

ACV ambiental de ETE que emprega lodos ativados como pós tratamento de reator UASB

Os sistemas de tratamento de esgoto possuem a função de minimizar os impactos ambientais do lançamento de efluentes no meio ambiente, mas eles próprios apresentam-se como um elemento impactante ao longo do seu ciclo de vida, pelas emissões e consumos que ocorrem ao longo do tratamento. O presente estudo teve por objetivo realizar a avaliação de ciclo de vida ambiental (ACV - A) de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), dotada de lodos ativados, como pós-tratamento de reatores anaeróbios - UASB. Os resultados evidenciaram que os gases metano (CH₄) e dióxido de enxofre (SO₂), emitidos para a atmosfera, após a queima parcial do biogás em queimadores abertos, são os principais responsáveis pelos impactos nas categorias de mudanças climáticas (MC) e acidificação terrestre (AT), respectivamente. O alto consumo de energia no reator aeróbio, para oxigenação, também contribuiu para as categorias de acidificação terrestre e formação de ozônio. Com relação à categoria de eutrofização água doce (EUT-AD), o processo que mais contribuiu foi o lançamento do efluente tratado em corpo receptor, pela emissão de fósforo. Os resultados reportados contribuem para uma maior discussão dos processos de tratamento de esgoto, bem como de alternativas de gerenciamento de biogás, empregados em países em desenvolvimento.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida; Metano; Impacto ambiental.

ETE environmental ACV that employs activated sludge as a post-treatment of a UASB reactor

Sewage treatment plants (STP) have the function of minimizing the environmental impacts of the discharge of effluents into the environment, but they themselves present as an impacting element throughout their life cycle, due to the emissions and consumption that occur during the treatment. The present study aimed to carry out the environmental life cycle assessment (LCA) of a sewage treatment plant (STP), equipped with activated sludge, as post-treatment of anaerobic reactors - UASB. The results showed that the gases methane (CH₄) and sulfur dioxide (SO₂), emitted to the atmosphere, after the partial burning of biogas in open flares, are the main responsible for the impacts in the categories of climate change (MC) and terrestrial acidification (AT), respectively. The high-energy consumption in the aerobic reactor, for oxygenation, also contributed to the categories of terrestrial acidification and ozone formation. With regard to the fresh water eutrophication category (EUT-AD), the process that contributed most was the release of the treated effluent into the receiving body, through the emission of phosphorus. The reported results contribute to a greater discussion of sewage treatment processes, as well as of sludge management alternatives, used in developing countries.

Keywords: Life cycle assessment; Methane; Environmental impact.

Topic: **Engenharia Ambiental**

Received: **04/03/2021**

Approved: **24/03/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Karina Guedes Cubas do Amaral 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6822277304361960>
<http://orcid.org/0000-0002-8479-587X>
kacubas@gmail.com

Jolena de Santi Soares 
Faculdade Educacional Araucária, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0517011002326406>
<http://orcid.org/0000-0001-7992-0827>
jolena.soares@unifaclear.edu.br

Julio Cezar Rietow 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6915797461926578>
<http://orcid.org/0000-0002-5467-6108>
juliorietow@gmail.com

Miguel Mansur Aisse 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5314535107580087>
<http://orcid.org/0000-0003-4620-559X>
miguel.dhs@ufpr.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0026

Referencing this:

AMARAL, K. G. C.; SOARES, J. S.; RIETOW, J. C.; AIISSE, M. M.. ACV ambiental de ETE que emprega lodos ativados como pós tratamento de reator UASB. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.3, p.312-322, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0026>

INTRODUÇÃO

A situação de saneamento básico no Brasil ainda é precária. Os dados do Atlas Esgotos confirmam esta problemática ao divulgar que a porcentagem de coleta de esgotos é de 61,4% e o tratamento de 42,6% (ANA, 2017). Novas estações e a ampliação da capacidade e nível de tratamento das existentes devem ser projetadas para atender à necessidade dos esgotos sanitários gerados.

