

# Ferramenta computacional para gestão da recuperação energética e da pegada de carbono em estações de tratamento de esgoto baseadas em reatores anaeróbios

*Computational tool for managing energy recovery and carbon footprint in sewage treatment plants based on anaerobic reactors*

Fábio José Bianchetti<sup>1\*</sup> , Carlos Augusto de Lemos Chernicharo<sup>2</sup> , Emanuel Manfred Freire Brandt<sup>3</sup> , Henrique Alves Santos<sup>2</sup> 

## RESUMO

Estações de tratamento de esgoto (ETE) com processos anaeróbios estão consolidadas na América Latina. Suas diversas características favoráveis tornam-nas uma opção atrativa para regiões de clima quente, mas existem ainda restrições, como as relacionadas às emissões gasosas difusas. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou o desenvolvimento da ferramenta computacional Balanço de Energia e Carbono em ETE Anaeróbias (BECarbonO), com base na compilação, em planilha eletrônica, de equações e coeficientes da literatura especializada, que permite comparar diferentes cenários e alternativas tecnológicas para o manejo de emissões gasosas em ETE que empregam reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). Possibilita-se assim que projetistas e tomadores de decisão avaliem aspectos de recuperação de energia e gestão da pegada de carbono. Por fim, apresenta-se um estudo de caso fictício com três cenários cujos resultados apontam para a possibilidade de redução da pegada de carbono total da ETE em 82% se comparada à configuração normalmente adotada no Brasil.

**Palavras-chave:** UASB; biogás; lodo.

## ABSTRACT

Sewage treatment plants (STPs) with anaerobic processes are consolidated in Latin America. Their several favorable characteristics make them an attractive option for regions with a hot climate, but there are still restrictions, such as those related to diffuse gaseous emissions. In this context, the present work aimed at developing the computational tool Energy and Carbon Balance in Anaerobic STPs (BECarbonO), based on the compilation, in a spreadsheet, of equations and coefficients from the specialized literature, which allows comparing different scenarios and technological alternatives for the management of gaseous emissions in STPs based on upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB). This should enable designers and decision makers to assess aspects of energy recovery and carbon footprint management. Finally, a fictitious case study is presented with three scenarios whose results point to the possibility of reducing the total carbon footprint of the STP by 82% compared to the configuration normally adopted in Brazil.

**Keywords:** UASB; biogas; sludge.

## INTRODUÇÃO

Estações de tratamento de esgotos (ETE) com processos anaeróbios, especialmente os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), estão consolidadas na América Latina. No Brasil, em 2017, tais processos figuravam

em 67% das ETE e os UASB em 38%, atendendo, respectivamente, 42 e 30% da população urbana (71,7 e 51,2 milhões de habitantes). Diversas características desses processos tornam-nos uma das melhores alternativas tecnológicas disponíveis para o tratamento de esgoto em regiões de clima quente, com baixos

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Ringgold Standard Institution – Curvelo (MG), Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Ringgold Standard Institution – Belo Horizonte (MG), Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora, Ringgold Standard Institution – Juiz de Fora (MG), Brasil.

\*Autor correspondente: [fabiobianchetti@cefetmg.br](mailto:fabiobianchetti@cefetmg.br)

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

**Financiamento:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

**Recebido:** 19/04/2022 – **Aceito:** 03/03/2023

requisitos de área, energia e complexidade operacional, mas existem algumas restrições, como as emissões difusas de metano ( $\text{CH}_4$ ) (CHERNICHARO *et al.*, 2015; BRASIL, 2017).

O  $\text{CH}_4$  compõe de 70 a 81% do volume do biogás de reatores UASB, é inflamável, possui alto valor combustível, poder calorífico ( $\text{CH}_4$  puro) de 35,9 MJ.  $\text{Nm}^{-3}$  e é um dos principais gases de efeito estufa (GEE), com potencial de aquecimento global (GWP) 28 vezes maior que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Embora seu desprendimento da fase líquida seja o principal mecanismo para a reciclagem do carbono orgânico pela digestão anaeróbia, sua formação não completa o ciclo do carbono, devendo ainda ser oxidado a  $\text{CO}_2$ , biologicamente ou por combustão, para que esteja disponível para reciclagem pela fotossíntese. Ressalta-se que as emissões de  $\text{CO}_2$  biogênicas (modernas) são consideradas neutras para o esgoto sanitário (CHERNICHARO, 2007; LOBATO, 2011; IPCC, 2015; 2019; BRASIL, 2016; METCALF; EDDY, 2016).

Outro ponto de preocupação reside na possibilidade de dessorção do metano dissolvido ( $\text{CH}_4\text{-D}$ ) na fase líquida, originando emissões de GEE e perdas de potencial energético, em razão do elevado teor de  $\text{CH}_4\text{-D}$  no efluente (da ordem de 50% do potencial do biogás) (SOUZA, 2010). Entre as medidas mitigadoras abordadas na literatura, citam-se: confinamento das unidades e exaustão dos gases, remoção dos gases dissolvidos na massa líquida em condições controladas, devendo ambas as práticas receber posterior tratamento e recuperação do  $\text{CH}_4\text{-D}$  para aproveitamento energético conjunto ao biogás. Algumas das técnicas de dessorção atualmente viáveis são: câmaras de dessorção sem e com enchimento (CD) (60 e 85% de eficiência); câmara de vácuo (40 a 80% de eficiência); e contactores de membranas desgaseificadoras (CMD) (50 a 98% de eficiência). Destaca-se que as duas últimas permitem, quando da geração de corrente residual com baixa diluição do  $\text{CH}_4$ , sua recuperação para incremento ao biogás para fins de aproveitamento energético. Para tratamento, recomendam-se biofiltração e biopercolação (eficiências superiores a 90%), bem como destruição térmica (eficiência de 10 a 53% em queimadores abertos e de 98 a 100% em queimadores fechados) (BRANDT *et al.*, 2021).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) de diferentes tipologias de ETE e manejo de subprodutos nas condições brasileiras demonstrou que alternativas como o uso do biogás para caldeiras ou secagem e higienização térmicas do lodo, e do lodo como biofertilizante, são potencialmente causadoras de impacto ambiental negativo muito menor do que as rotas convencionais de combustão do biogás em queimadores e de envio do lodo para aterro sanitário (GUTIERREZ, 2014; AMARAL, 2018). Nesse contexto, embora os reatores anaeróbios cada vez mais venham se firmando como opção para o tratamento de esgotos, se suas particularidades, como a problemática das emissões gasosas, não forem corretamente administradas, eles poderão comprometer a aceitação e consequente ampliação de seu uso.

A ACV é uma técnica de gestão ambiental robusta e consolidada, que permite identificar os possíveis impactos associados a um produto ou serviço em seus diversos estágios, levantando e quantificado a energia e os materiais necessários (entradas) e os resíduos e emissões liberados ao meio ambiente (saídas) (AMARAL, 2018). Entretanto, sua aplicação demanda tempo, programas computacionais e bancos de dados especializados, por vezes pagos, o que pode inviabilizar a avaliação quando se objetiva uma análise simplificada, que permita comparar várias alternativas de concepção e operacionais de forma expedita, e com foco apenas na emissão de GEE e no balanço energético da ETE. No contexto dessa lacuna, propôs-se o desenvolvimento de uma ferramenta

com essa concepção simplificada, apropriada para aplicação em estudos preliminares e pré-seleção de alternativas anteriores à realização da ACV ou, ainda, quando se objetiva uma resposta mais imediata no dia a dia da gestão da ETE.

Isto posto, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento da ferramenta computacional Balanço de Energia e Carbono em ETE Aneróbias (BECarbon0), para avaliação da formação e emissão de  $\text{CH}_4$  em reatores UASB que tratam esgotos sanitários (linha de biogás, compartimento de decantação e no efluente) e a pegada de carbono resultante do controle de emissões fugitivas e do aproveitamento energético do biogás e lodo (térmico e eletricidade).

## METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa analítica, quantitativa, alicerçada no método hipotético-dedutivo, que utiliza as técnicas: pesquisa bibliográfica, documental e experimental e estudos de caso, estas duas últimas na forma de simulações computacionais de três cenários. Para a consecução da pesquisa a metodologia foi dividida em duas etapas distintas, a citar: desenvolvimento da ferramenta computacional, e; simulação comparativa de diferentes cenários.

### Desenvolvimento da ferramenta computacional

Com base em pesquisa bibliográfica, foram levantadas as principais rotas, atualmente empregadas ou com potencial de aplicação no futuro, para o gerenciamento dos subprodutos sólidos (lodo) e gasosos (biogás, gases dissolvidos e emissões fugitivas) do tratamento anaeróbio por parte da ETE (Quadro 1), e foram estabelecidos os parâmetros a serem calculados pelas equações e coeficientes (Quadro 2), os quais foram implementados em uma planilha eletrônica. Para mais detalhes sobre as alternativas adotadas consultar Bianchetti *et al.* (2021). A definição do pós-tratamento determina aspectos referentes à demanda energética e à produção de lodo.

A base de consulta foi composta de trabalhos acadêmicos, normas técnicas, documentos de área, bases de dados, entre outros. Com relação aos trabalhos acadêmicos, à exceção de parâmetros clássicos, foram priorizados trabalhos revisados por pares, obtidos via base de pesquisa do Periódicos Capes e publicados preferencialmente nos últimos cinco anos. Para as normas técnicas, publicações e bancos de dados de entidades especializadas, foram consideradas sempre as versões mais recentes disponíveis.

No Quadro 3 são apresentadas as principais equações pertinentes ao presente artigo, agrupadas conforme grupos de parâmetros a serem estimados/avaliados, a citar: emissões residuais/ fugitivas provenientes do decantador; emissões residuais/ fugitivas provenientes do efluente tratado; produção de biogás e emissões por meio de sua queima e/ou reaproveitamento; pegada de carbono resultante do transporte do lodo; pegada de carbono total da ETE; e recuperação energética. Os principais coeficientes predefinidos pertinentes ao presente artigo, com faixas de valores típicos, relativos à geração, prevenção, controle, tratamento e/ou aproveitamento de gases e lodo, os quais permitem a predição da produção dos subprodutos e dos impactos das decisões de gerenciamento, são apresentados na Tabela 1. Para a relação completa de equações e coeficientes, consultar Bianchetti (2022).

### Simulação de aplicação da ferramenta BECarbon0

Para apresentar os potenciais da ferramenta BECarbon0 e permitir analisar a influência de algumas das técnicas nela disponíveis na gestão dos subprodutos

**Quadro 1 - Técnicas previstas na ferramenta para manejo da fase líquida, de emissões fugitivas, aproveitamento do biogás e gestão do lodo em função do porte da estação de tratamento de esgoto.**

Objetivo	Técnica disponível em função do porte populacional da ETE		
	Pequeno (2.000 a 10.000 hab.)	Médio (10.000 a 100.000 hab.)	Grande (> 100.000 hab.)
Pós-tratamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reatores aeróbios de biofilme (ex. filtro biológico percolador - FBP)</li> <li>Sistemas com baixa geração de lodo (ex. <i>wetlands</i> construídos, lagoas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reatores aeróbios energointensivos (ex. lodos ativados)</li> <li>Reatores aeróbios de biofilme (ex. FBP)</li> <li>Sistemas com baixa geração de lodo (ex. <i>wetlands</i> construídos, lagoas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reatores aeróbios energointensivos (ex. lodos ativados)</li> <li>Reatores aeróbios de biofilme (ex. FBP)</li> <li>Sistemas com baixa geração de lodo (ex. <i>wetlands</i> construídos, lagoas)</li> </ul>
Manejo do biogás	<ul style="list-style-type: none"> <li>Queimador aberto</li> <li>Queimador enclausurado</li> <li>Desinfecção do lodo</li> <li>Cocção</li> <li>Aquecimento de água</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Queimador aberto</li> <li>Queimador enclausurado</li> <li>Desinfecção do lodo</li> <li>Secador térmico</li> <li>Produção de vapor</li> <li>Motor CHP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Queimador aberto</li> <li>Queimador enclausurado</li> <li>Secador térmico</li> <li>Produção de vapor</li> <li>Motor CHP</li> <li>Combustível veicular</li> </ul>
Manejo do CH <sub>4</sub> dissolvido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Câmara de dessorção simplificada (remoção)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Câmara de dessorção simplificada (remoção)</li> <li>Câmara de dessorção com enchimento (remoção)</li> <li>Contactores de membranas/ Câmaras a vácuo (remoção ou recuperação)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Câmara de dessorção simplificada (remoção)</li> <li>Câmara de dessorção com enchimento (remoção)</li> <li>Contactores de membranas/ Câmaras a vácuo (remoção ou recuperação)</li> </ul>
Tratamento do CH <sub>4</sub> removido/ recuperado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biofiltro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biofiltro</li> <li>Manejo conjunto com o biogás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biofiltro</li> <li>Manejo conjunto com o biogás</li> </ul>
Emissões decantador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem controle</li> <li>Com controle (captura, exaustão e tratamento em biofiltro)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem controle</li> <li>Com controle (captura, exaustão e tratamento em biofiltro)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem controle</li> <li>Com controle (captura, exaustão e tratamento em biofiltro)</li> </ul>
Manejo do lodo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitos de secagem + aterro sanitário</li> <li>Tratamento térmico + uso agrícola</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitos de secagem ou centrífuga + aterro sanitário</li> <li>Leitos de secagem ou centrífuga + tratamento térmico + aterro sanitário ou uso agrícola</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Centrífuga + aterro sanitário</li> <li>Centrífuga + tratamento térmico + aterro sanitário ou uso agrícola</li> </ul>

CHP: *combined heat and power* (calor e energia combinados).

**Quadro 2 - Parâmetros a serem calculados com base em equações e coeficientes componentes do modelo proposto.**

Grupo	Parâmetro	Finalidade
Esgoto	Vazão afluente	Cálculo de subprodutos e coeficientes unitários
Biogás	Produção de biogás	Informação quantitativa ao usuário, definição de equipamentos
	Produção de CH <sub>4</sub>	Informação quantitativa ao usuário, cálculo do potencial energético, definição de equipamentos, análise da pegada de carbono
	Teor de CH <sub>4</sub>	Informação qualitativa ao usuário, viabilidade do aproveitamento energético
Decantador	Emissão de CH <sub>4</sub> (com e sem tratamento)	Informação quantitativa ao usuário, análise da pegada de carbono
Efluente reator	Carga de CH <sub>4</sub> -D	Estimativa de emissões (controladas ou descontroladas), análise da pegada de carbono
	Emissão de CH <sub>4</sub> (com e sem tratamento)	Informação quantitativa ao usuário, análise da pegada de carbono
Lodo	Produção de lodo (em termos de sólidos secos e em diversas etapas do tratamento)	Informação quantitativa ao usuário, cálculo do potencial energético, definição de equipamentos, transporte, disposição, massa de cal evitada, massa de fertilizante N evitada, cálculo da pegada de carbono oriunda das emissões no transporte e do aterro
	Teor de sólidos/ Teor de umidade	Cálculo do volume de água e do potencial de tratamento térmico
Recuperação energética	Energia disponível CH <sub>4</sub> / lodo	Cálculo do potencial de recuperação energética, comparação com outras fontes
	Energia demandada das rotas	Cálculo do potencial de atendimento de cada opção
Pegada de carbono	Emissões das rotas do modelo	Cálculo da pegada de carbono produzida
	Emissões das fontes substituídas ou evitadas	Cálculo da pegada de carbono evitada

Fertilizante N: fertilizante nitrogenado.

e na pegada de carbono de uma ETE baseada em reatores anaeróbios, realizou-se simulação de aplicação. Esta foi feita mediante comparação da adoção de algumas das alternativas de manejo do biogás, emissões fugitivas, gases residuais e lodo disponíveis, para avaliação da melhor tecnologia, conforme as condições e critérios estabelecidos, visando alcançar níveis de desempenho mais avançados.

