no reconhecimento de gastos com aquisição, operação, manutenção, transporte e disposição final. Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo (UASB), usados em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), geram dois subprodutos que podem ser utilizados: lodo e biogás. O objetivo deste estudo foi realizar a análise do custo do ciclo de vida de quatro diferentes cenários de tratamento e destinação final do lodo e biogás. A unidade funcional utilizada foi o tratamento e o gerenciamento dos subprodutos, ao tratar 1 m³ de esgoto doméstico. O cenário base, lodo sendo higienizado por meio da estabilização alcalina prolongada e destinado para agricultura, é o cenário com o menor custo do ciclo de vida. O alto custo dos cenários 1, secagem térmica do lodo utilizando o biogás, e cenários 2 e 3, utilização do calor da combustão do lodo, deve-se ao valor de aquisição do equipamento para a secagem do lodo, representando 56% do total, incluindo-se custos de implantação e operação. O cenário 3 previu o aterro sanitário como destinação final das cinzas da combustão do lodo.

Palavras-chave: ACCV. Estabilização alcalina prolongada. Reatores anaeróbios. Secador térmico de lodo. Uso agrícola do lodo.

Abstract

The Life Cycle Cost Analysis (ACCV) assists in verifying the costs that exist in each stage of the life cycle of a given product, helping to recognize expenses with acquisition, operation, maintenance, transportation and final disposal. Upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB), used in the wastewater treatment plant (WWTP), generate two by-products that can be used: sludge and biogas. The objective of the present study was to perform life cycle cost analysis of four different treatment scenarios and final disposal of biological sludge and biogas. The functional unit used was the treatment and management of by-products, when treating 1 m³ of domestic effluent. The baseline scenario, sludge being sanitized through prolonged alkaline stabilization and intended for agriculture, is the scenario with the lowest life cycle cost. The high cost of scenarios 1, thermal drying of the sludge using biogas,

¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Curitiba - Paraná - Brasil.

² Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul - Curitiba - Paraná - Brasil.

* **Autora correspondente:** kacubas@gmail.com.

2 and 3, using the heat of combustion of the biological sludge, is due to the acquisition value of the equipment for drying the sludge using the biogas and sludge heat represents 56% of the total, including deployment and operating costs. Scenario 3 predicted the sanitary landfill as the final disposal of the ash from the combustion of sludge.

Keywords: Anaerobic reactors. Biogas. Biological sludge. Life cycle cost analysis. Sludge thermal dryers.

1 INTRODUÇÃO

A Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida - ASCV é uma metodologia e uma ferramenta de apoio à decisão baseada em uma abordagem sistemática que busca verificar o nível de sustentabilidade (impactos ambientais, econômicos e sociais) de um produto, serviço ou processo dentro do ciclo de vida do objeto em estudo (NGUYEN et al., 2017; ZORTEA, 2015). Dessa forma, esse planejamento, baseado nos princípios da sustentabilidade, resultou na incorporação das metodologias denominadas Custos do Ciclo de Vida (CCV) e Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S). Portanto, a ASCV acabou sendo uma agregação da ACV-A, CCV e ACV-S (ZORTEA, 2015; TRAVERSO, et al., 2012; UNEP/SETAC, 2011).

A ACV-A é uma entre as várias técnicas de gestão ambiental com o objetivo de identificar os possíveis impactos associados aos produtos/serviços, tanto na sua fabricação como no consumo. É utilizada para o estudo das cargas ambientais associadas aos diversos estágios de um sistema ou produto, pelo levantamento e quantificação da energia e dos materiais necessários (entradas) e dos resíduos e emissões liberados ao meio ambiente (saídas). Assim como na ACV-A, a ACV-S avalia o produto ao longo do seu ciclo de vida, mas com o objetivo de avaliar os aspectos sociais e socioeconômicos e seus potenciais impactos positivos e negativos. Já na ACCV, o objetivo é calcular o custo total da propriedade durante toda a vida útil de um ativo (HUPPES et al., 2004; ONG et al., 2012; LIM et al., 2008; NGUYEN et al., 2017). A Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) auxilia na verificação dos custos existentes em cada eta-

pa de ciclo de vida de um determinado produto, ajudando no reconhecimento de gastos com aquisição, operação, manutenção, transporte e disposição final (DHILLON, 2013).

A tecnologia de reatores de manta de lodo (UASB/RALF) é a segunda mais empregada em termos de número de instalações de estações de tratamento de esgotos no Brasil (NOYOLA et al., 2012; BRASIL, 2017) e representa 94,6% das Estações existentes no Paraná (ROSS, 2015). Nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, a tecnologia de reatores UASB é a tecnologia mais empregada, representando aproximadamente 40% das estações. Essa proporção eleva-se para 51% quando há análise específica de Estações de Tratamento de Esgotos - ETEs de médio porte. Nota-se ainda a presença significativa dos reatores UASB entre as opções tecnológicas aplicadas a estações com capacidade instalada de tratamento superior a 100.000 habitantes (40% das ETEs implantadas), em número superior ao processo de lodos ativados (CHERNICHARO et al., 2018). A tecnologia apresenta como característica a geração de lodo adensado e estabilizado e geração de biogás rico em metano, sendo o poder calorífico deste último ainda pouco aproveitado. Os dois subprodutos precisam ser gerenciados de forma ambientalmente correta, sanitariamente segura e economicamente viável (POSSETTI et al., 2015).