Os sistemas de tratamento possuem a função de minimizar os impactos ambientais do lançamento de efluentes no meio ambiente, mas eles próprios apresentam-se como um elemento impactante ao longo do seu ciclo de vida (SANCHES, 2009), pelas emissões e consumos que ocorrem ao longo do tratamento.

A tecnologia de reatores de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB/RALF) é a segunda mais empregada, em termos de número de instalações de ETEs, no Brasil (NOYOLA et al., 2012; ANA, 2017). O levantamento realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) mostra, ainda, que existe uma ampla gama de tecnologias de pós-tratamento de reatores UASB empregadas, prevalecendo, todavia, o uso de lagoas, filtros percoladores e lodo ativado.

A tecnologia UASB apresenta como característica a geração de lodo biológico estabilizado e de biogás, rico em metano, sendo este último ainda pouco aproveitado para fins energéticos. Esses subprodutos gerados, se não gerenciados adequadamente, podem ocasionar impactos ambientais. Nos casos de estações que empregam processos aeróbios e realizam a transformação do nitrogênio (nitrificação), tem-se ainda a emissão de óxido nitroso - N_2O , e em ETEs anaeróbias, tem-se a emissão de metano - CH_4 , que contribuem significativamente para o impacto de mudanças climáticas.

O desenvolvimento de inventários é necessário para identificar as estratégias de mitigação de impactos ambientais que podem resultar na definição e implementação de instrumentos eficazes de planejamento para governos locais e nacionais (NOYOLA et al., 2016).

Atualmente, na maioria das ETEs brasileiras, o biogás é queimado em *flares* e emitido para a atmosfera. Por fim, destaca-se a possibilidade associada à geração e coleta do biogás, o qual é passível de aproveitamento energético devido à sua composição rica em metano (CH_4). De acordo com recentes resultados do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), o teor médio de metano no biogás, proveniente de reatores UASB tratando esgoto sanitário, varia entre 70 e 81% (ANA, 2017), cujo poder calorífico inferior é de aproximadamente 10 kWh.Nm³ (MORAN et al., 2010).

Apesar das reconhecidas vantagens, ressalta-se que somente o emprego de reatores UASB pode ser insuficiente para atender aos requisitos legais de lançamento de efluentes em corpos d'água (ANDREOLI et al., 2014). Desse modo, processos aeróbios de tratamento, como lodos ativados (LA) e filtros biológicos percoladores (FBPs), estão sendo empregados no Brasil como etapa de polimento de efluentes de reatores UASB.

A fim de contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas, vários pesquisadores conduziram a avaliação do ciclo de vida (ACV) para ETEs. A ACV enfoca os possíveis aspectos e impactos ambientais (uso

de recursos e consequências para o meio ambiente) ao longo do ciclo de vida do produto (ABNT, 2014). Da mesma forma, a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) fornece informações adicionais para auxiliar no desempenho de um inventário de ciclo de vida (ICV) de um sistema de produtos, a fim de obter melhor compreensão de sua significância ambiental (ABNT, 2014).

A partir desse entendimento sobre a necessidade da realização de novos estudos pautados no levantamento de impactos ambientais em ETEs, o objetivo do presente estudo foi realizar a ACV ambiental de uma ETE que emprega reatores UASB seguidos de lodos ativados de aeração prolongada.

REVISÃO TEÓRICA

Avaliação do ciclo de vida ambiental (ACV-A)

A Avaliação do Ciclo de Vida - ACV é uma entre as várias técnicas de gestão ambiental. Um estudo de ACV é composto de quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação. O inventário ambiental é a quantificação de todas as entradas e saídas dos processos envolvidos na análise, como consumo de produtos, saídas de resíduos e efluentes para tratamento e emissões para o meio ambiente. Após o levantamento, é realizada a conversão para a unidade funcional, que nada mais é do que a quantificação da função. Todas as entradas e saídas no Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e, conseqüentemente, o perfil da AICV, estão relacionados à unidade funcional. Os dados a serem selecionados para uma ACV podem ser coletados nos locais de produção associados aos processos elementares dentro da fronteira do sistema, ou podem ser obtidos, ou calculados a partir de outras fontes (UGAYA, 2013). Dessa forma, na prática, os inventários podem incluir dados medidos, calculados ou estimados. Normalmente, também, são usados bancos de dados (BD) como apoio, como, por exemplo, o banco de dados doecoinvent.