As alternativas de gestão dos subprodutos foram divididas em três cenários com distintas opções de aproveitamento de recursos. Em comum, todos os cenários consideram como tratamento secundário da fase líquida a combinação de reatores UASB com pós-tratamento por lodos ativados (LA), objetivando o atendimento aos padrões brasileiros de qualidade para o lançamento de esgotos em termos de matéria orgânica.

**Quadro 3 - Equações componentes do modelo para manejo de emissões fugitivas, aproveitamento do biogás e gestão do lodo (continua)**

Equações	Observações
<p><math>Dem_{elet} = Pop \times \frac{Cons_{pós\ trat}}{365 \frac{d}{ano}} + Cons_{out}</math></p> <p><math>E_{dem\ elet} = Dem_{elet} \times FE_{energia} \times \frac{365 \frac{d}{ano}}{1.000 \frac{g}{kg}}</math></p>	<p><math>Dem_{out}</math> = Demanda elétrica da ETE (kWhano)  <math>Pop</math> = População atendida pela ETE (hab)  <math>Cons_{pós\ trat}</math> = Consumo específico eletricidade p/ pós-tratamento aeróbio (kWhhab<sup>-1</sup>ano)  <math>Cons_{out}</math> = Outros consumos de eletricidade da ETE (kWhano)  <math>E_{dem\ elet}</math> = Pegada de carbono produção energia elétrica demandada p/ ETE (kgCO<sub>2</sub>eqano<sup>-1</sup>)  <math>FE_{energia}</math> = Fator de emissão do setor de energia (gCO<sub>2</sub>eqkW<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>)</p>
<p><b>Emissões residuais/ fugitivas de metano provenientes do decantador</b></p> <p><math>E_{CH_4\ dec} = Pop \times \frac{DQO_{per\ capita}}{1.000 \frac{g}{kg}} \times T_{CH_4\ dec} \times \left(1 - \frac{Ef_{CH_4\ biof}}{100}\right) \times 365 \frac{d}{ano} \times GWP_{CH_4}</math></p>	<p><math>E_{CH_4\ dec}</math> = Pegada de carbono proveniente do decantador (kgCO<sub>2</sub>eq. ano<sup>-1</sup>)  <math>DQO_{per\ capita}</math> = Contribuição <i>per capita</i> de matéria orgânica (gDQO hab.<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>)  <math>T_{CH_4\ dec}</math> = Taxa de emissão de metano proveniente do decantador (kgCH<sub>4</sub>.kgDQO<sup>-1</sup>)  <math>Ef_{CH_4\ biof}</math> = Eficiência de abatimento de metano por biofiltros (%)  <math>GWP_{CH_4}</math> = Potencial de aquecimento global do metano (28x a massa de CO<sub>2</sub>eq.)</p>
<p><b>Emissões residuais/ fugitivas de metano provenientes do efluente tratado</b></p> <p><math>CH_4\text{-}D_{mont} = Q_{ess} \times \frac{86.400 \text{ s/d}}{1.000 \frac{L}{m^3}} \times \frac{C_{CH_4\ D}}{1.000 \frac{g}{kg}}</math></p> <p><math>CH_4\text{-}D_{jus} = CH_4\text{-}D_{mont} \times \left(1 - \frac{Ef_{CH_4\ deess}}{100}\right)</math></p> <p><math>E_{CH_4\ D} = \left[CH_4\text{-}D_{jus} + CH_4\text{-}D_{mont} \times \left(\frac{Ef_{CH_4\ deess}}{100}\right) \times \left(1 - \frac{Ef_{CH_4\ biof}}{100}\right)\right] \times 365 \frac{d}{ano} \times GWP_{CH_4}</math></p> <p><math>Q_{st} = Q_{ess} \times \frac{86.400 \text{ s/d}}{1.000 \frac{L}{m^3}} \times \frac{Q_g}{Q_L}</math></p> <p><math>Q_{CH_4\ rec} = CH_4\text{-}D_{mont} \times \frac{Ef_{CH_4\ deess}}{100} \times \frac{R \times T}{P \times M} \times 1.000 \frac{g}{kg}</math></p>	<p><math>CH_4\text{-}D_{mont}</math> = Carga de metano dissolvido na saída do reator (kgCH<sub>4</sub>.d<sup>-1</sup>)  <math>Q_{ess}</math> = Vazão média afluente à ETE (L.s<sup>-1</sup>)  <math>C_{CH_4\ D}</math> = Concentração de metano dissolvido no efluente do UASB (gm<sup>-3</sup>)  <math>CH_4\text{-}D_{jus}</math> = Carga de metano após unidade de desorção (kgCH<sub>4</sub>.d<sup>-1</sup>)  <math>Ef_{CH_4\ deess}</math> = Eficiência da técnica de desorção de metano  <math>E_{CH_4\ D}</math> = Pegada de carbono CH<sub>4</sub>-D (kgCO<sub>2</sub>eq.ano<sup>-1</sup>) para o caso de unidades de desorção simplificadas ou com enchimento. Em caso de unidades avançadas para recuperação e aproveitamento energético do metano dissolvido, considerar apenas a carga de jusanite.  <math>Q_g/Q_L</math> = Relação gás-líquido (adimensional)  <math>Q_{CH_4\ rec}</math> = Vazão de metano recuperado (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.d<sup>-1</sup>) para o caso de unidades de desorção avançadas. Em caso de unidades simplificadas ou com enchimento, não há recuperação de metano e esta parcela será igual a 0.  <math>R</math> = Constante universal dos gases (8.205710<sup>-5</sup> atm.m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)  <math>T</math> = Temperatura nas condições padrão (273,15 K)  <math>P</math> = Pressão nas condições padrão (1 atm.)  <math>M</math> = Massa molar do metano (16 g.mol<sup>-1</sup>)</p>

Continua...