Uma das formas de higienização do lodo é a Estabilização Alcalina, que ocorre quando quantidade suficiente de material alcalino, geralmente cal, é adicionada ao lodo para aumentar o pH até 12, resultando em uma redução da população

de microrganismos e da potencial ocorrência de odores (METCALF & EDDY 2016). A cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)₂) são os produtos mais utilizados. A cal virgem é o produto mais indicado quando aplicado em lodos já na fase sólida. Estudos mostram que dosagens de CaO entre 30% a 50% da massa seca de lodo são capazes de alcançar as características necessárias para a produção de biossólidos. O lodo, após misturado, deve permanecer em local coberto por um período de 30 dias para que complete a higienização (ANDREOLI et al. 2014; PARANÁ, 2009). Tal atividade é desenvolvida na Unidade de Gerenciamento de Lodo - UGL, que é definida pela Resolução Sema 021 (PARANÁ, 2009) como uma unidade, vinculada ou não a uma ETE, que realiza o gerenciamento de lodo gerado por uma ou mais ETEs para fins de reciclagem agrícola.

Como alternativa à Estabilização Alcalina Prolongada - EAP, foram desenvolvidos estudos relati-

vos à secagem térmica e à combustão do lodo. Para a secagem térmica, é recomendável um teor de sólidos na alimentação entre 15-30%, obtido por meio do desaguamento mecânico ou de leitões de secagem. O processo consiste no aquecimento do lodo, em ambiente hermeticamente fechado, com a consequente evaporação e coleta da umidade presente. O biogás dos reatores UASB pode ser utilizado como fonte de energia para realizar a secagem do lodo. Em condições ideais são necessários 2.744 kJ (655 kcal) para evaporar 1 kg de água presente no lodo (ANDREOLI et al., 2014). O Guia Técnico de Aproveitamento do Biogás cita valores entre 3.352,01 e 4.190,01 kJ (BRASIL, 2015). Possetti et al. (2015) verificaram, em um experimento piloto, que a energia necessária para remover 1 kg de água presente no lodo foi, em média, de 5.543,39 kJ. A Fig. 1 demonstra o sistema térmico de secagem de lodos movido a biogás.

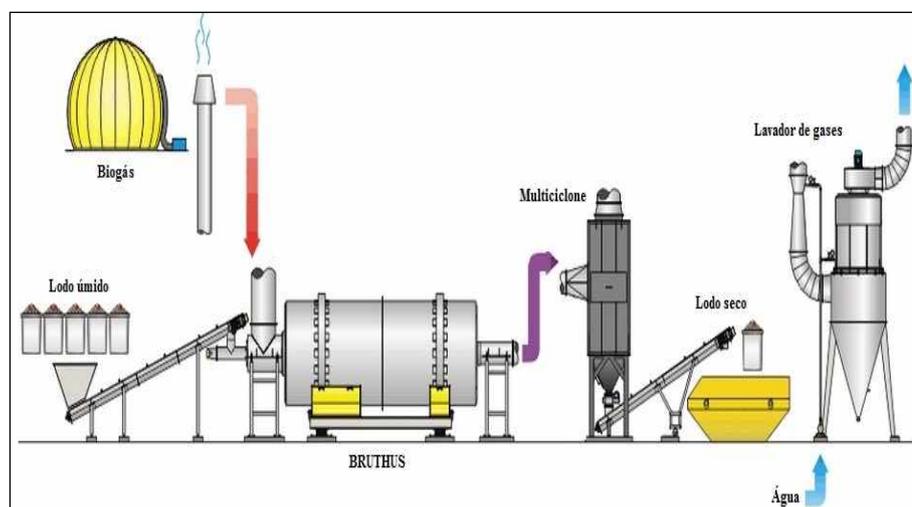


Figura 1: Representação esquemática do sistema térmico piloto de secagem de lodos movido a biogás
Fonte: Possetti et al. (2015).

Para a realização da combustão do lodo e seu aproveitamento calorífico, é necessário acoplar a unidade para a sua combustão. De acordo com experimento realizado por Possetti et al.,

(2015) o poder calorífico inferior do lodo seco é de 2.497,84 kcal/kg. A Fig. 2 demonstra o sistema térmico de secagem de lodos movido ao calor proveniente da combustão do lodo.

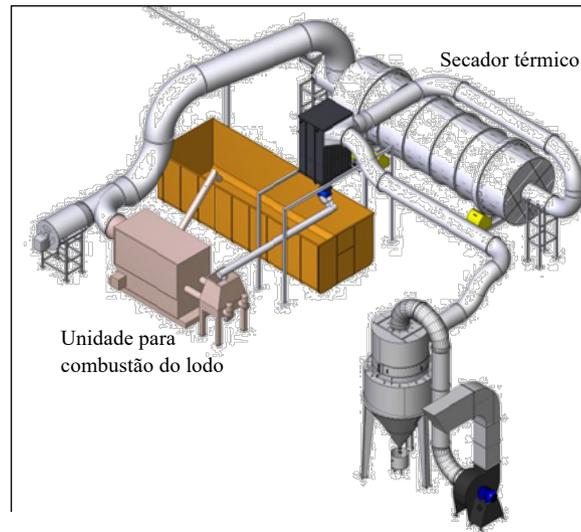


Figura 2: Representação esquemática do sistema térmico piloto de secagem de lodos movido ao calor da gerado pela combustão do lodo
Fonte: Albrecht (2017a).

Com relação à destinação final do lodo, os principais empregos são o aterro sanitário e o uso agrícola. Em vários países do mundo, o uso agrícola, em diferentes proporções, é uma das alternativas de destinação final para o lodo de esgoto gerado nas ETEs. Nos Estados Unidos, as cerca de 16.500 estações municipais de tratamento de esgoto produzem aproximadamente oito milhões de toneladas secas de lodo a cada ano. Tradicionalmente, as opções para destinação do lodo de esgoto têm sido a incineração (17%), o aterro sanitário (28%) ou a aplicação em solos para produção agrícola, florestal e recuperação de áreas (45%). Na Austrália, o uso agrícola representa 75% da destinação final, sofrendo um aumento significativo nos últimos anos: 55% em 2010, 59% em 2013 e 64% em 2015 (AUSTRÁLIA, 2018). Na União Europeia, países como Portugal, Irlanda, Reino Unido, Espanha e Bulgária possuem destinação agrícola, representando mais de 50% do destino final total.

