

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## BALANÇO DE MASSA DE DQO PARA REATORES UASB MODIFICADO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO EM ESCALA PLENA

\* Ana Caroline de Paula Patulski <sup>1</sup>  
Orlando Antonio Duarte Hernández <sup>1</sup>  
Miguel Mansur Aisse <sup>1</sup>  
Gustavo Rafael Collere Possetti <sup>2</sup>

## COD MASS BALANCE FOR MODIFIED UASB REACTORS TREATING SANITARY SEWAGE ON A FULL SCALE

Recibido el 27 de febrero de 2020; Aceptado el 31 de enero de 2021

### Abstract

Anaerobic technology is widely used for treatment of sanitary sewage, specifically the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors. To control the performance of these reactors, the mass balance can be used, clarifying the routes of the organic material, assisting in the evaluation of the system efficiency, identifying the process output compounds and providing support in the approval of new methodologies. Therefore, the general objective of this study was to evaluate the COD mass balance, for modified UASB reactors, treating sanitary sewage on a full scale. For equating the mass balance, a characterization of the influent, effluent, sludge and biogas was carried out between July 2018 and November 2018. The results showed a percentage of 32.66 %, 24.24 %, 10.29 %, 4.56 % and 1.65 % for COD transformed into biomass and eliminated with the effluent, COD not transformed and eliminated soluble to the effluent, COD transformed into methane and present in the biogas, COD employed to reduce sulfate and COD transformed into biomass and maintained in the system, respectively.

**Keywords:** biogas, wastewater treatment plant (WWTP), real time measurement, dissolved methane.

---

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

<sup>2</sup> Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade, Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE-FGV) e Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), Brasil.

\*Autor correspondente: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Campus Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Bloco V, Jardim das Américas, Curitiba/PR, Brasil, CEP: 81.531-990. E-mail: [aanacarolinepaulaa@hotmail.com](mailto:aanacarolinepaulaa@hotmail.com)

## Resumo

A tecnologia anaeróbia é grandemente empregada para o tratamento do esgoto sanitário, especificamente os reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB). Para controlar a performance desses reatores, o balanço de massa pode ser utilizado, esclarecendo as rotas do material orgânico, auxiliando na avaliação da eficiência do sistema, identificando os compostos de saída do processo e fornecendo suporte na homologação de novas metodologias. Diante disso, o objetivo geral deste estudo foi avaliar o balanço de massa de DQO, para reatores UASB modificado, tratando esgoto sanitário em escala plena. Para equacionamento do balanço de massa, realizou-se entre os meses de julho de 2018 e novembro de 2018 uma caracterização do esgoto afluente, efluente, lodo e biogás. Os resultados apresentaram percentual de 32.66 %, 24.24 %, 10.29 %, 4.56 % e 1.65 % para DQO transformada em biomassa e eliminada junto ao efluente, DQO não transformada e eliminada solúvel ao efluente, DQO transformada em metano e presente no biogás, DQO empregue para redução do sulfato e DQO transformada em biomassa e mantida no sistema, respectivamente.

**Palavras chave:** biogás, estação de tratamento de esgoto (ETE), mensuração em tempo real, metano dissolvido.

## Introdução

No Brasil e em países da América Latina e Caribe, por conta das favoráveis condições climáticas e da baixa cobertura sanitária, os reatores anaeróbios, notadamente os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), vêm sendo muito utilizados para tratamento do esgoto doméstico. O que os torna vantajosos, quando comparado com lodos ativados, é a pouca formação de lodo, pequena área para instalação, produção de energia, por conta da formação de biogás, dentre outros (Chernicharo, 2011 e Noyola *et al.*, 2012, Ross *et al.*, 2016, Schneiders *et al.*, 2018).

Comumente, nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) que empregam sistemas anaeróbios, o parâmetro global utilizado como indicador de matéria orgânica é a Demanda Química de Oxigênio (DQO). No uso dessa tecnologia, 50 a 80 % do material orgânico total que alimenta o sistema é transformado em biogás, 5 a 15 % em biomassa (lodo) e de 10 a 30 % equivale ao material não transformado que sai do sistema junto ao esgoto efluente (Chernicharo, 2011). Assim, cada uma das parcelas mencionadas, podem ser determinadas por intermédio do balanço de massa.

O balanço de massa pode ser empregue na gestão das ETEs, podendo esclarecer as rotas do material orgânico dentro dos reatores, auxiliar na verificação da eficiência do processo, identificar os compostos de saída do sistema e fornecer suporte na homologação de novas metodologias (SEGHEZZO, 2004). Conforme apresentado na Equação 1, no cálculo do balanço de massa é imprescindível avaliar todas as rotas de transformação do material orgânico no sistema, desde aquelas transformadas em metano, reduzidas a sulfetos, convertidas em lodo, até aquelas perdas solubilizadas no efluente ou não convertidas (Lobato *et al.*, 2012).

$$DQO_{afl} = DQO_{efl_{sol}} + DQO_{lodo_{ret}} + DQO_{lodo_{efl}} + DQO_{CH_4_{biogás}} + DQO_{CH_4_{perdas}} + DQO_{sulf_{red}} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

$DQO_{afl}$ : massa diária de material orgânico no afluente;

$DQO_{efl_{sol}}$ : massa diária de material orgânico solubilizado no efluente;

$DQO_{lodo_{ret}}$ : massa diária de material orgânico transformado em biomassa e retido no sistema;

$DQO_{lodo_{efl}}$ : massa diária de material orgânico transformado em biomassa e eliminado junto ao efluente;

$DQO_{CH_4_{biogás}}$ : massa diária de material orgânico transformado em metano presente no biogás;

$DQO_{CH_4_{perdas}}$ : massa diária de material orgânico transformado em metano e eliminado dissolvido no efluente ou com o gás residual;

$DQO_{sulf_{red}}$ : massa diária de material orgânico usado por Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) na redução de sulfato.

Pesquisas conduzidas em escala piloto e de demonstração, realizadas por Souza (2010), apontaram percentuais de 14 a 24 % para o material orgânico solubilizado no efluente, 10 a 20 % para o transformado em biomassa e eliminado junto ao efluente, 8 a 10 % para o transformado em biomassa e mantido no sistema, 24 a 30 % para o transformado em metano presente no biogás, 16 a 18 % para o transformado em metano e eliminado dissolvido no efluente e 4 a 5 % para o utilizado na redução do sulfato.