Quadro 3 - Continuação

Equações	Observações
<p>Produção de biogás e emissões resultantes de sua queima e/ou aproveitamento</p>	
$Q_{biogás} = Q_{esg} \times \frac{86.400 \text{ s/d}}{1.000 \text{ L/m}^3} \times \frac{q_{biogás}}{1.000 \text{ L/m}^3} + Q_{st} + Q_{CH_4,rec}$	<p><math>Q_{biogás}</math> = Produção de biogás (Nm<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>)  <math>Q_{CH_4}</math> = Produção unitária de biogás (NLm<sup>-3</sup>esg)  <math>Q_{CH_4}</math> = Produção unitária de metano no biogás (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.d<sup>-1</sup>)  <math>Q_{CH_4}</math> = Produção unitária de metano (NLCH<sub>4</sub>.m<sup>-3</sup>esg)  <math>\%_{CH_4}</math> = Teor de metano no biogás (% v/v)</p>
$Q_{CH_4} = Q_{esg} \times \frac{86.400 \text{ s/d}}{1.000 \text{ L/m}^3} \times \frac{q_{CH_4}}{1.000 \text{ L/m}^3} + Q_{CH_4,rec}$	<p><math>E_{queima biogás}</math> = Pegada de carbono proveniente da queima do biogás (kgCO<sub>2</sub>.eqano<sup>-1</sup>)</p>
$\%_{CH_4} = \frac{Q_{CH_4}}{Q_{biogás}} \times 100$	<p><math>\%_{biogásqueima}</math> = Fração do biogás direcionado para o queimador (%)  <math>Ef_{queim}</math> = Eficiência de destruição do metano pelo queimador (%)  <math>E_{ev,cauld/coc}</math> = Pegada de carbono evitada com o uso do biogás em caldeira ou para cocção (kgCO<sub>2</sub>.eqano<sup>-1</sup>)  <math>\%_{biogáscauld/coc}</math> = Fração do biogás direcionado para a caldeira ou para cocção (%)</p>
$E_{queima biogás} = \frac{\%_{biogásqueima}}{100} \times Q_{CH_4} \times \left(1 - \frac{Ef_{queim}}{100}\right) \times \frac{P \times M}{R \times T} \times \frac{1}{1.000 \text{ g/kg}} \times 365 \frac{d}{ano} \times GWP_{CH_4}$	<p><math>PCL_{CH_4kcal}</math> = Poder calorífico líquido do metano em kcal (kcal.m<sup>-3</sup>CH<sub>4</sub>)  <math>PCL_{GLP,kcal}</math> = Poder calorífico líquido do GLP em kcal (kcal.m<sup>-3</sup>GLP)  <math>FE_{GLP}</math> = Fator de emissão da combustão do GLP (kgCO<sub>2</sub>.eq.kW.h<sup>-1</sup>)  <math>E_{ev,banho}</math> = Pegada de carbono evitada c/ uso do biogás p/ aquecer água p/ banho (kgCO<sub>2</sub>.eqano<sup>-1</sup>)  <math>\%_{biogásbanho}</math> = Fração do biogás direcionado para aquecimento de água para banho (%)</p>
$E_{ev,cauld/coc} = \frac{\%_{biogáscauld/coc}}{100} \times Q_{CH_4} \times \frac{PCL_{CH_4kcal}}{PCL_{GLPkcal}} \times FE_{GLP} \times 365 \frac{d}{ano}$	<p><math>cp_{H_2O}</math> = Calor específico da água (kcal.kg<sup>-1</sup>.°C)  <math>T_{banho}</math> = Temperatura da água de banho (°C)  <math>T_{amb}</math> = Temperatura ambiente da água (°C)  <math>\rho_{H_2O}</math> = Massa específica da água (1 kg.L<sup>-1</sup>)  <math>Pot_{CH_4}</math> = Potência consumida do chuveiro elétrico (kW.h.L<sup>-1</sup>)  <math>FE_{energia}</math> = Fator de emissão do setor de energia (gCO<sub>2</sub>.eq.kW.h<sup>-1</sup>)  <math>E_{ev,CHP}</math> = Pegada de carbono evitada pelo uso do biogás em CHP (kgCO<sub>2</sub>.eqano<sup>-1</sup>)</p>
$E_{ev,banho} = \frac{\%_{biogásbanho}}{100} \times Q_{CH_4} \times \frac{PCL_{CH_4kcal}}{cp_{H_2O} \times (T_{banho} - T_{amb})} \times \rho_{H_2O} \times Pot_{CH_4} \times FE_{energia} \times \frac{365 \frac{d}{ano}}{1.000 \text{ g/kg}}$	<p><math>\%_{biogásCHP}</math> = Fração do biogás direcionado para o CHP (%)  <math>PCL_{CH_4kW}</math> = Poder calorífico líquido do metano em kW (kWh.m<sup>-3</sup>CH<sub>4</sub>)  <math>Ef_{ev,CHP}</math> = Eficiência de conversão elétrica do CHP (%)  <math>E_{ev,vec}</math> = Pegada de carbono evitada c/ uso do biogás como combustível veicular (kgCO<sub>2</sub>.eqano<sup>-1</sup>)</p>
$E_{ev,CHP} = \frac{\%_{biogásCHP}}{100} \times Q_{CH_4} \times PCL_{CH_4kW} \times \frac{Ef_{ev,CHP}}{100} \times FE_{energia} \times \frac{1}{1.000 \text{ g/kg}} \times 365 \frac{d}{ano}$	<p><math>\%_{biogásvec}</math> = Fração do biogás direcionado para combustível veicular (%)  <math>PCL_{GLPvec}</math> = Poder calorífico líquido do GNV em kcal (kcal.m<sup>-3</sup>GLP)  <math>FE_{GNV}</math> = Fator de emissão da combustão do GNV (kgCO<sub>2</sub>.eq. m<sup>-3</sup>GNV)</p>
$E_{ev,vec.} = \frac{\%_{biogásSvec}}{100} \times Q_{CH_4} \times \frac{PCL_{CH_4kcal}}{PCL_{GNVkcal}} \times FE_{GNV} \times 365 \frac{d}{ano}$	

Continua..

Quadro 3 - Continuação

Equações	Observações
$E_{transp. lodo} = \left[ \left( 1 - \frac{\%biogás_{sterm.}}{100} \right) \times \frac{SS_{per\ capita} \times Pop.}{C_{SS\ des.}} \times L_{aterro} \times 2 + \left( \frac{\%biogás_{sterm.}}{100} \right) \times \frac{SS_{per\ capita} \times Pop.}{C_{SS\ sterm.}} \times L_{sterm} \times 2 \right] \times \frac{1}{10^6\ g/t \times Cap_{transp}} \times FF_{transp.} \times 365\ \frac{d}{ano}$	<p><math>E_{transp. lodo}</math> = Pegada de carbono do transporte do lodo (kgCO<sub>2,eq</sub>.ano<sup>-1</sup>)  <math>\%biogás_{sterm.}</math> = Fração do biogás direcionado para secagem térmica (%)  <math>SS_{per\ capita}</math> = Geração per capita lodo seco (gSS.hab.<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>)  <math>C_{SS\ des.}</math> = Teor de sólidos após desidratação (%)  <math>Cap_{transp}</math> = Capacidade de carga do caminhão (t)  <math>L_{aterro}</math> = Distância do local de disposição final (km)  <math>L_{sterm}</math> = Distância do local de destino do lodo secado termicamente, aterro ou entrega de biossólidos (km)  <math>FF_{transp.}</math> = Fator de emissão do transporte de lodo (kgCO<sub>2,eq</sub>.veículo.<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>)  <math>C_{SS\ sterm.}</math> = Teor de sólidos após secagem térmica (%)  <math>L_{sterm}</math> = Distância do local de destino do lodo secado termicamente, aterro ou entrega de biossólidos (km)</p>
<p><b>Pegada de carbono</b></p> $E_{ETE} = (E_{CH_4,rec} + E_{CH_4,D} + E_{queima\ biogás} + E_{transp. lodo} + E_{demelet}) - (E_{ev.cuid/coc.} + E_{ev.banho} + E_{ev.chp} + E_{ex.veic.})$	<p><math>E_{ETE}</math> = Pegada de carbono total da ETE (kgCO<sub>2,eq</sub>.ano<sup>-1</sup>)</p>
<p><b>Recuperação energética</b></p> $ET_{per\ capita} = \left[ \left( \frac{\%biogás_{sterm.} + \%biogás_{vap}}{100} \times PCL_{CH_4,kcal} \times Q_{CH_4} \right) + \left( \frac{\%biogás_{sterm.}}{100} \times Q_{biogás} \times Gás_{exhaust} \times PCL_{gás_{exhaust}} \times \frac{E_{f,termchp}}{100} \right) \times \frac{365\ \frac{d}{ano}}{Pop. \times 1.000} \right]$ $ET_{volume} = \left[ \left( \frac{\%biogás_{sterm.} + \%biogás_{vap}}{100} \times PCL_{CH_4,kcal} \times Q_{CH_4} \right) + \left( \frac{\%biogás_{sterm.}}{100} \times Q_{biogás} \times Gás_{exhaust} \times PCL_{gás_{exhaust}} \times \frac{E_{f,termchp}}{100} \right) \times \frac{1.000\ L/m^3}{Q_{esg} \times 86.400\ s/d} \right]$ $EE_{per\ capita} = \frac{\%biogás_{sterm.}}{100} \times Q_{CH_4} \times PCL_{CH_4,kw} \times \frac{E_{f,elecchp}}{100} \times \frac{365\ \frac{d}{ano}}{Pop.}$ $EE_{volume} = \frac{\%biogás_{sterm.}}{100} \times Q_{CH_4} \times PCL_{CH_4,kw} \times \frac{E_{f,elecchp}}{100} \times \frac{1.000\ L/m^3}{Q_{esg} \times 86.400\ s/d}$	<p><math>ET_{per\ capita}</math> = Recuperação de energia térmica per capita (Mcal.hab.<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>)  <math>\%biogás_{vap}</math> = Fração do biogás para produção de vapor (%)  <math>E_{f,elecchp}</math> = Eficiência de conversão elétrica do CHP (%)  <math>Gás_{exhaust}</math> = Geração de exaustão no CHP (kg.m<sup>3</sup>.biogás)  <math>PCL_{gás_{exhaust}}</math> = Conteúdo de energia térmica no gás de exaustão (kcal.kg<sup>-1</sup>)  <math>E_{f,termchp}</math> = Eficiência de conversão térmica do CHP (%)  <math>ET_{volume}</math> = Recuperação de energia térmica por volume tratado de esgoto (Mcal.m<sup>-3</sup>.esgoto<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>)  <math>EE_{per\ capita}</math> = Recuperação de energia elétrica per capita (kWh.hab.<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>)  <math>EE_{volume}</math> = Recuperação de energia elétrica por volume tratado de esgoto (kWh.m<sup>-3</sup>.esgoto<sup>-1</sup>)</p>

