

ETEs compactas: controle operacional e de processos em associações tecnológicas de reator anaeróbico com diferentes configurações de pós-tratamento

Compact WWTPs: operational and process control in anaerobic reactor technology associations with different post-treatment configurations

Ana Karoline de Almeida Silva¹ , Nélia Henriques Callado¹ ,
Vladimir Caramori Borges de Souza¹ 

¹Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, AL, Brasil.

E-mails: karolengenharia1309@gmail.com, nelia.callado@yahoo.com.br, vcaramori@yahoo.com

Como citar: Silva, A. K. A., Callado, N. H., & Souza, V. C. B. (2023). ETEs compactas: controle operacional e de processos em associações tecnológicas de reator anaeróbico com diferentes configurações de pós-tratamento. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e24. <https://doi.org/10.21168/reg.v20e24>

RESUMO: Os sistemas isolados dotados de estações compactas de tratamento de esgotos (ECTE), contribuem para o alcance da universalização dos serviços de saneamento. No entanto sua operação e manutenção ainda é um desafio para os que dispõem de infraestrutura e recursos financeiros limitados. O presente trabalho avaliou quatro ECTEs, com tratamento anaeróbico e pós-tratamento aeróbico com configurações distintas, visando identificar como são operadas e monitoradas, suas principais limitações, e se os efluentes atendem aos padrões de lançamento. Os resultados mostraram que todas conseguem enquadrar o efluente tratado aos padrões da CONAMA 430/2011, com eficiência média de remoção de DBO_{5,20} de 87,1±2,2% e desinfecção com hipoclorito de sódio. Três tem retirada de lodo em excesso por caminhões limpa fossas e descarte de efluente tratado no solo, uma utiliza leito de secagem de lodo e efluente tratado em reúso urbano não potável. Mas, o monitoramento das ECTEs tem objetivo apenas de verificar o cumprimento dos padrões de descarte sem preocupação com a avaliação dos processos tecnológicos. A principal limitação é a ausência de medição de vazão impedindo verificar e ajustar os parâmetros operacionais.

Palavras-chave: Tratamento de Esgotos; Sistema Anaeróbico/Aeróbico.

ABSTRACT: Isolated systems equipped with compact sewage treatment plants (CSTPs) contribute to the universalisation of sanitation services. However, their operation and maintenance is still a challenge for those with limited infrastructure and financial resources. This study assessed four ECTEs, with anaerobic treatment and aerobic post-treatment in different configurations, in order to identify how they are operated and monitored, their main limitations and whether the effluents meet the discharge standards. The results showed that all of them manage to bring the treated effluent into line with CONAMA 430/2011 standards, with an average BOD_{5.20} removal efficiency of 87.1±2.2% and disinfection with sodium hypochlorite. Three have excess sludge removed by pit-cleaning lorries and treated effluent discharged into the ground, and one uses a sludge drying bed and treated effluent for non-potable urban reuse. However, the monitoring of ECTEs is only aimed at verifying compliance with disposal standards, with no concern for evaluating technological processes. The main limitation is the lack of flow measurement, which prevents operational parameters from being checked and adjusted.

Keywords: Sewage Treatment; Anaerobic/Aerobic System.

INTRODUÇÃO

A limitada expansão das redes públicas coletoras de esgoto, aliada as pressões ambientais de não lançamento de esgotos no solo por meio de sumidouros e aos preceitos da universalização prevista na Lei 11.445/2007 (Brasil, 2007) atualizada pela Lei 14.026/2020 (Brasil, 2020), levaram a adoção de sistemas isolados de esgotamento sanitário, dotados de rede coletora, elevatória e estações compactas de tratamento de esgotos (ECTE), a fim de viabilizar ambientalmente a implantação de empreendimentos comerciais e habitacionais.

Recebido: Julho 19, 2023. Revisado: Setembro 15, 2023. Aceito: Outubro 01, 2023.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

As tendências modernas buscam ECTEs que possuam operação estável, baixo impacto ambiental (odores, ruídos e impacto visual) e que possuam capacidade de remoção de matéria orgânica e nutrientes, baixa produção de lodo, custo operacional compatível com o poder aquisitivo dos usuários, remoção de patogênicos e geração de efluente que atendam a legislação ambiental (Ruscalleda et al., 2011).

Pode-se afirmar que a tecnologia anaeróbia, atende a quase todos os requisitos das novas tendências, tais como capacidade de remoção de matéria orgânica, baixa produção de lodo, baixo custo e facilidade operacional. À luz da cinética, a digestão anaeróbia pode ser descrita como um processo de quatro etapas: hidrólise de compostos orgânicos complexos, produção de ácidos (acidogênese e acetogênese) e produção de metano (Metanogênese), podendo haver uma quinta fase (sulfetogênese), dependendo da composição do despejo a ser tratado. No entanto, os processos anaeróbios isoladamente não produzem efluentes que atendam à legislação ambiental, demandando de unidades de pós-tratamento (Santos et al., 2016; Pauli, 2018).