Lobato *et al.* (2012) propuseram um modelo para realização do balanço de massa de DQO. O modelo matemático elaborado considerou três cenários (pior, típico e melhor) que acarretam em índices de recuperação de metano diferentes. O pior cenário contemplou elevadas concentrações de sulfato, baixa eficácia na remoção de matéria orgânica, e elevados índices de perdas de metano, conseqüentemente, a quantidade de metano disponível para uso, gerado pela conversão da DQO, foi menor. Já para o melhor cenário, que contemplou condições de entrada opostas, a quantia de metano disponível para utilização foi maior. Ainda assim, com o uso do modelo, do total de DQO afluente, entre 30 e 40 % foi eliminada solúvel ao efluente (40 % para a pior situação e 30 % para a melhor), 13 a 15 % foi convertida em lodo, 3 a 7 % foi utilizada para redução de sulfato, 11 a 17 % foi transformada em metano e eliminada dissolvida ao efluente e 19 a 39 % foi transformada em metano presente no biogás (Lobato *et al.*, 2012).

Destaca-se ainda que os elementos gasosos se solubilizam em meio líquido, seja em maior ou menor quantidade, fato este que prejudica a captura e o transporte para o local correto, visto que, os gases saem dissolvidos no efluente e/ou por meio de outra rota de desprendimento (Souza, 2010). A exemplo disso, Souza (2010) apresentou concentrações de metano dissolvido entre 17 e 21 mg.L<sup>-1</sup>, o que corresponde a mais de 30 % de todo o metano gerado no processo, Gervasoni e Cantão (2011) obtiveram concentrações de 10 mg.L<sup>-1</sup>, Nelting *et al.* (2017) de 8.5 mg.L<sup>-1</sup> e Agrawal, Harada e Okui (1997) e Keller e Hartley (2003) apresentaram perda de metano de 50 % e 14 %, respectivamente.

Diante do exposto, é notório que o balanço de massa de DQO pode ser aplicado como ferramenta de suporte no gerenciamento da performance dos reatores anaeróbios em ETEs. Além disso, como existem poucas pesquisas concernentes ao tema, sobretudo em escala plena, faz-se necessário o desenvolvimento de novos estudos. Destaca-se ainda que, por conta da existência de reatores anaeróbios do tipo UASB com diferentes concepções, espera-se um balanço de massa de DQO com resultados diversos, em consequência de cada tipologia.

Deste modo, o trabalho proposto teve por objetivo realizar uma avaliação do balanço de massa de DQO, para reatores UASB modificado, tratando esgoto sanitário, em escala plena, buscando detalhar os percentuais de transformação do material orgânico dentro do sistema, com base nas particularidades dos reatores.

## **Materiais e métodos**

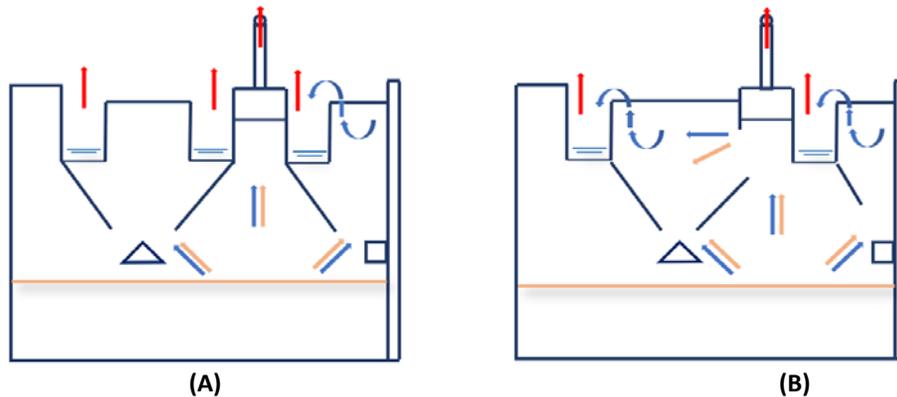
### Área de estudo

A ETE objeto de estudo está localizada na cidade de Curitiba no estado do Paraná. É uma estação de médio porte que atende cerca de 252.764 habitantes e possui vazão de projeto de  $0.44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (440 L.s<sup>-1</sup>), mas no momento atual trata em média  $0.32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (320 L.s<sup>-1</sup>).

É composta por tratamento preliminar com dois gradeamentos manuais de 10 e 5 cm, respectivamente, um gradeamento mecanizado de 6 mm, um desarenador do tipo Dorr-Oliver e uma calha *Parshall*.

Possui também seis reatores anaeróbios UASB modificado, para tratamento do efluente. Cada reator possui capacidade nominal de  $0.07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (70 L.s<sup>-1</sup>), área útil total de 94.5 m<sup>2</sup>, capacidade volumétrica de aproximadamente 2000 m<sup>3</sup> e tempo de detenção hidráulica (TDH) de aproximadamente 8 horas. Os reatores UASB modificado apresentam como particularidade um maior espaçamento entre o separador trifásico e a área de decantação, o que propicia a saída dos flocos flotados mais finos de lodo (ROSS, 2015). A Figura 1 ilustra importantes características dos reatores UASB tradicional e modificado.

A estação conta ainda com uma lagoa aerada mecanizada, com aproximadamente 14 aeradores e uma lagoa de decantação, ambas utilizadas para pós-tratamento do esgoto doméstico. O lodo é encaminhado ao desaguamento mecanizado, na sequência passa pela estabilização alcalina prolongada e por fim é destinado para uso agrícola. O biogás é destruído em queimadores enclausurados, com eficácia acima de 99 %.



**Figura 1.** Representação das diferenças entre os reatores tipo UASB: (A) Corte em perfil de um sistema de reator UASB tradicional; (B) Corte em perfil de um sistema de reator UASB modificado.

*Nota: setas azuis - sentido do efluente; setas laranja - sentido dos sólidos; e, setas vermelhas - sentido do gás.*

*Fonte: adaptado de Paula (2019).*

A fim de determinar o balanço de massa em termos de DQO, para os reatores UASB modificado, realizou-se uma caracterização do esgoto de entrada e saída da ETE, bem como do lodo e do biogás formados durante o tratamento, mensurando-se os parâmetros necessários para o cálculo. Com os resultados obtidos utilizou-se o equacionamento estabelecido por Souza (2010) para determinar as parcelas de transformações do material orgânico dentro do sistema.