ETE: estação de tratamento de esgoto; UASB: reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo; CHP: calor e energia combinados (combined heat and power); GLP: gás de petróleo liquefeito; CHP: calor e energia combinados (combined heat and power); GNV: gás natural veicular.

Tabela 1 - Coeficientes adotados no modelo matemático.

Coeficiente	Símbolo	Unidade	Valor	Referência
Contribuição <i>per capita</i> de DQO	$DQO_{per\ capita}$	gDQO.hab <sup>1</sup> .d <sup>1</sup>	108	von Sperling (2014)
Produção unitária de biogás	$Q_{biogás}$	NL.m <sup>3</sup> esgoto	85,6	Lobato, Chernicharo e Souza (2012)
Produção unitária de metano no biogás	$Q_{CH_4}$	NL.m <sup>3</sup> esgoto	64,2	Lobato, Chernicharo e Souza (2012)
Concentração de CH <sub>4</sub> dissolvido no efluente do reator UASB	$C_{CH_4,D}$	g.m <sup>3</sup>	20	Souza, Chernicharo e Melo (2012)
Taxa de liberação de CH <sub>4</sub> nos decantadores UASB	$T_{CH_4,dec}$	kgCH <sub>4</sub> .kgDQO <sub>af</sub> <sup>-1</sup>	0,00375	Souza (2010)
Poder calorífico líquido (PCL) metano	$PCL_{CH_4,kcal}$	kcal.m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	8.578	Moran <i>et al.</i> (2014)
PCL metano	$PCL_{CH_4,kW}$	kWh.m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	9,97	Moran <i>et al.</i> (2014)
PCL gás de petróleo liquefeito (GLP)	$PCL_{GLP,kcal}$	kcal.m <sup>3</sup> GLP	27.300	Hilsdorf <i>et al.</i> (2014)
PCL gás natural (GN)	$PCL_{GNV,kcal}$	kcal.m <sup>3</sup> GN	8.300	Hilsdorf <i>et al.</i> (2014)
Calor específico da água	$CP_{H_2O}$	kcal.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	1	Moran <i>et al.</i> (2014)
Consumo energético médio de um chuveiro elétrico (potência de 7500W)	$Pot_{chuv}$	kWh.L <sup>-1</sup>	5,0910 <sup>-4</sup>	INMETRO (2016)
Geração de gases de exaustão em CHP	$Gás_{exhaust}$	kg.m <sup>3</sup> biogas	3,2	Rosa <i>et al.</i> (2018)
Conteúdo de energia térmica dos gases de exaustão	$PCL_{gás_{exhaust}}$	kcal.kg <sup>-1</sup>	618,61	Rosa <i>et al.</i> (2018)
Efic. de conversão elétrica em CHP	$Ef_{eleCHP}$	%	30	USEPA (2007)
Efic. de conversão térmica em CHP	$Ef_{termCHP}$	%	40	USEPA (2007)
Geração de lodo seco <i>per capita</i> (UASB + lodos ativados)	$SS_{per\ capita}$	gSS.hab <sup>1</sup> .d <sup>1</sup>	26	Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001)
Teor de sólidos (TS) do lodo desidratado – leito de secagem	$C_{SS\ des.}$	%	35	Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001)
TS lodo desidratado – secador térmico	$C_{SS\ term.}$	%	80	Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001)
Efic. abatimento de CH <sub>4</sub> por biofiltros	$Ef_{CH_4,biof}$	%	90	Brandt (2016)
Efic. do queimador aberto	$Ef_{queim.}$	%	50	Leahey, Preston e Stroscher (2001)
Efic. unid. de dessorção simples	$Ef_{CH_4,dess}$	%	70	Glória <i>et al.</i> (2016)
Relação gás-líquido unid. des. simples	$Q_g/Q_L$	-	2	Souza <i>et al.</i> (2021)
Relação gás-líquido unid. dessorção por contactores de membranas	$Q_g/Q_L$	-	0,03	Centeno-Mora <i>et al.</i> (2021)
Efic. unid. dessorção por contactores de membranas – recuperação	$Ef_{CH_4,dess}$	%	50	Centeno-Mora <i>et al.</i> (2021)
Consumo específico de eletricidade para pós-tratamento aeróbio	$Cons_{pós\ trat}$	kWh.hab <sup>1</sup> .ano <sup>-1</sup>	14 a 20	von Sperling (2014)
GWP para o metano	$GWP_{CH_4}$	kgCO <sub>2eq</sub> .kg <sup>-1</sup> CH <sub>4</sub>	28	IPCC (2015)
Fator de emissão* equivalente de CO <sub>2</sub> para queima de GLP	$FE_{GLP}$	kgCO <sub>2eq</sub> .m <sup>3</sup> GLP	15071	USEPA (2014)
Fator de emissão* equivalente de CO <sub>2</sub> para queima de gás natural	$FE_{GNV}$	kgCO <sub>2eq</sub> .m <sup>3</sup> gás natural	1,96	USEPA (2014)
Fator de emissão* de CO <sub>2</sub> para produção de energia elétrica no Brasil	$FE_{Energia}$	gCO <sub>2eq</sub> .kWh <sup>-1</sup>	125	Brasil (2020)
Fator de emissão* equivalente de CO <sub>2</sub> para o transporte de lodo em caminhões	$FE_{transp.}$	kgCO <sub>2eq</sub> .veículo <sup>-1</sup> .km <sup>1</sup>	0,907	USEPA (2014)

DQO: demanda química de oxigênio; UASB: reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo; CHP: calor e energia combinados (*combined heat and power*); GWP: potencial de aquecimento global (*global warming potential*); \*os fatores de emissão nas publicações referem-se à emissão direta unitária de GEE.

O cenário 1 contempla a destruição do biogás em queimadores abertos, desidratação convencional do lodo visando ao transporte e disposição em aterro sanitário, alternativa tradicionalmente aceita como adequada para as ETE brasileiras, entretanto sem aproveitamento de recursos. O cenário 2 priorizou a gestão do lodo produzido e o fechamento de ciclos com seu beneficiamento

a biossólido, com base nos aproveitamento do biogás na secagem térmica do lodo até que fosse atingido teor final de sólidos da ordem de 90%. A produção excedente de biogás foi utilizada para a produção de eletricidade com o objetivo de suprir a demanda do secador térmico e diminuir a demanda do sistema de aeração do reator de LA. A seu turno, o cenário 3 priorizou a produção de

energia elétrica com o intuito de reduzir significativamente a demanda de energia externa para aeração do LA e, dessa forma, previu toda a utilização do biogás para a produção combinada de eletricidade e calor, sendo este último direcionado para a secagem térmica do lodo até o máximo teor de sólidos possível. Em semelhança ao cenário 2, a eletricidade produzida foi direcionada para o autossuprimento da ETE, com alimentação do secador térmico e redução de parte significativa da demanda do sistema de lodos ativados. Esses três cenários são apresentados no Quadro 4 e na Figura 1.