Tecnologias empregadas para o tratamento de efluentes domésticos

Conforme dados apresentados por Noyola et al. (2012) as três tecnologias mais empregadas na América Latina são lagoas de estabilização (1.106 instalações, 38% da amostra), seguido de lodo ativado (760, 26%) e do reator anaeróbio de manta de lodo, conhecido como UASB (493, 17%). Estas três tecnologias correspondem a 2.359 instalações (80% da amostra). No entanto, as tecnologias mais representativas em termos de vazão de tratamento são lodo ativado (104,1 m³/s, 58%), seguido de lagoas de estabilização (27,1 m³/s, 15%).

Reator anaeróbio de manta de lodo – UASB

Os reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) são uma das variantes de reatores anaeróbios. Nesse tipo de reator, a biomassa cresce dispersa no meio e pode formar grânulos, correspondente à aglutinação de diversas espécies microbianas (VON SPERLING, 2014).

Uma característica do processo é a limitação na eficiência de remoção da DBO, situando em torno de

70%. Para se atingir a eficiência desejada ao atendimento legal, os reatores UASB devem ser seguidos por alguma forma de pós-tratamento (VON SPERLING, 2014).

No Estado do Paraná, a Companhia de Saneamento atende um total de 143 cidades, somando 203 ETEs, com vazão total tratada de 564.189 m³/h. Destas ETEs, 94,6% utilizam reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB/RALF) e 8 (3,9%) estão operando com outra tecnologia, sendo elas: 5 ETEs (2,4%) com lagoas de estabilização, 1 (0,5%) com lodos ativados, 1 (0,5%) com Tanque Imhoff e 1 (0,5%) com tanque séptico (ROSS, 2015).

Caracterização do biogás

O biogás oriundo de reatores tipo UASB, como resultado da atividade anaeróbia (VON SPERLING, 2014), é composto majoritariamente por metano (60 a 85% v/v), nitrogênio (10 a 25% v/v) e gás carbônico (5 a 15% v/v). Em menor volume, o biogás ainda apresenta pequenas quantidades de hidrogênio, gás sulfídrico, amônia e outros gases traço (AZEVEDO NETTO, 1977; LOBATO, 2011). A Tabela 1 apresenta os componentes usualmente encontrados no biogás produzido em reatores UASB tratando esgotos domésticos.

Tabela 1: Composição volumétrica típica do biogás gerado em reatores UASB.

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica
Metano – CH ₄	%	60 a 85
Gás carbônico – CO ₂	%	5 a 15
Monóxido de carbono – CO	%	0,3
Nitrogênio – N ₂	%	10 a 25
Hidrogênio – H ₂	%	0 a 3
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	ppmv	1000 a 2000
Oxigênio – O ₂	%	Traços

Fonte: Adaptado de Lobato (2011).

Usualmente, nas estações de tratamento de esgoto do Brasil, o biogás gerado no processo de tratamento do esgoto doméstico é captado e conduzido para queima em *flares* abertos (equipamentos que promovem a destruição parcial dos elementos componentes do biogás através do processo de combustão). Os queimadores abertos possuem eficiência de 50%. Nos queimadores fechados, a eficiência é de até 98% de remoção de CH₄ e de 95% de H₂S (KAMINSKI et al., 2018). O intuito de realizar a queima é de reduzir as taxas de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que o CH₄ possui um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2014).

Lodo ativado de aeração prolongada

O sistema de lodos ativados é bastante utilizado em nível mundial, principalmente em situações em que se deseja uma elevada qualidade do efluente com baixos requisitos de área. Como desvantagem desse sistema, tem-se: a complexidade operacional, o nível de mecanização e o consumo energético elevado (VON SPERLING, 2014).