#### Coleta e caracterização do esgoto

Todas as análises necessárias para o equacionamento do balanço de massa (DQO afluente, metano dissolvido, DQO efluente, DQO efluente filtrada, sulfato afluente, sulfato efluente, sólidos totais voláteis (STV) no lodo) foram realizadas em laboratório, em conformidade com as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). A análise de metano dissolvido foi realizada por cromatografia a gás.

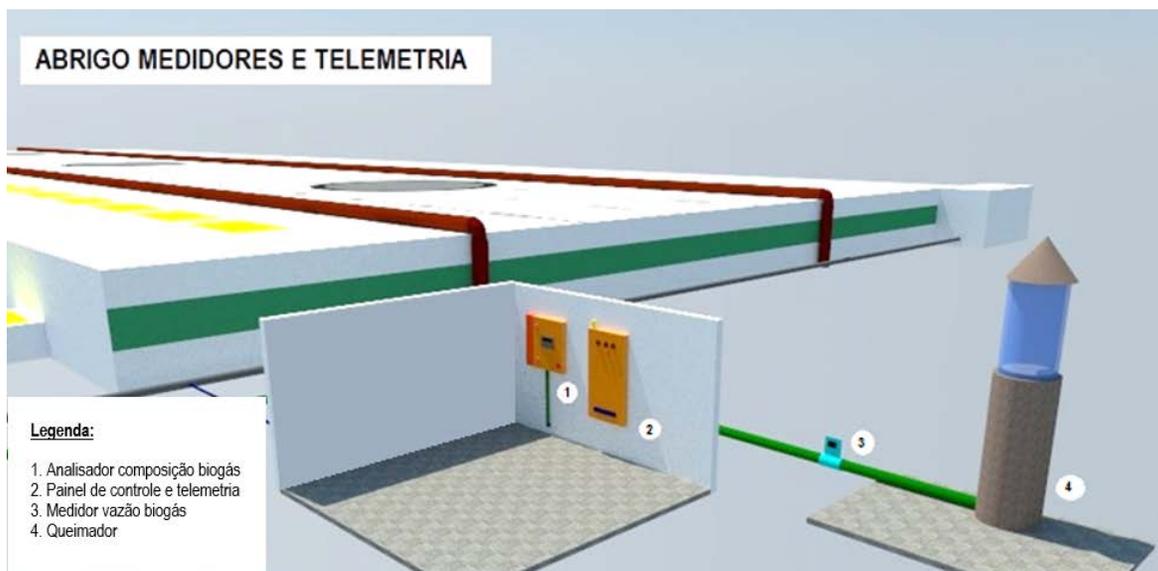
Para coleta do esgoto afluente e efluente utilizou-se dois amostradores automáticos, os quais foram instalados para coletarem amostras de 1.0 L a cada uma hora, durante três dias seguidos em uma semana, sendo que esse processo foi repetido entre os meses de julho de 2018 e novembro de 2018. As amostras foram removidas dos amostradores após um dia de coleta, retirando-se por vez, 24 amostras. Quanto à vazão de esgoto, a mesma foi obtida por meio de um medidor ultrassônico de vazão, marca Nivetec, modelo SPA 390, série Easy Treck, com resolução de  $\pm 0.2\%$  e saída com sinais analógicos padrão 4 – 20 mA, associado à calha *Parshall* da própria ETE.

A amostragem da fase sólida (manto de lodo) foi realizada 3 vezes ao dia, também durante uma semana, ao longo dos cinco meses de monitoramento. Foram utilizados os seis reatores para avaliação, sendo que primeiramente foi feita a coleta pontual em cada reator, e na sequência o lodo coletado foi misturado, objetivando uma amostra composta de todos os reatores da ETE.

Como os parâmetros DQO afluente, DQO efluente, DQO efluente filtrada e vazão de esgoto foram medidos 24 vezes ao dia, totalizaram 1.440 dados amostrados, já os outros parâmetros (sulfato afluente, sulfato efluente, metano dissolvido e STV no lodo), devido as suas peculiaridades, como realização imediata e necessidade de preservante, foram amostrados 3 vezes ao dia, totalizando 180 dados amostrados. Dessa forma, tem-se 1.575 dados amostrados para fase líquida e 45 para fase sólida.

#### Coleta e caracterização do biogás

Para caracterização do biogás utilizou-se um medidor de vazão por dispersão térmica e um medidor de qualidade, ambos foram alocados na tubulação de saída do biogás para os queimadores. A Figura 2 apresenta a posição desses instrumentos na ETE.



**Figura 2.** Representação esquemática do posicionamento dos equipamentos de medição da fase gasosa.

Fonte: Paula (2019).

Para determinação da vazão de biogás utilizou-se um medidor por dispersão térmica, da marca *Magnetrol*, modelo *Thermathel® TA2 Enhanced*, com resolução de  $\pm 1\%$  e faixa de medição entre 0.05 e 200  $\text{N.m}^3.\text{s}^{-1}$ . Esse medidor conta com uma sonda e sensores de temperatura, é resistente a corrosão e não possui partes móveis, o que simplifica sua instalação e manutenção. Para normalização das vazões de biogás em conformidade com as condições de Curitiba/PR foram instalados na linha de saída do gás, medidores de temperatura e pressão.

O medidor de vazão foi conectado a um *datalogger*, configurado para memorizar e arquivar os dados a cada 30 segundos. Como o dispositivo de armazenamento de dados possui entrada USB, a coleta dos resultados foi efetuada por meio da inserção de um instrumento compatível com a entrada.

Para determinação das concentrações dos principais compostos do biogás utilizou-se um medidor fixo de gases, denominado *BioControl*, da marca Sewerin, modelo *Multitec 545*, o qual mede metano e dióxido de carbono por meio do método infravermelho e sulfeto de hidrogênio e oxigênio pelo método eletroquímico.