Para a avaliação, foram considerados os coeficientes apresentados na Tabela 1 (valores sugeridos como padrão, mas que podem ser alterados caso o usuário deseje) e adotados os seguintes parâmetros: população de projeto (Pop.) = 80.000 habitantes; quota *per capita* de esgoto ( $qpc_{\text{esgoto}}$ ) = 150 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>; taxa de contribuição por infiltração ( $T_{\text{inf}}$ ) = 0,1 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>; extensão de rede por habitante ( $L_{\text{rede per capita}}$ ) = 2 m.hab<sup>-1</sup>; distância de transporte do lodo: Laterro = 30 km (aterro sanitário), Lsterm = 15 km (ponto de entrega dos biossólidos); capacidade de carga do caminhão de transporte de lodo ( $Cap_{\text{transp}}$ ) = 12 t.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se na Tabela 2 os resultados numéricos, ao passo que na Figura 2 são apresentadas as pegadas de carbono totais para os três cenários estudados.

Com base nos resultados é possível observar que, para a configuração mais comum nas ETE brasileiras (combustão do biogás em queimador aberto, desidratação convencional do lodo com disposição final em aterro e nenhum controle de emissões fugitivas), representada pelo cenário 1, a gestão do biogás e lodo representa parcela significativa da pegada de carbono. Para as condições propostas na aplicação, tais emissões representaram cerca de 50% da pegada de carbono da ETE, corroborando os apontamentos apresentados por Gutierrez (2014). Outra fonte que contribuiu significativamente para a pegada de carbono da ETE foi a inexistência de controle das emissões de CH<sub>4</sub> resultantes dos gases dissolvidos no efluente, de 43%, confirmando os apontamentos de Souza (2010) e Centeno-Mora (2021).

As emissões fugitivas, especialmente as ocasionadas pela dessorção do metano dissolvido no efluente dos reatores anaeróbios, podem representar uma das mais significativas parcelas da pegada de carbono em ETE baseadas em reatores anaeróbios. Tais emissões, para o cenário 1, totalizaram

3.067 tCO<sub>2</sub>eq.ano<sup>-1</sup> (emissões fugitivas provenientes do efluente e decantador), representado 48% da pegada de carbono da condição típica das ETE brasileiras, nas quais o controle de emissões se restringe à queima do biogás em *flares* abertos. Entretanto, com a adoção de técnicas simples de dessorção, exaustão e tratamento das correntes residuais por biofiltração (cenário 2), tais emissões fugitivas de CH<sub>4</sub> do efluente e decantador decaem, respectivamente, para 37 e 10% das originais relativas ao cenário 1 (sem controle). Isso demonstra que as técnicas simplificadas de dessorção e posterior tratamento do metano dissolvido no efluente constituem eficaz mecanismo para a redução da pegada de carbono em ETE baseadas na tecnologia anaeróbia. Com relação aos gases dissolvidos do efluente, a adoção de técnicas avançadas de dessorção, tais como os contactores de membranas, proporciona pegada de carbono oriunda da dessorção do CH<sub>4</sub>-D do efluente da ordem de 50% da pegada relativa ao cenário sem controle, com a vantagem adicional de aumentar o potencial energético do biogás com a recuperação do CH<sub>4</sub>-D. Caso não se objetive o aproveitamento energético, tal redução da pegada de carbono poderia chegar a 98% (CENTENO-MORA, 2021).

Isso se deve ao fato de que, conforme demonstrado por Centeno-Mora (2021), a eficiência de dessorção em membranas aumenta à medida que se opera com maiores relações de vazões gás-líquido (Qg/QL); todavia, com o aumento da vazão de ar há diminuição do teor de CH<sub>4</sub> na corrente resultante, inviabilizando sua mistura com o biogás e consequente aproveitamento energético. No caso do cenário 3, caso o objetivo fosse, além do aproveitamento, obter maior redução da pegada de carbono proveniente das emissões descontroladas oriundas do efluente tratado, fazendo assim jus ao potencial das técnicas de contactores de membranas, poder-se-iam adotar duas unidades em série, a primeira com menor vazão de ar, visando ao aproveitamento energético, e a segunda com maior vazão de ar, para a remoção em níveis mais elevados do CH<sub>4</sub> remanescente da primeira unidade, objetivando diminuir a pegada de carbono desta fonte. Ressalta-se que tal funcionalidade ainda não é contemplada na atual versão da BECarbon0.

Para o cenário 1, foi considerada a eficiência de destruição do CH<sub>4</sub> no queimador aberto de 50%, o que representou pegada de carbono de 3.134 tCO<sub>2</sub>eq. ano<sup>-1</sup>. Caso fosse melhorada a eficiência de destruição ou sua troca para um queimador enclausurado com 98% de eficiência, a pegada de carbono resultante da combustão do biogás poderia representar 4% da estimada para as condições

**Quadro 4 - Cenários testados na aplicação da ferramenta BECarbon0.**

Manejo fase gasosa/ fase sólida	Cenários propostos – alternativas de manejo		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Pós-tratamento	Reatores aeróbios energointensivos (ex. lodos ativados)	Reatores aeróbios energointensivos (ex. lodos ativados)	Reatores aeróbios energointensivos (ex. lodos ativados)
Destinação/ aproveitamento do biogás	Queimador aberto	55% da produção estimada para secagem térmica do lodo e 45% para produção de eletricidade em CHP	100% da produção estimada para produção de eletricidade em CHP e aproveitamento dos gases de exaustão para tratamento térmico de parte do lodo
Emissões provenientes do compartimento de decantação	Sem manejo (emissões fugitivas)	Decantador fechado com exaustão + biofiltro	Decantador fechado com exaustão + biofiltro
Emissões provenientes dos gases dissolvidos no efluente	Sem manejo dos gases dissolvidos (emissões fugitivas)	Câmara de dessorção simplificada + biofiltro (gases residuais)	Contactores de membranas + biogás (recuperação do CH <sub>4</sub> -D)
Destinação/ aproveitamento do lodo	Leitos de secagem + aterro sanitário (TS = 35%)	Leitos de secagem + secagem térmica + biossólido (TS = 90%)	Leitos de secagem + secagem térmica + biossólido (TS = 47%).

CHP: calor e energia combinados (*combined heat and power*).