Existe uma variedade de opções para o pós-tratamento de reator anaeróbio, tais como filtro biológico percolador (FBP), biofiltro aerado submerso (FAS), lodo ativado e suas variantes, como o Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR), constituindo os chamados sistemas combinados anaeróbio/aeróbio (Khan et al., 2011). Vários modelos estão presentes no mercado, onde as empresas buscam aperfeiçoar o tratamento, chegando a oferecer ECTEs com todas as etapas de tratamento, inclusive a desinfecção.

Os filtros biológicos aeróbios são unidades de pós-tratamento de efluentes anaeróbios, que possuem alta eficiência, fácil operação e baixo custo. Neles a matéria orgânica é estabilizada pela ação de organismos que se aderem a um meio suporte inerte. O biofilme aderido cresce à medida que o oxigênio e o substrato orgânico são disponibilizados (Volschan, *lc.*, 2018). Dentre os filtros biológicos aeróbios utilizados no pós-tratamento de efluentes, destacam-se os filtros aerados submersos (FAS) e os filtros biológicos percoladores (FBP).

Nos FAS fluxo do afluente e dos compostos presentes no meio líquido são ascendentes, e as principais vantagens de sua utilização é a pequena produção de lodo, possibilidade de cobertura dos tanques e alta concentração de biomassa, atribuindo um tratamento eficiente (Silva, 2016). Nos FBP percoladores o efluente é inserido pela parte superior do reator, geralmente em jatos, e segue um fluxo descendente até chegar em contato com a biomassa aeróbia, que se encontra alojada no meio suporte (Buarque, 2017). Esses FBP podem ser associados a filtros submersos anóxicos, formando um sistema híbrido, onde a fase percoladora aeróbia pode promover a nitrificação e a fase submersa anóxica a desnitrificação.

O sistema de lodo ativado é utilizado em situações em que é necessária alta qualidade do efluente e disponibilidade de área limitada, e adveio da demonstração de que a simples aeração não possibilitava o completo tratamento dos esgotos, e que era necessário provocar a atividade dos microrganismos. Assim descobriu-se que retornando o lodo sedimentado no decantador secundário para o tanque de aeração, a atividade dos microrganismos era garantida (Santos, 2012). No entanto, o sistema de lodos ativados é mais mecanizado do que outros sistemas de tratamento, envolvendo uma operação mais sofisticada e gerando alto consumo de energia elétrica para aeração (Saliba, 2016).

O sistema de MBBR consiste numa tecnologia adaptada aos sistemas de lodos ativados com aeração prolongada, por meio da introdução de peças plásticas de baixa densidade e grande área superficial (biomédias) no tanque de aeração, que atuam como meio suporte para desenvolvimento da biomassa em suspensão e aderida, mantidos em constante circulação, e mistura pela introdução de ar difuso ou devido à existência de agitadores mecanizados; sem necessidade de recirculação de lodo (Water Environment Federation, 2010; Oliveira, 2008).

Os esgotos depois de tratados precisam ser desinfetados, pois quando lançados nos corpos d'água ou reutilizados, não podem representar riscos à saúde pública (Wang et al., 2012). Apesar do potencial de formação de subprodutos tóxicos, como o trihalometanos, a desinfecção de esgotos com compostos clorados é a mais utilizada (Medeiros & Daniel, 2017), principalmente o hipoclorito de sódio devido a sua capacidade de utilização sem a necessidade de armazenar grandes quantidades; custo favorável em relação à maioria dos desinfetantes; e eficiência compatível com o gás cloro.

Apesar dessas tecnologias serem bastantes conhecidas e de comprovado desempenho, quando não se tem operação realizada por profissionais capacitados, as eficiências obtidas não são compatíveis com as observadas na literatura, devido as dificuldades dos operadores de atender suas especificidades operacionais.

Silva (2018) estudou o desempenho de 3 ECTEs com 3 diferentes tecnologias, e verificou que a ECTE dotada apenas de reator anaeróbio UASB foi a que apresentou melhor resultado devido a sua simplicidade operacional gerando efluente tratado com a qualidade esperada para a tecnologia

empregada. A ECTE aeróbia de lodo ativado foi a que apresentou efluente com maior carga orgânica e nutrientes. A ECTE que combinava esses dois processos apresentou desempenho semelhante a ECTE somente com UASB. O autor justifica que embora a tecnologia aeróbia tenha maior potencial de remoção de matéria orgânica e nutrientes ela necessita de maior controle operacional, e que quando isso não acontece, leva a um menor desempenho.