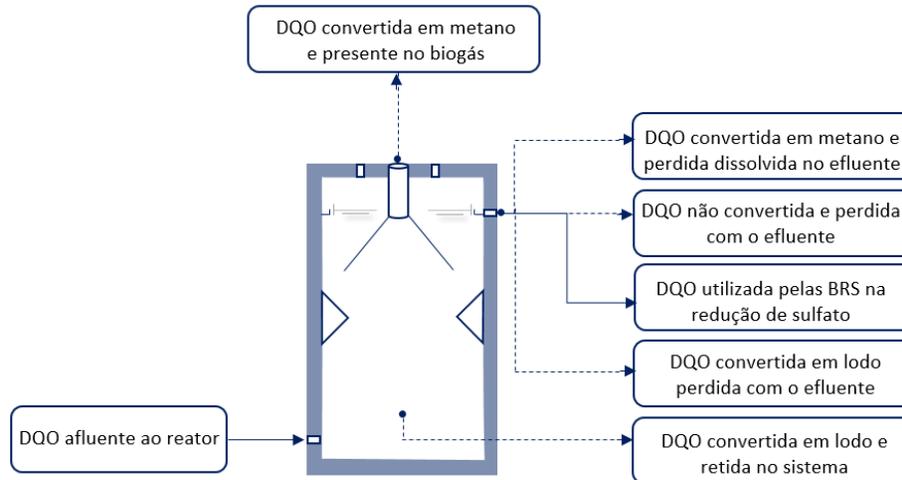
Esse medidor além de arquivar todos os dados na memória interna, forneceu os resultados instantaneamente na tela. Além disso, também foi conectado a um sistema de telemetria via *General Packet Radio Service* (GPRS), portanto, a cada 5 minutos os dados foram transmitidos e armazenados em uma plataforma *online* ([www.konvex-scada.com](http://www.konvex-scada.com)).

Diante disso, como as aferições foram efetuadas ao longo de três dias seguidos em uma semana e o método foi reproduzido durante os cinco meses de avaliação, tem-se 43.200 dados de vazão de biogás e 4.320 dados de cada componente do biogás, totalizando 60.480 resultados amostrados.

Maiores informações e detalhamentos sobre os materiais e metodologias utilizados para desenvolvimento da pesquisa, estão disponíveis em Paula (2019).

#### Equacionamento do balanço de massa

As parcelas do balanço de massa foram calculadas por meio do equacionamento apresentado por Souza (2010), sendo que foram utilizadas as médias diárias de cada parâmetro e alguns critérios foram ajustados em conformidade com as condições da ETE de estudo (Paula, 2019). Foram calculadas todas as parcelas exemplificadas na Figura 3.



**Figura 3.** Diagrama esquemático das parcelas de transformações do material orgânico calculadas no balanço de massa de reatores UASB modificado. Fonte: Paula (2019).

A massa diária de DQO afluyente ao reator foi calculada a partir da Equação 2.

$$DQO_{afluyente\ total} = Q_L \times DQO_{afluyente} \times 0,0864 \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

$DQO_{afluyente\ total}$ : massa diária de DQO afluyente ao reator ( $\text{kgDQO.d}^{-1}$ );

$Q_L$ : vazão de esgoto ( $\text{L.s}^{-1}$ );

$DQO_{afluyente}$ : concentração do material orgânico afluyente ao reator ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

0.0864: fator para conversão de unidades.

Para cálculo da massa diária de DQO transformada em metano e presente no biogás, empregou-se a Equação 3. Para estabelecer a densidade do metano, foi utilizada a Equação de Clapeyron, obtendo resultado de  $0.569 \text{ g.L}^{-1}$ , considerando que o estudo foi realizado em Curitiba/PR ( $T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $P_{atm} = 0,87 \text{ atm}$ ). Assim, por meio da densidade e da relação de transformação de DQO em metano de 4:1, obteve-se o coeficiente estequiométrico de  $2.276 \text{ g DQO.LCH}_4^{-1}$ .

$$DQO_{CH_4\ biogás} = Q_{biogás} \times CH_{4\ biogás} \times 2,276 \times 86,4 \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

$DQO_{CH_4\ biogás}$ : massa diária de DQO transformada em metano e presente no biogás ( $\text{kgDQO.d}^{-1}$ );

$Q_{biogás}$ : vazão de biogás ( $\text{N.L.s}^{-1}$ );

$CH_{4\ biogás}$ : concentração de metano presente no biogás (%);

$2.276 \text{ gDQO.LCH}_4^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $0.87 \text{ atm}$ : coeficiente estequiométrico;

86.4: fator para conversão de unidades.

A massa diária de DQO transformada em metano e dissolvida no efluente foi determinada por meio da Equação 4, considerando que 16 gramas de CH<sub>4</sub> produzido correspondem à remoção de 64 gramas de O<sub>2</sub> (DQO) (relação estequiométrica de 4.0 g DQO.1.0 gCH<sub>4</sub><sup>-1</sup>).

$$DQO_{CH_4 \text{ dissolvido}} = (Q_L \times CH_{4 \text{ dissolvido}} \times 4) \times 0,0864 \quad \text{Equação (4)}$$

Em que:

DQO<sub>CH<sub>4</sub> dissolvido</sub>: massa diária de DQO transformada em metano e dissolvida no efluente (kgDQO.d<sup>-1</sup>);

Q<sub>L</sub>: vazão de esgoto (L.s<sup>-1</sup>);

CH<sub>4</sub><sub>dissolvido</sub>: concentração de metano dissolvido no efluente (mg.L<sup>-1</sup>);

4.0 g DQO. 1.0 g CH<sub>4</sub><sup>-1</sup>: coeficiente estequiométrico;

0.0864: fator para conversão de unidades.

A massa diária de DQO não transformada e eliminada solúvel com o efluente foi calculada por meio da Equação 5.

$$DQO_{\text{efluente solúvel}} = Q_L \times DQO_{\text{efluente filtrada}} \times 0,0864 \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

DQO<sub>efluente solúvel</sub>: massa diária de DQO não transformada e eliminada solúvel junto ao efluente (kgDQO.d<sup>-1</sup>);

Q<sub>L</sub>: vazão de esgoto (L.s<sup>-1</sup>);

DQO<sub>efluente filtrada</sub>: concentração de matéria orgânica efluente filtrada (mg.L<sup>-1</sup>);

0.0864: fator para conversão de unidades.