Com relação à idade do lodo, os sistemas de lodos ativados se dividem em: lodos ativados convencionais (idade de lodo reduzida, 4 a 10 dias) e de aeração prolongada (elevada idade de lodo, 18 a 30 dias) (VON SPERLING, 2012).

Como no sistema de lodos ativados de aeração prolongada a biomassa permanece no sistema por período mais longo, recebendo a mesma carga de DBO do esgoto bruto que o sistema convencional, haverá menor disponibilidade de alimento para as bactérias. A quantidade de biomassa é maior que no sistema de lodos ativados convencional. Portanto, há menos matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração e por unidade de biomassa no reator. Em decorrência, as bactérias passam a utilizar de forma mais intensa nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica biodegradável componente das suas células, convertendo em gás carbônico e água. Isto corresponde a uma estabilização da biomassa, realizada no próprio tanque de aeração. Com isto, obtém-se uma simplificação no fluxograma do processo: não há decantadores primários e unidades de digestão do lodo. A consequência desta simplificação é o gasto com energia para a aeração, sendo de 20-35 kWh/hab.ano (VON SPERLING, 2012).

Remoção biológica de nitrogênio e emissões

O sistema de lodos ativados é capaz de produzir a conversão satisfatória de amônia para nitrato (nitrificação). Neste caso, não existe a remoção do nitrogênio, mas apenas a sua conversão (VON SPERLING, 2012). Para realizar a remoção é necessário o processo de desnitrificação, redução dos nitratos a nitrogênio gasoso.

A remoção biológica de nutrientes (RBN), neste caso, o nitrogênio e o fósforo, vem sendo empregada em alguns países dependendo de objetivos mais amplos do tratamento e da qualidade das águas do efluente final e do corpo receptor. Os padrões de lançamento e dos corpos d'água podem direcionar a decisão sobre a necessidade e o nível em que deve ser praticada a remoção de nutrientes (VON SPERLING, 2012).

Embora a nitrificação diminua os problemas ambientais intrínsecos ao lançamento de efluentes em corpos d'água, destaca-se que a mesma é responsável pela produção de N_2O (MELLO et al., 2013).

Diferentes condições operacionais podem favorecer a ocorrência de processos de nitrificação e desnitrificação parciais em sistemas de tratamento de esgotos, e assim criar condições para o acúmulo de N_2O no meio líquido em razão do aumento de sua taxa de produção (RIBEIRO et al., 2017), tais como: elevadas amplitudes nas cargas aplicadas de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) ou amoniacal (NH_x) (choques de carga), limitação de oxigênio dissolvido (OD) e acúmulo de NO_2^- , limitação da fonte de carbono orgânico (baixa relação C/N), dentre outros.

Na troposfera, o N_2O exerce um potencial de aquecimento global 265 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) (IPCC, 2014). Recentemente, em relatório publicado em 2019, o IPCC ajustou o fator de emissão - FE de N_2O para 1,6% da carga de nitrogênio total - NT proveniente de sistemas de tratamento de esgotos. Ribeiro et al. (2020) monitoraram ETEs brasileiras obtendo-se valores de 0,04% para N_2O e 0,054% para CH_4 .

O sistema de lodos ativados, pós reator UASB, pode também ser uma fonte de emissão do CH_4 , não sendo produzido no sistema de lodo ativado, mas na etapa a montante (condição anaeróbia) e assim presente na forma dissolvida no efluente do UASB.