No Brasil, a Resolução Conama 375/06 regula o uso agrícola do lodo de esgoto (BRASIL, 2006). No estado do Paraná, a Resolução Sema

021/09 (PARANÁ, 2009) contém os procedimentos, padrões e requisitos para a utilização do lodo em áreas agrícolas definidos na Resolução Conama 375/06, sendo em alguns aspectos mais restritiva que a resolução federal. Devido à sazonalidade na demanda de aplicação de fertilizante de diferentes culturas, fica inviável a totalidade da aplicação do lodo gerado na agricultura, necessitando também o destino em aterro sanitário ser uma das opções.

Atualmente, o aterro é a alternativa mais empregada para o gerenciamento do lodo de ETE no Brasil. Nesse contexto, destacam-se os elevados gastos no transporte, a taxa para a disposição em aterro e o desperdício do potencial dos nutrientes e/ou energético do lodo desidratado.

O biogás produzido em reatores UASB é composto majoritariamente por metano, nitrogênio e dióxido de carbono. Em menores concentrações, é também composto por sulfeto de hidrogênio, oxigênio, hidrogênio, monóxido de carbono, amônia e siloxanos (SILVEIRA et al., 2015; CABRAL et al., 2016; CABRAL et al., 2017).

A variação da produção de biogás em reatores UASB é de 4,8 – 18 NL de biogás/habitante.dia. Assumindo-se que 60% desse gás possa ser captado e 40% seja perdido devido à dissolução no efluente, pode ser esperada uma captação máxima de 10 NL de biogás/habitante.dia. Cerca de 7 NL de biogás/habitante.dia estariam sendo perdidos junto com o efluente (PRESSINOTTI; SILVA, 2015; DUARTE et al., 2018, PAULA, 2019; LOBATO et al., 2012).

Atendendo à legislação, usualmente, nas estações de tratamento de esgoto do Brasil, o biogás gerado no processo de tratamento do esgoto doméstico é captado e conduzido para queima em *flares* abertos (equipamentos que promovem a destruição dos elementos componentes do biogás pelo processo de combustão) (PARANÁ, 2014; ABNT, 2011). Os queimadores abertos possuem eficiência de 50%. Nos queimadores fechados, em experimento piloto na Companhia de Saneamento do Paraná, a eficiência foi de até 98% de remoção de CH₄ e de 95% de H₂S (KAMINSKI et al., 2018).

Este estudo tem como objetivo realizar a análise do Custo de Ciclo de Vida - CCV da fase operacional do tratamento e destinação final do lodo e biogás, sendo um cenário base, onde o biogás é apenas queimado em *flare*, e três cenários onde este é utilizado na própria ETE. Estudos anteriores realizaram a avaliação das dimensões ambiental e social do cenário base e propostos. Os resultados obtidos na ACV-A mostraram que o uso do biogás, gerado nos reatores UASB, para a secagem do lodo tem o potencial de reduzir os impactos ambientais em todas as categorias avaliadas. Com relação à ACV-S, o melhor desempenho foi referente ao cenário onde ocorre a combustão do lodo, pois ocorre uma maior inertização do lodo e este apresenta-se com um maior potencial agronômico (AMARAL et al., 2018; AMARAL et al., 2017).

2 METODOLOGIA

A ETE em estudo se situa no município de Curitiba - PR, atendendo à Bacia do Ribeirão Padiilha. A ETE possui capacidade para tratar 440 L.s⁻¹ de esgoto doméstico, atendendo uma população de até 235.000 habitantes. A vazão média atual de operação é de 365 L.s⁻¹. No que diz respeito ao tratamento preliminar do esgoto, a ETE é dotada de duas grades mecanizadas com espaçamento de 3 mm e um desarenador tipo Dorr - Oliver. Para a etapa de tratamento biológico do esgoto, possui seis reatores tipo UASB (tratamento secundário) e duas lagoas facultativas aeradas (pós-tratamento).

O lodo produzido nos reatores UASB e na lagoa aerada é periodicamente descartado e, posteriormente, desaguado em uma centrífuga. Depois disso, o lodo é submetido ao processo de EAP na denominada UGL (BITTENCOURT, 2014), armazenado e disposto na agricultura.

Os dados de volume de lodo, teor de sólidos totais, consumo de polímero, consumo de cal virgem, volume de lodo desaguado e de consumo de energia elétrica de todos os equipamentos utilizados pelo tratamento do lodo são referentes aos anos de 2014, 2015 e 2016 (KOGA, 2016). No levantamento do consumo de energia da etapa de desaguamento do lodo foram considerados os seguintes equipamentos: bomba dosadora do polímero, agitadores do tanque de polímero, centrífuga e rosca transportadora do lodo. Para a determinação da massa de lodo, expressa em kg, foram utilizadas as densidades dos lodos (1.030 kg/m³ para o lodo bruto e 1.050 kg/m³ para o lodo desaguado) descritas por Andreoli et al. (2014). O teor de metano no biogás foi calculado utilizando o software Probio 1.0 (pior cenário), levando em consideração a carga orgânica afluyente diária e calculada mensalmente pelo software nos anos de 2014 e 2015. A vazão média foi de 29.297 m³/dia e a concentração de DQO de 545 mg.L⁻¹. A Tabela 1 apresenta as ca-

racterísticas do lodo bruto e desaguado, correspondente à unidade funcional.

Tabela 1: Teor de sólidos secos e massa correspondente do lodo anaeróbio da ETE.