A massa diária de DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato foi determinada conforme Equação 6, considerando que 96 gramas de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> reduzidas correspondem ao consumo de 64 gramas de O<sub>2</sub> (DQO) (relação estequiométrica de 1.0 g DQO.1.5 g SO<sub>4</sub><sup>2</sup>).

$$DQO_{\text{sulfato redução}} = \{Q_L \times [(SO_{4_1} - SO_{4_2}) \times (\frac{1}{1,5})] \times 0,0864 \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

DQO<sub>sulfato redução</sub>: massa de DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato (kgDQO.d<sup>-1</sup>);

Q<sub>L</sub>: vazão de esgoto (L.s<sup>-1</sup>);

SO<sub>4</sub><sub>1</sub>: concentração de sulfato afluente ao reator (mg.L<sup>-1</sup>);

SO<sub>4</sub><sub>2</sub>: concentração de sulfato efluente ao reator (mg.L<sup>-1</sup>);

1.0 g DQO. 1.5 g SO<sub>4</sub><sup>2</sup>: coeficiente estequiométrico;

0.0864: fator para conversão de unidades.

A Equação 7 foi empregue para cálculo da massa diária de DQO transformada em biomassa e retida no sistema.

$$DQO_{\text{lodo retido}} = \left[ \frac{(massa_{STV_{t_2}} - massa_{STV_{t_1}})}{t_2 - t_1} \right] \times 4,60 \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

$DQO_{\text{lodo retido}}$ : massa diária de DQO transformada em biomassa e retida no reator ( $\text{kgDQO}\cdot\text{d}^{-1}$ );

Massa $STV_{t_1}$ : massa de sólidos totais voláteis no lodo no tempo 1 ( $\text{kg STV}$ );

Massa $STV_{t_2}$ : massa de sólidos totais voláteis no tempo 2 ( $\text{kg STV}$ );

$t_1$ : tempo 1 (d);

$t_2$ : tempo 2 (d);

$4.60 \text{ gDQO}\cdot\text{gSTV}^{-1}$  (coeficiente calculado com base nos dados de DQO e STV da própria ETE).

A massa diária de DQO transformada em biomassa e eliminada junto ao efluente foi determinada por meio da Equação 8.

$$DQO_{\text{lodo efluente}} = Q_L \times (DQO_{\text{efluente total}} - DQO_{\text{efluente filtrada}}) \times 0,0864 \quad \text{Equação (8)}$$

Em que:

$DQO_{\text{lodo efluente}}$ : massa diária de DQO transformada em biomassa e eliminada com o efluente ( $\text{kgDQO}\cdot\text{d}^{-1}$ );

$Q_L$ : vazão de esgoto ( $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$DQO_{\text{efluente total}}$ : concentração matéria orgânica efluente ao reator ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );

$DQO_{\text{efluente filtrada}}$ : concentração de matéria orgânica efluente filtrada ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );

0.0864: fator para conversão de unidades.

### Tratamento e avaliação dos resultados

Para apresentação dos resultados do balanço de massa ao longo dos meses foram desenvolvidos gráficos no *software* Origin<sup>®</sup> Pro 8. Utilizaram-se gráficos *boxplot* para exibir as cargas diárias de DQO, apresentando todos os *outliers*, medianas, máximos, mínimos e quartis, também foram utilizados gráficos de barras, apresentando os percentuais das parcelas de conversão do material orgânico. Ademais, visando verificar a relação entre as variáveis utilizadas, por meio do *software* estatístico Minitab<sup>®</sup> 18, foram realizadas análises estatísticas de correlação por meio dos métodos de Spearman e Kendall Tau – b, sendo que ambos demonstraram resultados análogos. Destaca-se que essas metodologias não-paramétricas foram utilizadas pois os dados não seguiram uma distribuição normal, o que foi confirmado pela análise de Normalidade de Anderson Darling. Além disso, para todos os testes utilizou-se o nível de confiança de 95 % ( $\alpha = 0.05$ ) e o desvio padrão como incerteza de aferição.

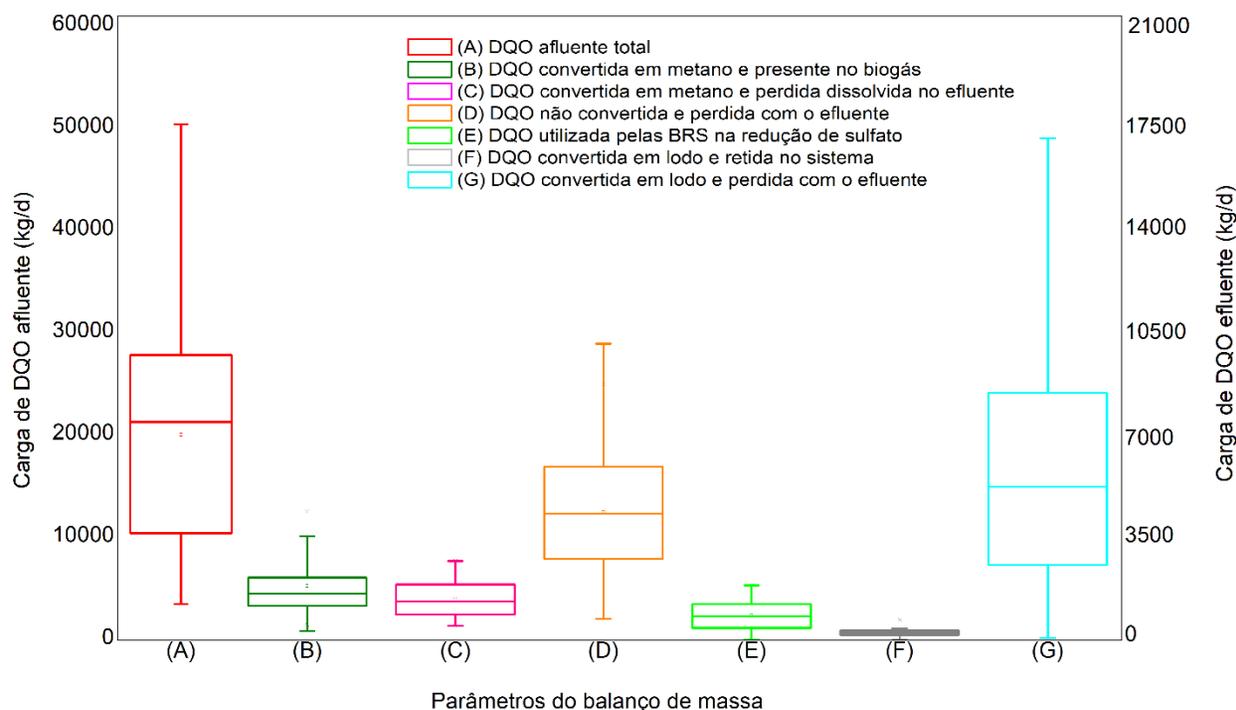
### **Resultados e discussões**

Após o monitoramento dos reatores UASB modificado, determinou-se a estatística descritiva dos parâmetros utilizados para realização do balanço de massa, as quais se encontram apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos parâmetros utilizados no balanço de massa de reatores UASB modificado.