METODOLOGIA

A tecnologia de tratamento estudada é o sistema UASB+Lodo ativado de aeração prolongada. A ETE possui uma vazão de projeto de 90 L/s. A matriz de tratamento adotada na estação é composta por: tratamento preliminar, 03 (três) reatores anaeróbios de manto de lodo tipo UASB e 02 (dois) decantadores secundários circulares. Neste estudo, foi adotado o pós tratamento de reator UASB como sendo de lodos ativados, conforme fluxograma demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

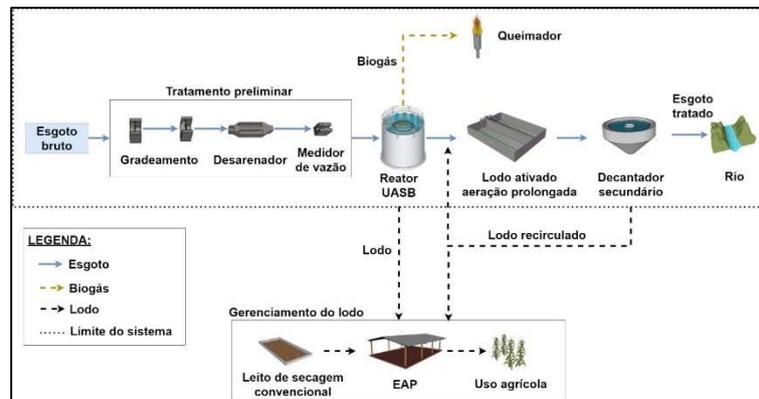


Figura 1: Fluxograma de tratamento UASB+lodo ativado de aeração prolongada.

O lodo proveniente do reator UASB e do decantador secundário é direcionado para leitos de secagem convencional e, após desaguardamento, encaminhado para higienização em uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), através da estabilização alcalina prolongada. Após a higienização o biossólido é encaminhado para aplicação agrícola. Neste estudo, conforme demonstrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** não será englobado o tratamento e disposição do lodo biológico, englobando as emissões e consumos provenientes do tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), reator UASB, lodo ativado e lançamento do efluente tratado no corpo receptor.

Para atendimento ao disposto na Resolução SEMA 16/2014 (PARANÁ, 2014), que cita que na impossibilidade de aproveitamento do biogás, deve ser realizada a queima, através da instalação e operação contínua de queimadores para conversão do metano, o biogás, gerado pelos reatores UASB, é queimado em flare aberto.

Elaboração dos inventários ambientais

Para a elaboração do inventário do ciclo de vida do tratamento de 1 m³ de efluente, adotaram-se as diretrizes das normas da série ISO 14.040.

Para o consumo de energia, utilizou-se o valor apresentado por von Sperling (2014), para sistema de lodos ativados de aeração prolongada, sendo o consumo de 20-35 kWh/hab.ano.

Posteriormente foram levantados dados primários e secundários das fases sólida, líquida e gasosa.

Fase sólida

A fase sólida do sistema de tratamento corresponde à geração do resíduo proveniente do tratamento

preliminar e ao lodo gerado no tratamento biológico (UASB e lodo ativado).

Com relação ao material gradeado, proveniente do tratamento preliminar, foi utilizada a quantidade média gerada no ano de 2018, sendo uma quantidade de 2,848 m³/mês, correspondendo a 2.477,76 kg/mês. Este valor foi repassado pela Companhia de Saneamento.

A quantidade de sólidos totais (ST) no lodo biológico oriundo dos reatores UASB e dos lodos ativados foi estimada a partir da DQO aplicada na estação. Para tanto, empregou-se que a produção de ST em reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio é de 0,25 kgST/kgDQO aplicada (ANDREOLI et al., 2014), correspondendo a uma geração de 500 kgSS/dia.

Fase líquida

A realização do inventário ambiental da fase líquida levou em consideração os seguintes parâmetros no afluente e efluente da ETE: DQO, demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), NH₃, nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻) e sólidos suspensos (SS). Utilizou-se os valores médios apresentados por von Sperling (2014)

Fase gasosa

A realização do inventário ambiental da fase gasosa contemplou os seguintes aspectos: vazão e caracterização do biogás produzido nos reatores UASB; eficiência dos queimadores abertos no que diz respeito a destruição de CH₄ e H₂S; taxas de emissões de N₂O e CH₄ nos reatores da etapa de lodo ativado.