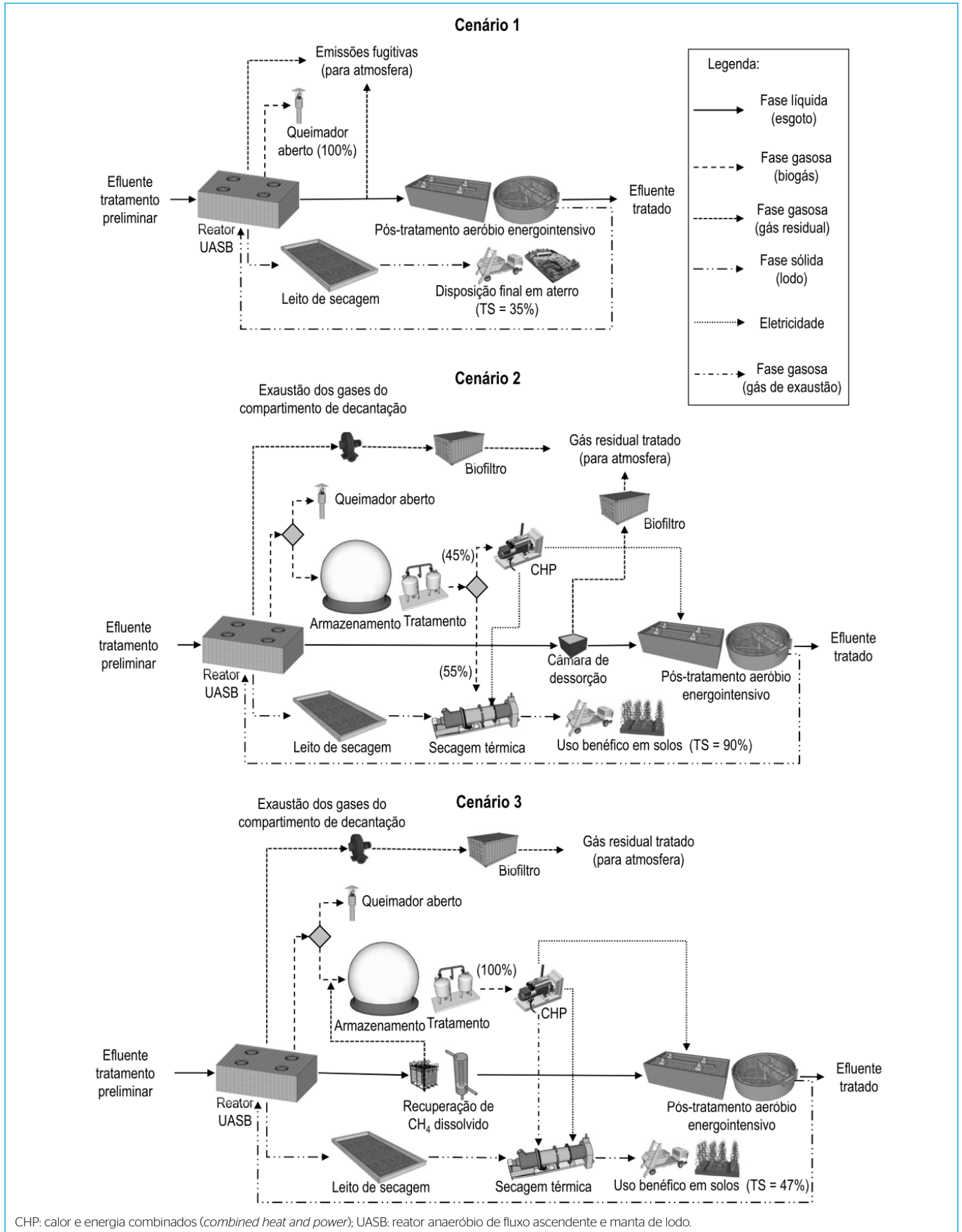
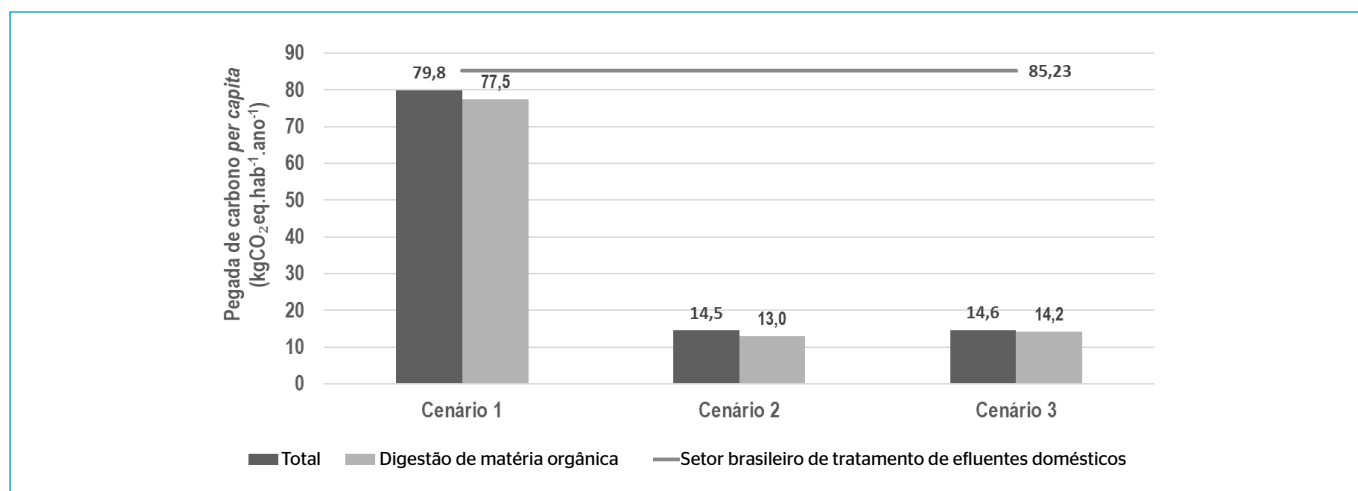


Figura 1 - Cenários testados na aplicação da ferramenta computacional

**Tabela 2 - Resultados numéricos das simulações para os três cenários estudados.**

Cenário	1	2	3
Vazão de esgoto - $Q_{\text{esgoto}}$ ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	13.382,4	13.382,4	13.382,4
Vazão de biogás - $Q_{\text{biogás}}$ ( $\text{Nm}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	1.145,5	1.145,5	1.774,6
Vazão de metano - $Q_{\text{CH}_4}$ ( $\text{Nm}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	859,2	859,2	1.046,6
Teor de metano no biogás (%V/V)	75	75	59
Parcela do lodo tratada termicamente	0%	100%	100%
Teor de sólidos do lodo para destinação final	35%	90%	47%
Pegada de carbono resultante das emissões fugitivas na combustão do biogás ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	3.134	0	0
Pegada de carbono proveniente da energia importada ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	170	118,3	30
Pegada de carbono proveniente do transporte do lodo ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	9,2	1,6	3,1
Pegada de carbono proveniente do lodo depositado em aterro ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0,8	0	0
Pegada de carbono evitada com o aproveitamento do biogás ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0	-178,1	-268,1
Pegada de carbono proveniente do compartimento de decantação ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	331,1	33,1	33,1
Pegada de carbono proveniente da dessorção dos gases dissolvidos no efluente ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	2.735,4	1.012,1	1.367,7
Pegada de carbono proveniente das emissões fugitivas do sistema de tratamento dos gases residuais ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0	172,3	0
Pegada de carbono total da ETE ( $\text{tCO}_2\text{eq}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	6.380,4	1.159,4	1.165,8
Pegada de carbono <i>per capita</i> ( $\text{kgCO}_2\text{eq}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	79,8	14,5	14,6
Pegada de carbono por volume de esgoto tratado ( $\text{kgCO}_2\text{eq}\cdot\text{m}^3\text{esgoto tratado}^{-1}$ )	1,3	0,2	0,2
Recuperação energética total na forma de calor ( $\text{Gcal}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0	1,5	0,6
Recuperação energética na forma de calor por volume de esgoto tratado ( $\text{Kcal}\cdot\text{m}^3\text{esgoto tratado}^{-1}$ )	0	302,9	120,8
Recuperação energética <i>per capita</i> na forma de calor ( $\text{Mcal}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0	18,5	7,4
Recuperação energética total na forma de eletricidade ( $\text{GWh}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0	0,5	1,0
Recuperação energética na forma de eletricidade por volume de esgoto tratado ( $\text{kWh}\cdot\text{m}^3\text{esgoto tratado}^{-1}$ )	0	0,1	0,2
Recuperação energética <i>per capita</i> na forma de eletricidade ( $\text{kWh}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	0	5,3	14,3

**Figura 2 - Gráficos da pegada de carbono *per capita* total e resultante da digestão da matéria orgânica, para os três cenários estudados.**

convencionais das ETE brasileiras. A melhoria das condições de destruição do metano por combustão, embora não propicie o aproveitamento de recursos, é uma simples e importante ação para a diminuição da pegada de carbono de ETE. Importante destacar que a eficiência de destruição do biogás dos queimadores abertos pode ser melhorada por meio da qualidade do equipamento (*design*, dispositivo de ignição, manutenção da chama, entre outros) e das condições

ambientais de instalação (exposição a ventos, chuvas etc.), não devendo tais equipamentos serem condenados como premissa.

A mudança da configuração mais comum nas ETE brasileiras para uma que permita o fechamento de ciclos e aproveitamento de recursos, seja com a secagem térmica do lodo para a produção de biossólidos, seja para a produção de eletricidade, além do controle de emissões fugitivas (dessorção, captura e

tratamento ou aproveitamento do gás residual), para as simulações realizadas, apontou para a redução de 82% da pegada de carbono da estação.