Parâmetros	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Vazão de esgoto (L.s <sup>-1</sup> )	360	341	361	117	604	84
DQO afluente (mg.L <sup>-1</sup> )	360	651	646	292	1921	49
DQO efluente (mg.L <sup>-1</sup> )	360	370	373	130	784	122
DQO efluente filtrada (mg.L <sup>-1</sup> )	360	161	160	57	404	36
Sulfato afluente (mg.L <sup>-1</sup> )	45	51.01	50.90	25.31	96.70	11.26
Sulfato efluente (mg.L <sup>-1</sup> )	45	19.41	14.84	10.27	54.62	9.74
Metano dissolvido (mg.L <sup>-1</sup> )	45	13.40	13.77	3.85	19.95	5.32
STV lodo (% m.m <sup>-1</sup> )	45	3.76	3.49	2.13	14.95	1.54
Vazão de biogás (N.L.s <sup>-1</sup> )	43.200	12.05	10.59	6.17	29.33	2.07
Metano no biogás (%)	4.320	81	82	0.04	90	70

A Figura 4, através de gráficos *boxplot*, apresenta os valores referentes a carga de DQO afluente e aquelas convertidas ou não no sistema. Destaca-se que nesses gráficos os limites referem-se aos valores de máximo e mínimo, a altura do retângulo é definida pelo primeiro e terceiro quartil, e a linha que secciona o retângulo refere-se ao segundo quartil (mediana).

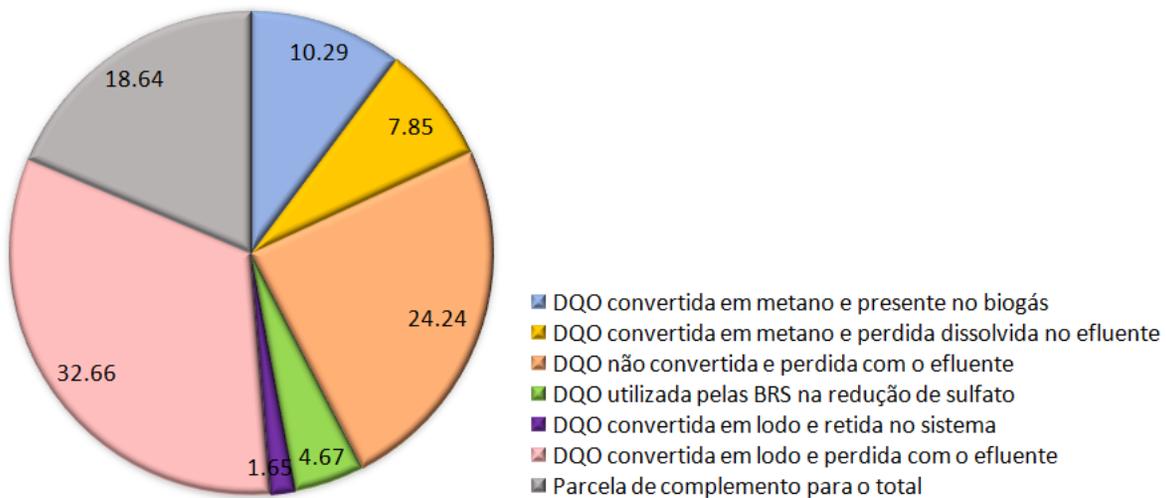


**Figura 4.** Balanço de massa em reatores UASB modificado.

Fonte: adaptado de Paula (2019).

O valor médio obtido para massa diária de DQO afluente foi de  $19.102 \pm 10.848 \text{ kg.d}^{-1}$ . A massa diária de DQO convertida em metano, tanto presente no biogás quanto eliminada junto ao efluente, foi de  $1.965 \pm 1033 \text{ kg.d}^{-1}$  e  $1.499 \pm 635 \text{ kg.d}^{-1}$ , respectivamente. A massa diária de DQO não convertida e eliminada junto ao efluente foi de  $4.629 \pm 2.172 \text{ kg.d}^{-1}$ . A massa diária de DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato foi de  $892 \pm 541 \text{ kg.d}^{-1}$ . Por fim, a massa diária de DQO convertida em lodo, tanto perdida com o efluente quanto retida no sistema foi em média de  $6.239 \pm 4213 \text{ kg.d}^{-1}$  e  $315 \pm 190 \text{ kg.d}^{-1}$ , de modo respectivo.

A Figura 5 apresenta os resultados percentuais das parcelas do balanço de massa em termos de DQO.



**Figura 5.** Percentuais para cada parcela de transformações do material orgânico em reatores UASB modificado.  
*Fonte: adaptado de Paula (2019).*

Nota-se que de toda DQO que entra no reator, 32.66 % foi transformada em lodo e eliminada junto ao esgoto efluente, sendo que este valor encontra-se superior ao apresentado na literatura. Carrasco (1992), por exemplo, obteve para parcela de DQO transformada em lodo (perdido e retido) valor de aproximadamente 10 %, Bressan (2016) obteve de 3 a 15 % e Souza (2010) obteve para DQO transformada em lodo (perdido) valores entre 14 e 24 %. Quanto a parcela de DQO não convertida e eliminada dissolvida ao efluente, o resultado foi de 24.24 %, valor similar ao apresentado por Souza (2010) (14 a 24 %) e inferior ao citado por Bressan (2016) (3 a 15 %). Ambas essas parcelas foram as mais representativas do presente balanço de massa de DQO.

Das parcelas menos representativas do balanço tem-se a de DQO convertida em biomassa e retida no sistema, com valor de 1.65 %. Os resultados dessa parcela foram expressivamente inferiores aos de literatura, a exemplo disso, de 8 a 10 % do balanço de massa desenvolvido por Souza (2010) refere-se a essa parcela e para Carrasco (1992) a parcela de DQO convertida em lodo (perdido e retido) foi em torno de 10 %. Diante disso, salienta-se que, por tratar-se de uma ETE em escala plena, para o adequado funcionamento da estação ocorreram descartes periódicos de lodo, interferindo diretamente na quantificação da biomassa retida no sistema.