A vazão de biogás produzido nos reatores UASB e a concentração de CH₄ no biogás foi calculada por meio do emprego do software ProBio 1.0, elaborado pelo modelo apresentado por Lobato (2011). Os dados de entrada requeridos pelo software são a vazão de esgoto e a demanda química de oxigênio (DQO) afluente aos reatores UASB. Esses dados foram obtidos junto à ETE. Para a concentração de H₂S, foi utilizado o valor reportado por Lobato et al. (2012), sendo de 1.500 ppm. Para a eficiência de destruição de CH₄ e H₂S em queimadores abertos, foi utilizado o valor de 50%.

Para realizar a estimativa de emissão de N₂O e CH₄ no tanque de aeração, foram utilizados os fatores de emissão proposto por Ribeiro et al. (2020), sendo de 0,04% da carga de NT proveniente de sistemas de tratamento de esgotos para o N₂O e 0,054% para o CH₄.

Com relação ao consumo de energia elétrica, transporte de produtos e emissões do aterro, para destinação dos resíduos do tratamento preliminar, foram utilizados inventários ambientais do banco de dados doecoinvent (v3) para contabilizar os impactos ambientais dessas etapas.

Avaliação dos impactos ambientais

Para a realização do cálculo do impacto ambiental foi utilizada a metodologia de ACV empregada no software SimaPro. O método utilizado foi o ReCiPe 2016 Midpoint (H). As categorias de impactos avaliadas foram: mudança climática (MC), depleção de ozônio estratosférico (DOE), formação de ozônio – ecossistemas terrestres (OET), acidificação terrestre (AT), eutrofização aquática (água doce) (EUT-AD), ecotoxicidade terrestre (ET), ecotoxicidade em água doce (EAD) e toxicidade humana não cancerígena (TH).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inventário ambiental

A Tabela 2 apresenta o inventário ambiental do sistema de tratamento UASB+Lodo ativado de aeração prolongada. A unidade funcional empregada é o tratamento de 1 m³ de efluente doméstico.

Tabela 2: Inventário ambiental do sistema UASB + lodo ativado (UF=1m³).

Processos	Fluxos	
Tratamento preliminar	Entrada	
	Efluente bruto (m ³)	1 m ³
	Transporte (sólidos grosseiros para aterro)	0,0033 tkm
	Saída	
	Sólidos grosseiros	0,029 kg
Reator UASB	Entrada	
	Efluente tratamento preliminar	1 m ³
	Saída	
	Biogás	0,12 m ³
	Efluente anaeróbio	1 m ³
Lodos ativados	Entrada	
	Efluente anaeróbio	1 m ³
	Energia elétrica	0,46 kWh
	Saída	
	Efluente	1 m ³
	N ₂ O (ar)	0,000032992 kg
	CH ₄ (ar)	0,0003051 kg
Decantador Secundário	Entrada	
	Efluente proveniente do reator	1 m ³
	Transporte do lodo	0,1412 tkm
	Saída	
	Lodo	0,176 kg
	DQO	0,105 kg
	DBO ₅	0,035 kg
	Nitrogênio total	0,02 kg
	Amônia	0,01 kg
	P total	0,004 kg
	Sólidos totais	0,03 kg
	Entrada	
	Biogás	0,12 m ³
Saídas		
CH ₄	0,042 m ³	
H ₂ S	0,00009 m ³	
SO ₂	0,000088 m ³	

As fontes de emissões de gases de efeito estufa ocorrem no reator de lodos ativados (CH₄ e N₂O) e na queima do biogás em flare aberto (CH₄). O *flare* aberto é, também, fonte de SO₂, responsável pelo impacto de acidificação terrestre. Cabe salientar, que a maioria dos queimadores de biogás no Brasil são abertos, de baixa eficiência de queima (50%). Os queimadores enclausurados apresentam uma eficiência superior, sendo de até 98% de remoção de CH₄ e de 95% de H₂S.