Material	ST (%)	Massa Total (kg) ²⁰
Lodo Bruto Equalizado	2,60	2,51
Lodo desaguado	19,95	0,31
Clarificado (Saída da Centrifuga)	0,17	-
Captura da Centrifuga (%)	93,7	-

Fonte: ²⁰KOGA (2016)

A unidade funcional do estudo é o gerenciamento dos subprodutos, lodo e biogás gerados ao tratar 1 m³ de efluente doméstico, englobando as fases de tratamento e destinação final. Os fluxos de referência são de 0,052 Nm³ de biogás e 2,51 kg de lodo, obtidos de reator anaeróbio tipo UASB e das lagoas de pós tratamento. O limite do sistema, destacando o estudo de caso e cenários propostos, é apresentado na Fig. 3.

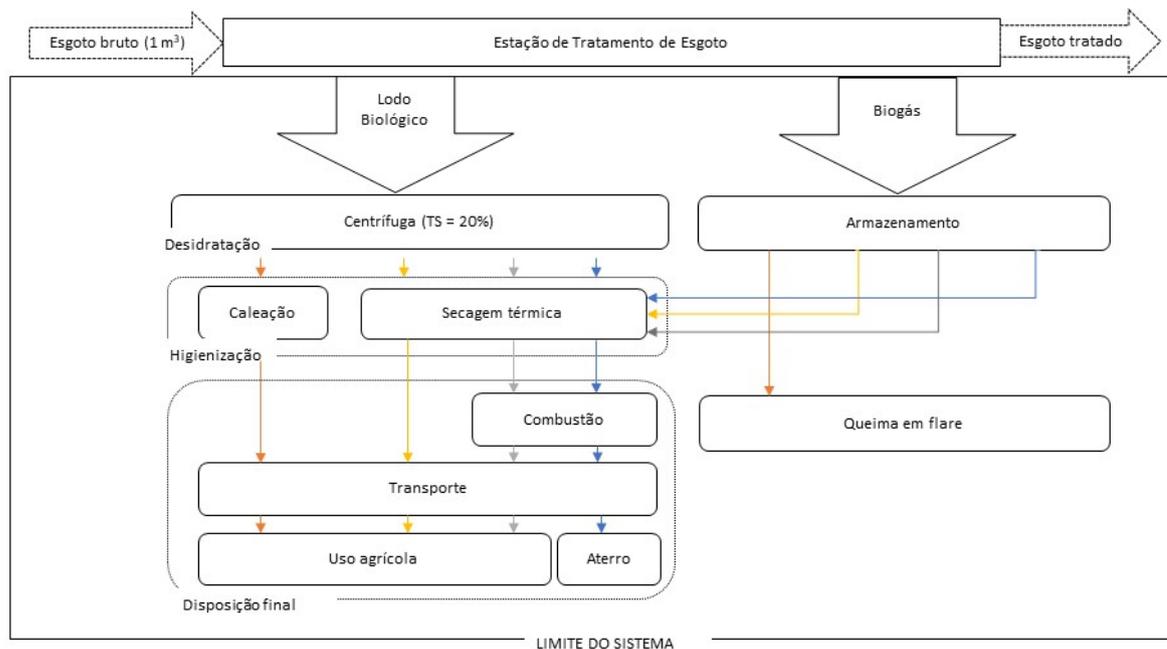


Figura 3: Cenários considerados neste estudo com relação ao tratamento e à destinação do lodo e do biogás

Legenda : Cenário base (→) Lodo sendo desaguado na centrifuga, submetido à EAP e destinado na agricultura. O biogás é queimado em flare aberto.

Cenário 1 (↔) Biogás é utilizado como fonte de calor para a secagem do lodo em secador rotativo. O lodo seco é destinado na agricultura.

O excedente do biogás é queimado em flare aberto.

Cenário 2 (→) É realizada a combustão do lodo para utilização do calor na secagem do lodo desaguado. As cinzas são destinadas na agricultura.

Cenário 3 (→) Semelhante ao cenário 2, sendo as cinzas destinadas no aterro sanitário.

O cenário base corresponde ao estudo de caso da ETE estudada. O cenário 1 corresponde à rota onde o biogás gerado é utilizado como fonte de energia para a secagem do lodo em secador rotativo. O lodo seco e higienizado é encaminhado para a agricultura. O cenário 2 corresponde à rota onde é realizada a combustão do lodo para utilização do calor na secagem do lodo desaguado. O poder calorífico não é suficiente, sendo utilizado um percentual do biogás gerado. As cinzas são destinadas para a agricultura.

O cenário 3 é semelhante ao cenário 2, sendo a destinação final das cinzas o aterro sanitário.

Foram levantados os custos referentes ao consumo de energia, produtos químicos, pessoal, aquisição dos equipamentos e manutenção. Os dados referentes aos custos e ao consumo de produtos foram fornecidos pela Companhia Paranaense de Saneamento e levantados com os fornecedores dos produtos. Os custos de aquisição incluíram as etapas

de fornecimento, obra civil e instalação. Os valores de aquisição e instalação foram levantados com o fornecedor do secador rotativo (ALBRECHT, 2017b; ALBRECHT, 2017b). Os custos de operação incluíram basicamente os custos de pessoal, consumo de energia elétrica e produtos químicos. As despesas com energia elétrica referem-se à consumida pelo tratamento e a de demanda, levantados na Fatura da Companhia referente ao mês de junho de 2017. O custo de manutenção para o cenário base foi levantado junto com a Companhia referente ao ano de 2016. Para os demais cenários, foi considerado um valor de 2% do valor de investimento do secador rotativo (ONG et al., 2012).