Além disso, as distinções observadas entre os resultados obtidos e os apresentados na literatura devem-se possivelmente às diferenças na concepção dos reatores anaeróbios do tipo UASB tradicional e do tipo UASB modificado, visto que, na seção de decantação do reator UASB tradicional, os sólidos fluem verticalmente, sendo desassociados do esgoto pela velocidade de fluxo do efluente inferior a velocidade de queda dos sólidos, diferente do observado para o reator UASB modificado, onde os sólidos percorrem horizontalmente a seção de decantação, possibilitando maior carregamento desse material junto ao esgoto efluente.

O valor obtido para parcela de DQO utilizada pelas BRS na redução de sulfato (4.67 %) pode ser explicado pelas concentrações de sulfato no esgoto afluente, as quais apresentaram valor médio de  $51.01 \pm 25.31 \text{ mg.L}^{-1}$ , estando este dentro do esperado e semelhante ao estabelecido na literatura por Souza (2010) e Lobato *et al.* (2012), que mencionam concentrações de sulfato no esgoto afluente de  $42 \text{ mg.L}^{-1}$  e entre 40 e  $80 \text{ mg.L}^{-1}$ , de modo respectivo.

O valor obtido para parcela de DQO transformada em metano e eliminada dissolvida com o efluente (7.85 %) foi menor que aqueles identificados por Singh *et al.* (1996), Seghezzeo (2004) e Souza e Chernicharo (2011), os quais obtiveram valores de 28 a 39 %, 18 % e 36 a 40 %, respectivamente. Isto posto, cabe salientar que assim como para a parcela de DQO transformada em lodo e retida no sistema, o resultado dessa parcela de DQO transformada em metano e eliminada dissolvida com o efluente é diretamente influenciado pela performance dos reatores UASB, uma vez que, nos reatores UASB modificado o efluente no captador de gás flui horizontalmente para os vertedores, de modo que, o gás dissolvido desorve-se do esgoto enquanto flui no sentido do transbordamento, diminuindo o aporte de gás dissolvido no esgoto.

Além disso, é notório que a parcela de DQO convertida em metano e perdida dissolvida no efluente variou bastante, indicando perda de potencial energético mesmo não sendo a de maior relevância no balanço. Para o metano dissolvido no efluente foi obtido valor médio de  $13.40 \pm 3.85 \text{ mg.L}^{-1}$ , superior ao encontrado por Gervasoni e Cantão (2011) e Nelting *et al.* (2017), que alcançaram valores de 10 e  $8.5 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente.

Para Brandt *et al.* (2018) a minimização e o controle do metano dissolvido podem ser realizados com o uso de coberturas, exaustão dos canais de efluente e/ou tecnologias avançadas de recuperação, como sistema a vácuo, por exemplo. Além dessa, muitas outras soluções tecnológicas de recuperação de metano dissolvido vêm sendo desenvolvidas em laboratório e em escala piloto, por exemplo, as apresentadas por Wasala *et al.* (2011), Cookney *et al.* (2016) e Brandt *et al.* (2016).

A perda de potencial energético no sistema representou 43 %, uma vez que do total de DQO convertida em metano (18.14 %), apenas 10.29 % corresponderam aquela presente no biogás e apta para uso. Para Souza (2010), a elevação na concentração de metano no biogás, sem decréscimo na concentração de metano dissolvido e de DQO efluente solúvel, está diretamente relacionada com o aumento no tempo de detenção hidráulica do reator. Essa asserção diverge do ocorrido no presente trabalho, visto que, o TDH dos reatores UASB modificado variou entre  $(11.68 \pm 6.27)$  h, valor esse superior ao de projeto (8 h) e mesmo assim, foi obtido um pequeno valor para parcela de metano presente no biogás e um alto valor para parcela de DQO efluente solúvel.

Nota-se que o somatório das parcelas de transformações do material orgânico totalizou 81.36 %, ou seja, 18.64% da DQO de entrada foi transformada em partes não mensuradas, como, por exemplo, DQO transformada em metano e eliminada para atmosfera ou com o gás residual. Bressan (2016) menciona um percentual entre 7 e 7.5 % de DQO transformada em metano e perda de formas não mensuradas. Dentro desse contexto, destaca-se ainda que em dias específicos de monitoramento foram evidenciados vazamentos nas linhas de biogás, o que possivelmente contribuiu com o resultado dessas parcelas.

De acordo com a modelagem matemática proposta por Lobato *et al.* (2012), os resultados obtidos melhor se classificam como pior situação, relativo a elevadas concentrações de sulfato e perdas de metano, bem como baixa eficiência de remoção de DQO.

Lobato *et al.* (2012) obtiveram como maior parcela de seu balanço de massa a de DQO não convertida e eliminada solúvel ao esgoto efluente. Esse fato é similar ao identificado na presente avaliação, a qual classificou a respectiva parcela como a segunda com maior representatividade. A parcela de DQO convertido em metano e presente no biogás, encontrada por Lobato *et al.* (2012), foi cerca de 2 vezes superior a identificada no estudo em questão, e a parcela de DQO convertida em biomassa foi 21.31 % inferior, considerando DQO transformada em biomassa tanto a que fica retida no sistema, quanto a que é eliminada junto ao esgoto efluente. Essas diferenças possivelmente são por conta do funcionamento dos reatores UASB, visto que o presente estudo foi realizado em reatores UASB modificado e as simulações feitas por Lobato *et al.* (2012) foram para reatores UASB tradicional.

### Conclusões

Como principal contribuição o artigo buscou descrever detalhadamente os processos de transformações do material orgânico em reatores UASB modificado, considerando as especificidades do sistema, com base em experimentos de grande escala, totalizando-se 1.575 dados amostrados para fase líquida, 60.480 para fase gasosa e 45 para fase sólida.

As parcelas mais representativas do balanço de massa foram de DQO transformada em biomassa e eliminada com o efluente (32.66 %) e DQO não transformada e eliminada solúvel ao esgoto (24.24 %).

A DQO transformada em biomassa e retida no sistema representou 1.65 %, valor este abaixo do de literatura e eventualmente influenciado pelos descartes periódicos de lodo e pela performance dos reatores. A DQO empregue para redução do sulfato foi de 4.67 %, valor este em conformidade com os já identificados por outros pesquisadores e diretamente relacionado com a concentração de sulfato, que foi em média de 51 mg.L<sup>-1</sup>. Ambas foram as menos representativas do balanço de massa.