Como foi definida como destinação final do lodo nos cenários 2 e 3 sua conversão a biossólidos para uso benéfico em solos, como parâmetro de entrada, considerou-se sua distância de transporte igual à metade da distância do aterro no cenário 1. Assim, o impacto da pegada de carbono da tal prática de produção de biossólidos é dependente das características específicas de cada ETE, em virtude da distância do aterro e do ponto definido para a distribuição dos biossólidos (ponto de entrega ou retirada na ETE). Todavia, como apresentado por Amaral (2018), tais práticas propiciam menores impactos negativos ao longo do ciclo de vida da ETE sob as óticas ambiental e social.

## CONCLUSÕES

A disponibilidade de uma ferramenta que permita a simulação, de forma simplificada, de diferentes configurações para a gestão de subprodutos e emissões fugitivas em ETE baseadas em reatores UASB, com destaque ao aproveitamento energético e à avaliação da pegada de carbono resultantes, mostrou-se importante instrumento de comparação dos impactos resultantes de decisões de concepção.

Neste contexto, para as condições simuladas, evidenciou-se que ETE baseadas em processos anaeróbios contribuem para a emissão de GEE, especialmente pela ocorrência de emissões fugitivas, sobretudo do efluente tratado, e pela destruição parcial do  $\text{CH}_4$  nos queimadores. Tais emissões podem contribuir com 97% da pegada de carbono de uma ETE típica baseada em reatores UASB para as condições nacionais, a depender da eficiência de destruição dos queimadores e da distância de transporte do lodo a ser disposto.

Por outro lado, o adequado controle de emissões fugitivas e, especialmente, o aproveitamento do potencial energético do  $\text{CH}_4$  para uso interno ou externo mostraram-se eficazes mecanismos de redução da pegada de carbono da ETE, permitindo reduções da ordem de 80% das iniciais (configuração típica), e, com a produção *per capita* de 3,9 a 4,7  $\text{Nm}^3\text{CH}_4\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , a recuperação energética de cerca de

14,3  $\text{kWh}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  na forma de eletricidade ou de 18,5  $\text{Mcal}\cdot\text{hab}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  na forma de calor. A eficácia dessas medidas é especialmente válida quando da aplicação de práticas que permitam a recuperação da significativa parcela de  $\text{CH}_4$  dissolvida no efluente para aproveitamento energético e a redução do volume de lodo a ser transportado.

Importante destacar que a ferramenta BECarbon0 estima a pegada de carbono apenas da operação da ETE e manejo dos subprodutos, não sendo considerada a pegada de carbono da construção, fabricação de equipamentos e descomissionamento de seus elementos constituintes. Caso se objetive uma análise do ciclo de vida completo de uma ETE, recomenda-se a utilização de uma ACV. Ademais, a atual versão da BECarbon0 não considera na análise da pegada de carbono as emissões, resultantes do pós-tratamento aeróbio, de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), importante gás causador de efeito estufa que possui GWP equivalente a 273 vezes o potencial do  $\text{CO}_2$ . Por fim, a base de dados que alimenta os coeficientes predeterminados foi obtida por revisão de literatura feita com trabalhos que, por vezes, foram realizados em condições específicas, sendo recomendado ao usuário a substituição destes por outros obtidos por medições ou monitoramentos específicos da unidade para qual se desejar realizar as simulações. Dessa maneira, ressalta-se que os resultados e conclusões apresentados se restringem às configurações simuladas e aos valores de parâmetros e coeficientes considerados, sendo recomendados, na realização de avaliações futuras, além da citada utilização de dados próprios, a atualização e o aprofundamento dos estudos realizados, de forma a confirmar ou aprimorar o trabalho aqui relatado.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Bianchetti, E.J.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Escrita, Software – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Chernicharo, C.A.L.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Metodologia, Administração do Projeto, Supervisão, Validação, Escrita – Revisão e Edição. Brandt, E.M.F.: Conceituação, Curadoria de Dados, Metodologia. Santos, H.A.: Investigação, Software.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, K. G. C. *Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV*. 2018. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (org.). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001. 444 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6)
- BIANCHETTI, F. J. *Gerenciamento integrado de biogás e lodo em estações de tratamento de esgoto baseadas em reatores anaeróbios, com foco na recuperação de energia e na pegada de carbono*. 2022. 144f. Tese (Doutorado em Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- BIANCHETTI, F. J.; BRANDT, E. M. F.; SANTOS, H. A.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 7 - Emissão e compensação de gases de efeito estufa. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 2, p. 91-105, 2021.
- BRANDT, E. M. F. *Biofiltração e biopercolação de metano presente em gases residuais gerados em processos anaeróbios*. 2016. 196f. Tese (Doutorado em Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- BRANDT, E. M. F.; SOUZA, C. L.; CENTENO-MORA, E. J.; BIANCHETTI, F. J.; SANTOS, J. M. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 2, p. 5-22, 2021.
- BRASIL. *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília: Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2017. 88 p.

- BRASIL. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 5. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020. 71 p.
- BRASIL. *Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios*. Brasília: Ministério das Cidades, 2016. 50 p.
- CENTENO-MORA, E. J. *Use of membrane contactors for recovering dissolved methane from the effluent of uasb reactors treating sewage*. 2021. 230f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.
- CENTENO-MORA, E. J.; FONSECA, P. R. S.; BRANDT, E. M. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios - Nota Técnica 4 - Recuperação de metano dissolvido em efluentes de reatores anaeróbios por meio de contactores de membrana desgaseificadora. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 2, p. 49-62, 2021.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2007. v. 5. 380 p.
- CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; RIBEIRO, T. B. Anaerobic Sewage Treatment in Latin America. In: FANG, H. P.; ZHANG, T. (org.). *Anaerobic Biotechnology: environmental protection and resource recovery*. Londres: Imperial College Press, 2015. p. 263-296.
- GLÓRIA, R. M.; MOTTA, T. M.; SILVA, P. V. O.; COSTA, P.; BRANDT, E. M. F.; SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L. Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic effluents. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 33, n. 4, p. 713-721, 2016. <https://doi.org/10.1590/O104-6632.20160334s20150291>
- GUTIERREZ, K. G. *Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida*. 2014. 115f. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- HILSDORF, J. W.; BARROS, N. D.; TASSINARI, C. A.; COSTA, I. *Química tecnológica*. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). *Tabela de consumo de energia elétrica: chuveiros elétricos*. São Paulo: Inmetro, 2016.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2015. 151 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Quality assurance/quality control and verification. In: MAKSYUTOV, S.; EGGLESTON, S.; WOO, J. H.; FANG, S.; WITI, J.; GILLENWATER, M.; GOODWIN, J.; TUBEILLO, F.; MANNING, A.; OGLE, S.; RANGLES, C.; MAIONE, M.; WEITZ, M. M. (org.). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC, 2019.
- LEAHEY, D. M.; PRESTON, K.; STROSHER, M. Theoretical and Observational Assessments of Flare Efficiencies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 51, n. 12, p. 1610-1616, 2001. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464390>
- LOBATO, L. C. S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2011. 184f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- 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 and Technology*, v. 66, n. 12, p. 2745-2753, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.514>
- METCALF, L.; EDDY, H. P. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 8. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.
- ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; LOBATO, L. C. S.; SILVA, R. V.; PADILHA, R. F.; BORGES, J. M. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. *Renewable Energy*, v. 124, p. 21-26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.025>
- SOUZA, C. L. *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. 2010. 127f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. *Water, Science and Technology*, v. 65, n. 7, p. 1229-1237, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.854>
- SOUZA, C. L.; SANTO, B. C. E.; BRANDT, E. M. F.; SANTOS, J. M. B. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios - Nota Técnica 2 - Câmaras de dessorção para remoção de sulfeto de hidrogênio e metano dissolvidos em efluentes de reatores anaeróbios. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 2, p. 23-33, 2021.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies*. Washington, DC.: United States Environmental Protection Agency, 2007.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 2014.
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. v. 1. 472 p. (Princípio do tratamento biológico de águas residuárias).