O efluente tratado proveniente do sistema UASB + LA possui um menor teor de matéria orgânica (DQO e DBO) e nutrientes (NH₃, P e N). No entanto essa eficiência ocasiona um maior consumo de energia (0,46 kWh/m³ de efluente tratado). Em sistemas de tratamento UASB + filtro anaeróbio, a eficiência de remoção de matéria orgânica é (75-87%) e nutrientes (<50% para amônia, <60% para Ntotal e <35% para Ptotal) é menor, porém não consomem energia no processo de tratamento.

Avaliação dos impactos ambientais

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a contribuição de cada processo nas categorias de impacto avaliadas.

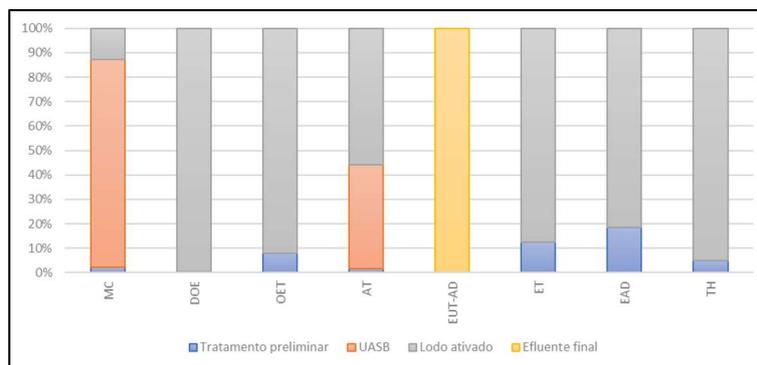


Figura 2: Contribuição de cada processo nas categorias de impacto avaliadas.

Legenda: MC: mudança climática; DOE: depleção de ozônio estratosférico; OET: formação de ozônio, ecossistemas terrestres; AT: acidificação terrestre; EUT-AD: eutrofização aquática (água doce), ET: ecotoxicidade terrestre, EAD: ecotoxicidade água doce e TH: toxicidade humana, não cancerígena.

A maior contribuição na categoria de MC, com 85% de influência (de um total de 1,106 kg CO₂ eq), foi da etapa de queima do CH₄ produzido nos reatores UASB. Devido à baixa eficiência de queimadores do tipo aberto (~50 %), parcela significativa do CH₄ ainda é emitida para atmosfera. O método empregado (ReCiPe) considera que o CH₄ possui um potencial de aquecimento global 34 vezes superior ao CO₂. O reator de lodo ativado também é uma fonte de GEE, pela emissão de N₂O e CH₄, contribuindo com 12,8% do valor total.

Na categoria de DOE, o processo que contribuiu com quase a totalidade do impacto, sendo 99,7%, foi o reator do lodo ativado (6,75x10⁻⁷ de um total de 6,77x10⁻⁷ kg CFC11 eq) em virtude das emissões de N₂O. Na estratosfera, o N₂O desempenha um importante papel catalítico no consumo do ozônio (O₃) estratosférico, possuindo um tempo de permanência no meio de até 120 anos (RAVISHANKARA et al., 2009). Uma maneira de diminuir os impactos causados pela emissão desse gás em LA é a realização de controle mais adequado do processo de aeração.

Para a categoria de OET, o processo de lodos ativados foi o que mais contribuiu, sendo 92%, (0,000135 de um total de 0,000146 kg NO_x eq) pelo consumo de energia elétrica, que emite NO_x na produção.

Os processos mais impactantes na categoria de AT foram o reator UASB e LA. O LA possui 56% de influência (0,00030 de 0,00054 kg SO₂ eq), pela emissão de SO₂ na produção de energia elétrica utilizada. O reator UASB contribuiu com 42,6% (0,00023 de 0,00054 kg SO₂ eq) pela emissão de SO₂ e de H₂S nos queimadores. Como os queimadores não conseguem fazer a combustão completa do biogás, há formação e emissão de SO₂ para atmosfera.

Com relação à categoria de EUT-AD (0,004 kg P eq), o processo que mais contribuiu foi o lançamento do efluente tratado em corpo receptor (99,9%), pela emissão de fósforo.