Obteve-se perda de potencial energético de aproximadamente 43 %, visto que, do total de DQO afluente, somente 10.29 foi recuperada como metano do biogás. O somatório das parcelas de transformação da matéria orgânica no sistema totalizou 81.36 %, assim, 18.64 % da DQO de entrada foi transformada em partes não medidas, como, por exemplo, DQO transformada em metano e eliminada para atmosfera ou com o gás residual. Ainda assim, ressalta-se que foram evidenciados vazamentos nas linhas de biogás, em dias específicos de avaliação, o que pode ter contribuído com essas parcelas.

Quando contrapostos os resultados almejados com os de literatura, foi demonstrado que a performance dos reatores UASB modificado influem de modo direto nas etapas de transformação do material orgânico e conseqüentemente no balanço de massa em termos de DQO.

Por fim, como aplicação, o estudo em questão serve como suporte para análise de novos processos, demonstrando a influência das diferentes concepções dos reatores anaeróbios do tipo UASB no funcionamento das ETEs e nos caminhos de degradação do material orgânico dentro sistema. Além disso, a dimensão das análises físico-químicas realizadas serve como suporte e embasamento para outras pesquisas e avaliações.

### Agradecimentos

*Os autores agradecem a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) e ao Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), pelo*

*financiamento da pesquisa. A Universidade Federal do Paraná (UFPR), a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações de Tratamento de Esgoto Sustentáveis (INCT ETEs Sustentáveis) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio demonstrado. A Organização dos Estados Americanos (OEA), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/UFPR) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão das bolsas.*

### Referências bibliográficas

- Agrawal, L. K., Harada, H., Okui, H. (1997) Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **83**(2), 179-184.
- ANA, Agência Nacional de Águas. (2017) *Atlas esgotos – Despoluição de bacias hidrográficas*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. Acesso em 15 de janeiro de 2020, disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br>
- APHA, American Public Health Association, AWWA, American Water Works Association, WEF, Water Environment Federation. (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21<sup>ª</sup> Ed. New York.
- Brandt, E. M. F., Duarte, F. V., Vieira, J. P. R., Melo, V. M., Souza, C. L., Araújo, J. C., Chernicharo, C. A. L. (2016) The use of novel packing material for improving methane oxidation in biofilters. *Journal of Environmental Management*.
- Brandt, E. M. F., Santos, J. M. B., Souza, C. L., Possetti, G. R. C., Bressani Ribeiro, T. B., Carvalho Júnior, A. N., Chernicharo, C. A. L. (2018) Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 4: Controle de corrosão e emissões gasosas. *Revista DAE – edição especial*, **66**(214), 56-72.
- Bressan, T. C. S. (2016) Diagnóstico e avaliação dos reatores UASB da ETE Paranoá-DF. Monografia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 83 pp.
- Carrasco, K. I. A. (1992) Balanço de massa e energia: aplicação ao tratamento de esgoto sanitário com reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) à temperatura de 20 °C. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 212 pp.
- Chernicharo, C. A. L. (2011) *Reatores anaeróbios*. 2<sup>a</sup> ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 380 pp. (Coleção Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5)
- Cookney, J., Mcleod, A., Mathioudakis, V., Ncube, P., Soares, A., Jefferson, B., Mcadam, E. J. (2016) Dissolved methane recovery from anaerobic effluents using hollow fibre membrane contactors. *Journal of Membrane Science*, **502**, 141–150.
- Gervasoni, R., Cantão, M. P. (2011) Produção de metano a partir da digestão anaeróbia: relação entre teoria e prática. *Espaço energia*, **15**, 13-20.
- Keller, J., Hartley, K. (2003) Greenhouse gas production in wastewater treatment: process selection is the major factor. *Water Science and Technology*, **47**(12), 43-48.
- Lobato, L. C. S., Chernicharo, C. A. L., Souza, C. L. (2012) Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. *Water Science & Technology*, **66**(12), 2745-2753.
- Nelting, K., Trautmann, N., Caicedo, C., Weichgrebe, D., Rosenwinkel, K. H., Costa, F. J. O. G., Possetti, G. R. C. (2017) Constraints on the dissolved methane in the effluent of full scale municipal UASB reactors. *14th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies*. Florianópolis, Santa Catarina.

- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., Lopez-Hernandez, J. E. (2006) Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **5**(1), 93-114.
- Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, L. P., Hernández-Padilla, F. (2012) Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air Water*, **40**(9), 926-932.
- Paula, A. C. (2019) *Avaliação integrada do desempenho de reatores anaeróbios do tipo UASB tratando esgoto doméstico em escala real*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, 221 pp.
- Ross, B. Z. L. (2015) *Escuma de reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos em escala real: produção, caracterização e proposição de parâmetros para seu gerenciamento*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, 163 pp.
- Ross, B. Z. L., Costa, F. J. O. G., Marques, C. J., Froehner, S., Aisse, M. M. (2016) Avaliação do efeito da velocidade ascensional do esgoto bruto e a frequência de retirada de lodo na geração de espuma em reatores UASB operando em escala plena. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, **9**(3), 349-362.
- Schneiders, D., Silva, J. D., Lapa, K. R., Pinheiro, A. (2018) Tratamento de lodo da indústria têxtil e produção de biogás em reator UASB. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, **11**(2), 182-201.
- Seghezzo, L. (2004) *Anaerobic Treatment of domestic wastewater in subtropical regions*. Wageningen University, Wageningen, the Netherlands, 133 pp.
- Singh, K. S., Viraraghavan, T. (1998) Start-up and Operation of UASB Reactors at 20° C for Municipal Wastewater Treatment. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **85**(6), 609-614.
- Souza, C. L. (2010) *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 147 pp.
- Souza, C. L., Chernicharo, C.A.L. (2011) Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. *Water Science and Technology*, **64**, 2259–2264.
- Van Haandel, A., Lettinga, G. (1994) *Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente*. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, Brasil.
- Wasala, M. K. R. T. W. B., Satoh, H., Sasakawa, M., Nakahara, Y., Takahashi, M., Okabe, S. (2011) Removal of residual dissolved methane gas in an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating low-strength wastewater at low temperature with degassing membrane. *Water Research*, **45**(11), 3533-3540.