O inventário referente ao cenário 1 foi elaborado com dados do secador rotativo instalado em uma ETE em Curitiba - PR, e apresentado por Possetti et al. (2015) (Tabela 2).

Tabela 2: Resultados e dados operacionais do sistema piloto de secagem térmica de lodo anaeróbio.

Vazão operacional de alimentação do lodo	94,83 (\pm 33,75) kg/h
Sólidos totais do lodo de entrada do sistema	23,49 (+ 1,41) %
Sólidos totais do lodo de saída do sistema	83,96 (+ 1,33) %
Redução da massa de lodo	79%
Vazão de biogás utilizada no sistema	15,07 (+ 7,51) Nm ³ /h

Fonte: Adaptado de POSSETTI et al. (2015).

NOTA: Secador térmico rotativo operando em sistema piloto.

Para o cálculo de consumo de energia, foram utilizados dados da Proposta Técnica/Comercial No 382/2014, atualizada em 2017 (ALBRECHT, 2017a; ALBRECHT, 2017b). O consumo de energia do secador é de 75 kWh, para uma capacidade de 600 kg de lodo/hora.

O biogás, gerado pelos reatores UASB, é queimado em flare aberto, com uma eficiência de aproximadamente 50% (KAMINSKI et al., 2018).

No cenário 2 ocorre a combustão do lodo, sendo a cinza destinada à agricultura. O poder calorífico inferior do lodo seco é de 2.497,84 kcal/kg (POSSETTI et al., 2015).

O cenário 3 é semelhante ao cenário 2, sendo as cinzas destinadas para o aterro sanitário. Nesse cenário foi utilizada a distância de 27 km, considerando ida e volta, da ETE até o aterro sanitário.

A Tabela 3 apresenta os custos considerados neste estudo para a avaliação.

Tabela 3: Custos envolvidos para o tratamento e destinação do lodo e biogás.

CUSTOS ENVOLVIDOS			
Cenário base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Lodo			
Aquisição da centrífuga (obra, bombas, preparador polímero), Energia (demanda e consumida), Consumo polímero, Funcionários			
Construção barracão (*)	Aquisição do secador rotativo	Aquisição do secador rotativo + unidade de combustão	Aquisição do secador rotativo + unidade de combustão
Mistura cal+lodo	Instalação	Instalação	Instalação
Consumo de cal	Obra civil	Obra civil	Obra civil
Transporte lodo	Energia elétrica	Energia elétrica	Energia elétrica
Lancer	Nonox (2 ^o)	Nonox	Nonox
Análises laboratoriais	Funcionários	Funcionários	Funcionários
Apoio agrônômico	Transporte lodo	Transporte lodo	Transporte lodo
Manutenção	Lancer (3 ^o)	Lancer	Custo do aterro sanitário
	Análises laboratoriais	Análises laboratoriais	
	Apoio agrônômico	Apoio agrônômico	
	Manutenção	Manutenção	
Biogás			
Aquisição do queimador (4 ^o)	-	-	-

Nota: (*) Para a EAP; (2^o) Produto químico utilizado para o controle do odor; (3^o) Utilizado para o espalhamento do lodo; (4^o) Tipo aberto.

As despesas com energia elétrica referem-se à consumida pelo tratamento e a de demanda. A energia de demanda se refere à potência instalada na planta de tratamento.

$$DEC = POT \times NH \times CEC \times 365 \quad (1)$$

Em que: DEC = Despesa com energia elétrica consumida (R\$/ano); POT = Potência consumida em equipamentos (kW); NH = Número de horas de operação (h); CEC = Custo de energia elétrica de consumo (R\$/kWh); 365 = Número de dias no ano.

$$DED = POT \times CED \quad (2)$$

Em que: DED = Despesa com energia elétrica demanda (R\$/ano); POT = Potência consumida em equipamentos (kW); CED = Custo de energia elétrica de demanda (R\$/kWh).

Os custos da energia elétrica consumida e demanda foram levantados na Fatura da Companhia, referente ao mês de junho de 2017.

O custo de manutenção para o cenário base foi levantado junto à Companhia referente ao ano de 2016. Para os demais cenários, foi considerado um valor de 2% do valor de investimento do secador rotativo (ONG et al., 2012).

Foram considerados também os custos referentes à destinação final. Para os cenários que contemplaram o uso agrícola (cenário base, 1 e 2), esses custos se referem ao transporte até o destino, ao equipamento *lancer*, utilizado para o espalhamento do lodo higienizado no solo, apoio agrônomo ao agricultor para aplicação do lodo e análises laboratoriais exigidas pela CONAMA 375/2006 (sendo 1 lote de lodo para análise por bimestre, de acordo com o porte da UGL) (BRASIL, 2006).

Para a etapa de tratamento e destinação final do biogás, foram levantados os custos dos queimadores aberto (aquisição e instalação), utilizado atualmente pela Companhia (cenário base). Para os cenários que

utilizam o calor do biogás para a secagem do lodo (cenário 2, 3 e 4), foi realizado o levantamento do custo do gasômetro para a armazenagem do biogás, instalado sobre uma base de concreto e constituído de duas membranas flexíveis.

Os custos *s* foram convertidos para o VPL por meio da seguinte fórmula:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (R\$) \quad (1)$$

Em que: “n” é o período de avaliação (ano); “r” é a taxa de desconto; “C_t” é o custo estimado no ano “t”. A taxa de desconto “r” é o fator chave na estimativa do VPL principalmente influenciada pela inflação e taxa de juros (DAVIS et al., 2005; NGUYEN et al., 2017). Foi utilizada a taxa de Custo Médio de Capital (*Weighted Average Cost of Capital* - WACC), que é de 8,62%, segundo a Agência Reguladora do Paraná (AGEPAR, 2017).