CONCLUSÕES

Foi realizada a elaboração do inventário ambiental e a avaliação dos impactos, através da técnica de ACV. O inventário demonstrou onde ocorrem as principais emissões (sólida, líquida e gasosa) no processo de tratamento de esgotos sanitários, de nível secundário. Após a elaboração do inventário foi realizada a avaliação dos impactos ambientais.

Os principais impactos observados no processo de tratamento de esgotos sanitários, pela tecnologia de UASB+Lodo ativado de aeração prolongada, são provenientes das emissões atmosféricas do reator de lodo ativado, pelo processo de nitrificação, da queima do biogás em *flare* aberto e do lançamento do efluente tratado em corpo receptor.

O alto consumo de energia nos reatores, para oxigenação, também contribuiu para as categorias de acidificação terrestre e formação de ozônio.

Para que ocorra uma mitigação dos gases de efeito estufa, deve ser instalado um queimador com uma maior eficiência (enclausurado, com eficiência de queima de 98%) ou realizar o aproveitamento do biogás como fonte de energia, visto que o metano possui 10 kWh/m³.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F.. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14.040. Gestão Ambiental: Princípios e estruturas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

AZEVEDO NETTO, J. M.. Aproveitamento do gás de esgotos. **Revista DAE**, v.41, p.15-44, 1977.

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

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change, synthesis report**. IPCC, 2014.

KAMINSKI, G. F.; WAGNER, L. G.; SILVA, F. O. M.; POSSETTI, G. R. C.. Análise crítica acerca da aplicação de queimadores enclausurados em ETEs para destruição de biogás. In: SIMPÓSIO MAUI BRASIL, 3. **Anais**. Curitiba: ABES-PR, 2018.

LOBATO, L. C. S.. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Tese (Doutorado) – 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 & Technology**, v.66, 2012. DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2012.514>

MELLO, W. Z.; RIBEIRO, R. P.; BROTTTO, A. C.. Nitrous oxide emissions from an intermittent aeration activated sludge

system of an urban wastewater treatment plant. **Quimica Nova**, v.36, n.7, p.998-1003, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-40422013000100004>

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY M. B.. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. 7 ed. John Wiley & Sons, 2010.

NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. L.; GUERCA, L. P.; HERNANDEZ-PADILLA, F.. Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. **Clean – Soil, Air, Water**, v.40, n.9, p.926-932, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1002/clen.201100707>

NOYOLA, A.; PAREDES, M. G.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; GUERCA, L. P.. Reduction of greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment in Mexico based on technology selection. **Clean – Soil, Air, Water**, v.44, n.9, p.1091-1098, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201500084>

PARANÁ. **Resolução nº 16**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). Curitiba: DOE, 2014.

RIBEIRO, R. P.; FERREIRA, H. B. P.; UBERTI, A. E.; VALERIO, R. R.; RIETOW, J. C.; AMARAL, K. G. C.; AIISSE, M. M.. Evaluation of the spatial and temporal variability of nitrous oxide (N₂O) emissions at two different full-scale aerobic treatment systems used in the post-treatment of UASB effluents in Brazil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.9, n.1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104676>

RIBEIRO, R.; BUENO, R. F.; PIVELI, R. P.; KLIGERMAN, D. C.; MELLO, W. Z.; OLIVEIRA, L. M.. The response of nitrous oxide emissions to different operating conditions in activated sludge wastewater treatment plants in Southeastern Brazil.

Water Science & Technology, v.76, n.9, p.2337-2349, 2017.

DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2017.399>

ROSS, B. Z. L.. **Escuma de reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos**: produção, caracterização e disposição final. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SANCHES, A. B.. **Avaliação da sustentabilidade de sistemas de tratamento de esgotos sanitários**: uma proposta metodológica. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

UGAYA, C. M. L.. Avaliação do ciclo de vida de produtos. In: ADISSI, P. J.; PINHEIRO, F. A.; CARDOSO, R. S.. **Gestão Ambiental de Unidades Produtivas**. Campus, 2013. p.275-298.

VON SPERLING, M.. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 4 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

VON SPERLING, M.. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: Lodos ativados. 3 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.