Para cada alternativa de processo analisada foram calculados o Custo Total (CT), soma de todos custos de aquisição, operação e manutenção anual. Foi considerado também o custo da destinação final do lodo, contemplando o custo de transporte e combustíveis utilizados. Nos cenários onde é aplicada a destinação agrícola, foram considerados os custos com as análises laboratoriais e apoio agrônomo. Após o levantamento anual dos custos, os valores foram convertidos para a unidade funcional, sendo o tratamento e o gerenciamento dos subprodutos ao tratar 1 m³ de efluente. Mais informações e detalhamento dos custos podem ser obtidos em Amaral (2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores (em reais) de cada etapa do tratamento e destinação final, por unidade funcional (tratamento e destinação final dos subprodutos ao tratar 1 m³ de efluente) são apresentados na Tabela 4.

Para o cálculo do custo de aquisição da centrífuga (etapa de desaguamento de todos os cenários), utilizou-se o valor apresentado por BARÉA (2013) e atualizado pelo Índice Nacional de Custo da Construção - INCC. Foi considerada uma vida útil do equipamento de 20 anos.

Para o custo de energia elétrica consumida, foi considerado o horário de ponta (0,66 R\$/kwh), horário fora de ponta (0,46 R\$/kwh) e uma alíquota de ICMS de 29%. A Fig. 4 apresenta os valores para cada cenário estudado.

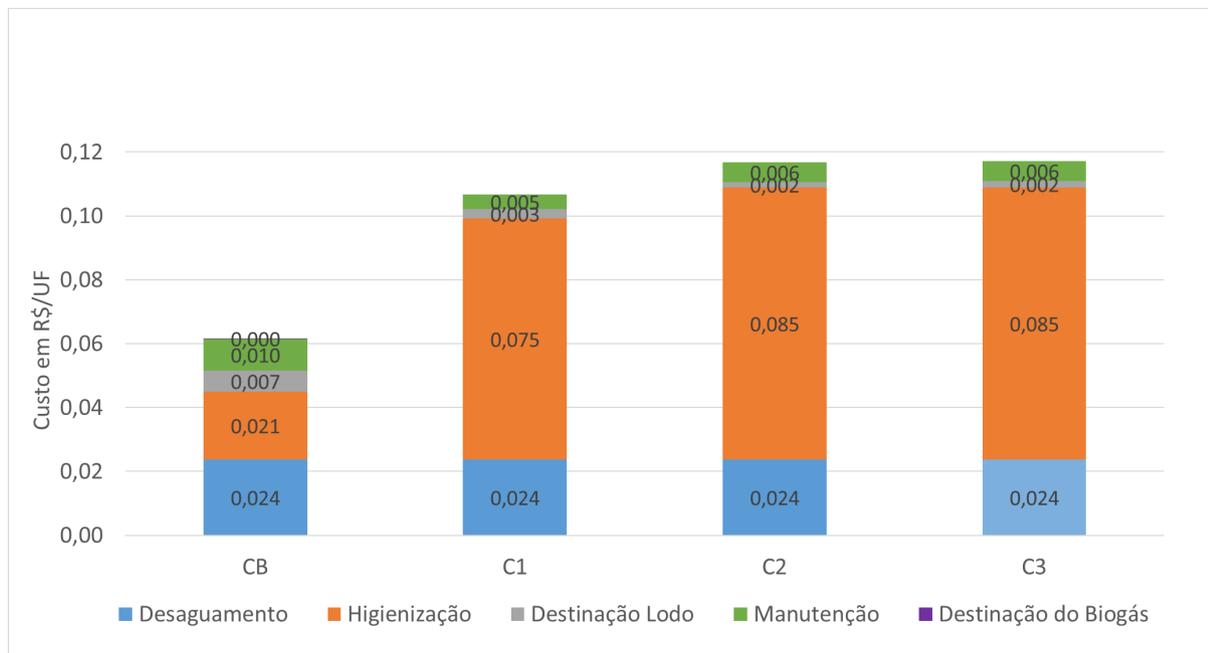


Figura 4: Custos para tratamento e destinação final do lodo nos 4 cenários (R\$/UF)

Legenda: CB = Cenário base (lodo sendo higienizado por meio de EAP e destinado na agricultura, biogás é destruído em queimadores de baixa eficiência), C1 = Cenário 1 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, utilizando o biogás, e destinado na agricultura), C2 = Cenário 2 (lodo sendo higienizado em secador rotativo, através do calor do próprio lodo, e as cinzas são destinadas na agricultura), C3 = Cenário 3 (semelhante ao cenário 2, mas as cinzas são destinadas ao aterro sanitário).

Conforme apresentado na Tabela 4 e na Fig.4, o cenário base apresenta o menor custo para o tratamento e destinação final do lodo e biogás. A maior contribuição do custo para esse cenário é a etapa de desaguamento (38%), onde o custo com funcionários representa 59% do valor total. Foi considerado, de acordo com o levantado junto à Companhia, um total de 4 funcionários para a etapa de desaguamento na centrífuga. Na etapa de higienização, a aquisição do barracão para armazenamento do lodo é a mais significativa, representando 65% dessa etapa. Na destinação final, o custo de transporte é o mais significativo, representando 59% do total dessa etapa.

Para a estimativa do custo da aquisição do barracão para armazenamento e realização da EAP (cenário base), foram observadas as dimensões encontradas na ETE em estudo. O custo foi obtido junto à empresa de construção civil atuante na região.

No cenário 1, o custo elevado se deve à etapa de higienização do lodo (71%), onde a aquisição do secador representa 56% desta etapa, o gasto energético, 21%, e o com pessoal, 19%. Com relação ao custo para destinação do lodo, este diminuiu 54% em relação ao cenário base, em virtude da diminuição do volume do lodo a ser destinado, devido à secagem térmica.

No cenário 2, o aumento do valor se deve ao valor da aquisição do equipamento para a combustão do lodo. O custo para a destinação diminuiu 73% em virtude da diminuição do volume a ser destinado, com relação ao cenário base. Neste cenário é realizada a destinação agrícola das cinzas da combustão do lodo.

O custo de destinação do lodo seco (C1), por meio do biogás, é 42% mais elevado em comparação com o cenário 2, em virtude de um maior volume a ser destinado em comparação às cinzas. O custo para a destinação das cinzas em aterro sanitário é 18% maior do que o da destinação agrícola.

Tabela 4: Custo para tratamento e destinação final do lodo e biogás (R\$/UF).

Etapas	CB		C1		C2		C3		
Lodo									
Desaguamento	Centrífuga	Aquisição	0,005525	Centrífuga	Aquisição	0,005525	Centrífuga	Aquisição	0,005525
		Energia consumida	0,001988		Energia consumida	0,001988		Energia consumida	0,001988
		Energia demanda	0,000497		Energia demanda	0,000497		Energia demanda	0,000497
		Polímero	0,001619		Polímero	0,001619		Polímero	0,001619
		Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106
		Total	0,023735		Total	0,023735		Total	0,023735
Higienização	EAP	Aquisição	0,013873	Secador rotativo com combustão	Aquisição	0,042577	Secador rotativo com combustão	Aquisição	0,052284
		Cal	0,006443		Energia consumida	0,013473		Energia consumida	0,013473
		Mistura (pá carregadeira) Cal+lodo	0,000937		Energia demanda	0,002443		Energia demanda	0,002443
					Produto químico	0,002815		Produto químico	0,002815
					Pessoal	0,014106		Pessoal	0,014106
		Total	0,021254		Total	0,075414		Total	0,085121
Destinação	Uso agrícola	Análises laboratoriais	0,000943	Uso agrícola	Análises laboratoriais	0,000943	Aterro sanitário	Transporte e disposição	0,002135
		Transporte	0,00386		Transporte	0,001435		Transporte	0,000560
		Lancer	0,001243		Lancer	0,000462		Lancer	0,000180
		Apoio agrônômico	0,000493		Apoio agrônômico	0,000183		Apoio agrônômico	0,000072
		Total	0,006539		Total	0,003024		Total	0,001754
Manutenção	Manutenção	0,010007	Manutenção	0,004528	Manutenção	0,006153	Manutenção	0,006153	
Biogás									
Biogás	0,000125	0	0	0					
TOTAL	0,06166	0,1067	0,116764	0,117144					

Ressalte-se que, para a escolha da melhor tecnologia de tratamento e destinação do lodo e biogás, devem ser incluídas na avaliação as outras dimensões da sustentabilidade: a dimensão social e a ambiental. Os resultados obtidos na ACV-A mostraram que o uso do biogás gerado nos reatores UASB para a secagem do lodo tem o potencial de reduzir os impactos ambientais em todas as categorias avaliadas. Com relação à ACV-S, o melhor desempenho foi referente ao cenário onde ocorre a combustão do lodo,

pois ocorre uma maior inertização do lodo e este apresenta-se com um maior potencial agrônômico (AMARAL et al., 2018; AMARAL et al., 2017).

4 CONCLUSÃO

O cenário base (lodo sendo higienizado por meio da EAP e destinado à agricultura) foi o cenário com o menor custo do ciclo de vida, porém apresentou o maior custo para a destinação do lodo.

A etapa que mais contribuiu foi o desaguamento em centrífuga, onde o custo com funcionários teve a maior representatividade.

O alto custo dos cenários 1, 2 e 3 foi em virtude do valor de aquisição do equipamento para a secagem do lodo, utilizando-se o biogás (C1) e o calor da combustão do lodo (C2 e 3). O custo de destinação do lodo no cenário 1 diminuiu 54%, e no cenário 2 diminuiu 73%, em comparação com o cenário base, em virtude do menor volume de lodo/cinza a ser destinado. O custo para a destinação das cinzas em aterro sanitário foi 18% maior do que o da destinação agrícola.

Cabe salientar a necessidade de reunir as 3 dimensões da sustentabilidade (ambiental, social e econômica) para a escolha da melhor tecnologia a ser empregada no gerenciamento do lodo e biogás. O cenário onde ocorre o aproveitamento do biogás para a secagem e higienização do lodo apresentou como o melhor cenário na avaliação ambiental. Para a avaliação social, o cenário da combustão do lodo apresentou-se como a melhor opção.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes pelo apoio recebido para o desenvolvimento deste trabalho, o apoio operacional daqueles que se envolveram com o presente estudo, em especial os colaboradores da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT - ETEs Sustentáveis).

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR-12209. **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2011.

AGEPAR - Agência Reguladora do Paraná. **Nota Técnica Final RTP - 01/2017. Primeira revisão tarifária periódica da SANEPAR**. 2017.

ALBRECHT. **Características principais do secador rotativo**. Disponível em: <http://www.albrecht.com.br/site/wp-content/uploads/2015/10/Bruthus2013curvas.pdf>. Acesso em 14/03/2019.

ALBRECHT. **Proposta Técnica/Comercial No 226/2017a**.

ALBRECHT. **Proposta Técnica/Comercial No 182/ 2017b**.

AMARAL, K. G. C. **Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV**. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2018.

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

AMARAL, K. G. C.; AISSÉ, M.M.; POSSETTI, G.R.C.; COSTA, F.J.O.G.; UGAYA, C.M.L. Análise de Ciclo de Vida Social inerente ao gerenciamento de lodo e de biogás em uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto. **Anais...** Congresso ABES/FENASAM, 2017.

ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2014.

AUSTRALIA BIOSOLIDS PARTNERSHIP. **Biosolids production and end use in Australia**. AUSTRALIAN WATER ASSOCIATION. Disponível em: <<http://www.biosolids.com.au/bs-australia.php>>. Acesso:05/04/2018.

BARÉA, P. B. **Desaguamento e higienização do lodo de esgotos sanitários: pré-dimensionamento e estimativas de custos de implantação**. 114f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06**. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução n. 375, de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial da União**, 2006.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental**. Brasília: ANA, 2017.

- CABRAL, B. G.; CHERNICHARO, C. A. L.; PLATZER, C. J.; BARJENBRUCH, M.; FILHO, P. B. Evaluation of Biogas Production and Energy Recovery Potential in 5 Full-Scale WWTPs with UASB Reactors. **Chemical Engineering and Chemical Process Technology** 3 (3): 1043, 2017.
- CABRAL, C. B. G.; CHERNICHARO, C. A. L.; HOFFMANN, H.; NEVES, P. N. P.; PLATZER, C.; BRESSANI, T. R.; ROSENFELDT, S. **Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios/Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) - Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.
- CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C. J.; POSSETTI, G.R.C.; LEITES, M. A. L.; ROSSETO, R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, 213 v 66, 2018. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.028>
- DAVIS, M.; COONY, R.; GOULD, S.; DALY, A. **Guidelines for life cycle cost analysis**. Stanford University, Stanford, 2005.
- DHILLON, B. S. **Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications**. Ontario: Routledge, 2013.
- DUARTE, O.A.; PAULA, A.C.; CANTÃO, M.P.; AISSE, M.M.; POSSETTI, G. R. C. Avaliação da vazão de biogás produzido em reator anaeróbio do tipo uasb, mensurado por medidores do tipo vórtex e dispersão térmica. Curitiba, Brasil. **Anais...** Curitiba, Brasil: XIV Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2018.
- HUPPES G.; VAN ROOIJEN M.; KLEIJN R.; HEIJUNGS R.; DE KONING A.; VAN OERS L. **Life Cycle Costing and the environment. Report of a Project Commissioned by The Ministry of VROM-DGM**, 2004.
- KAMINSKI, G. F.; WAGNER; L. G.; SILVA, F. O. M.; POSSETTI, G. R. C. Análise crítica acerca da aplicação de queimadores enclausurados em ETEs para destruição de biogás. In: 3º Simpósio MAUI Brasil – Alemanha, 2018, Curitiba, Brasil. **Anais...** Curitiba, Brasil: Universität Stuttgart, UFPR, SENAI e ABES-PR, 2018.
- KOGA, P. **Balanco de massa e energia na ETE Padilha**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial). Universidade Federal do Paraná, 2016.
- LIM, S.; PARK; D.; PARK, J.M. Environmental and economic feasibility study of a total wastewater treatment network system. **Journal of Environmental Management** 88, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.022>
- LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C.A.L.; SOUZA, C.L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science & Technology**, 66, 12, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.514>
- METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering: Treatment and Reuse**. 5 ed. McGraw Hill, Nova York, 2016.
- NGUYEN, T.A.; KURODA, K.; OTSUKA K. Inclusive Impacts Assessment for the Sustainability of Vegetable Oil-based Biodiesel - Part I: Linkage Between Inclusive Impact Index and Life Cycle Sustainability Assessment. **Journal of Cleaner Production**, 166, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.059>
- NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. L.; GUE-RECA, L.P.; HERNANDEZ-PADILLA, F. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. **Clean - Soil, Air, Water**, 40 (9), 926–932, 2012. <https://doi.org/10.1002/clen.201100707>
- ONG, H.C.; MAHLIA, T.M.I.; MASJUKI, H.H.; HONNERY, D. Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. **Fuel** 98, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.031>
- PARANÁ. **Resolução nº 21**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). Diário Oficial do Estado, 2009.
- PARANÁ. **Resolução nº 16**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). Diário Oficial do Estado, 2014.
- PAULA, A.C. **Avaliação integrada do desempenho de reatores anaeróbios do tipo UASB tratando esgoto doméstico em escala real**. Dissertação. 219f. (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2019.
- POSSETTI, G.R.C.; RIETOW, J.C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C.A.; CARNEIRO, C. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. **Anais...** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.
- PRESSINOTTI, F.; SILVA, J. M. **Aspectos Construtivos de Reatores Tipo UASB e Aproveitamento Energético do Biogás**. Apostila de curso. Curitiba, 2015.
- PROBIO 1.0: **Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB**. Disponível em: site.sanepar.com.br/probio/probio.zip.
- ROSS, B. Z. L. **Escuma de reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos: produção, caracterização e disposição final**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Universidade Federal do Paraná. 2015.
- SILVEIRA, B.; CHERNICHARO, C. A. L.; CABRAL, C. B. G.; SUIDEDOS, C.; PLATZER, C.; SILVA, G.; POSSETTI, G. R. C.; HOFFMANN, H.; MOREIRA, H. C.; ADAMATTI, H. B.; MIKI, M.; SILVA, M.; TAKAHASHI, R.; MIKI, R.; ROSENFELDT, S.; ARAÚJO, V. S. F.; VALENTE, V. B.; VILLANI, W. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto/Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.
- TRAVERSO, M.; FINKBEINER, M.; JØRGENSEN, A.; SCHNEIDER, L. Life Cycle Sustainability Dashboard. **Journal of Industrial Ecology**, 16 (5), 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00497.x>
- UNEP/SETAC. **Towards a Life Cycle Sustainability Assessment**. UNEP/SETAC Life-Cycle Initiative, 2011.
- ZORTEA, R. B. **Avaliação da Sustentabilidade do Biodiesel da Soja no Rio Grande do Sul: uma abordagem do ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.