Diante disso, esse trabalho objetivou comparar o desempenho de quatro ECTE em escala real, dotadas de reator anaeróbio com diferentes tecnologias de pós-tratamento aeróbio, tratando esgoto sanitário, e avaliar a rotina de controle operacional e de processos desses sistemas.

METODOLOGIA

Foram selecionadas 4 ECTE, três tratando esgoto sanitário de condomínios residenciais privados de diferentes classes sociais, e uma tratando esgoto sanitário de supermercado, empregando processos biológicos combinado, de tecnologia anaeróbia seguidas de diferentes alternativas de pós-tratamento. A Tabela 1 apresenta o resumo das tecnologias adotadas nas estações estudadas e a Figura 1 o fluxograma de cada ECTE.

Tabela 1 - Estações compactas de tratamento de esgoto monitorada

ECTE	VAZÃO	CONFIGURAÇÃO	EMPREENHIMENTO
1	0,83 m ³ /h	Reator Anaeróbio + Aeróbio (MBBR) + desinfecção	Comercial
2	1,67 m ³ /h	Reator Anaeróbio + Filtro Aerado + desinfecção	Residencial
3	10,8 m ³ /h	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados + desinfecção	Residencial
4	13,3 m ³ /h	Reator Anaeróbio + Filtro percolador + desinfecção	Residencial

A ECTE 1 trata de esgoto sanitário de um supermercado de grande porte com vazão média diária de 0,83 m³/h (0,23 L/s), população equivalente de 130 hab, composta de pré-tratamento (grade e caixa de areia), reator anaeróbio de chicanas + MBBR e desinfecção com aplicação de Hipoclorito de sódio comercial líquido com 12% de cloro ativo. O efluente tratado tem como destino final o solo por meio de valas de infiltração.

A ECTE 2 atende um prédio residencial vertical, com 50 unidades habitacionais (250 hab) de classe social média. A vazão média de 1,67 m³/h (0,46 L/s), composta de pré-tratamento (grade), reator anaeróbio tipo UASB + biofiltro aerado submerso (BAS) de leito fixo de PVC, decantação secundária e desinfecção por meio de hipoclorito de sódio comercial a 12%. O efluente tratado é lançado no talvegue de drenagem natural do terreno, próximo ao residencial.

A ECTE 3 atende um condomínio residencial vertical com 432 unidades habitacionais (1730 hab) de classe social média-baixa, vazão média de 10,8 m³/h (3,0 L/s), constituída de caixa de gordura, gradeamento, caixa de areia, duas linhas paralelas com reator UASB seguido de lodos ativados com decantador secundário em unidade única, e desinfecção com hipoclorito de sódio comercial a 12%. O efluente tratado é lançado no talvegue de drenagem natural do terreno, próximo ao condomínio.

A ECTE 4 atende um condomínio residencial horizontal composto por 285 unidades residenciais (1100 hab) de padrão alto, vazão média diária 13,3 m³/h (3,7 L/s), compõe-se de gradeamento fino, caixa de areia, três linhas de tratamento em paralelo, com reator UASB seguido de filtro biológico percolador aeróbio/anaeróbio com meio suporte fixo de PVC, e desinfecção com cloro com hipoclorito de sódio comercial a 12%. O efluente tratado tem como destino final o reuso não potável urbano irrestrito.

• Parâmetros e frequência de monitoramento

O levantamento de dados das ECTEs foi realizado utilizando-se dados secundários fornecidos pelas empresas responsáveis pela operação e monitoramento das mesmas, referentes as amostras de esgoto bruto e tratado coletados na entrada e saída das ECTEs, respectivamente, com periodicidade mensal ao longo de um ano (janeiro a dezembro de 2019), o que resultou em 12 coletas em cada ponto.

A seleção dos parâmetros de monitoramento levou em conta os dados secundários disponíveis em cada ECTE, como apresentado na Tabela 2. Essas análises foram realizadas em laboratórios comerciais certificados, que utilizam as metodologias contidas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association, 2012).

Tabela 2 - Quantidade de análises e parâmetros avaliados em cada ECTE.

Parâmetro	ECTE 1		ECTE 2		ECTE 3		ECTE 4	
	Bruto	Trat.	Bruto	Trat.	Bruto	Trat.	Bruto	Trat.
Temperatura	-	12	-	12	-	12	12	12
Turbidez	-	-	-	12	-	12	12	12
Sól. sediment.	-	12	-	12	-	12	12	12
pH	-	12	-	12	-	12	12	12
DBO _{5,20}	12	12	12	12	12	12	12	12
DQO	-	-	-	-	-	-	12	12
Cloro residual livre	-	-	-	3	-	5	-	12
Termotolerantes	-	-	-	12	-	12	12	12

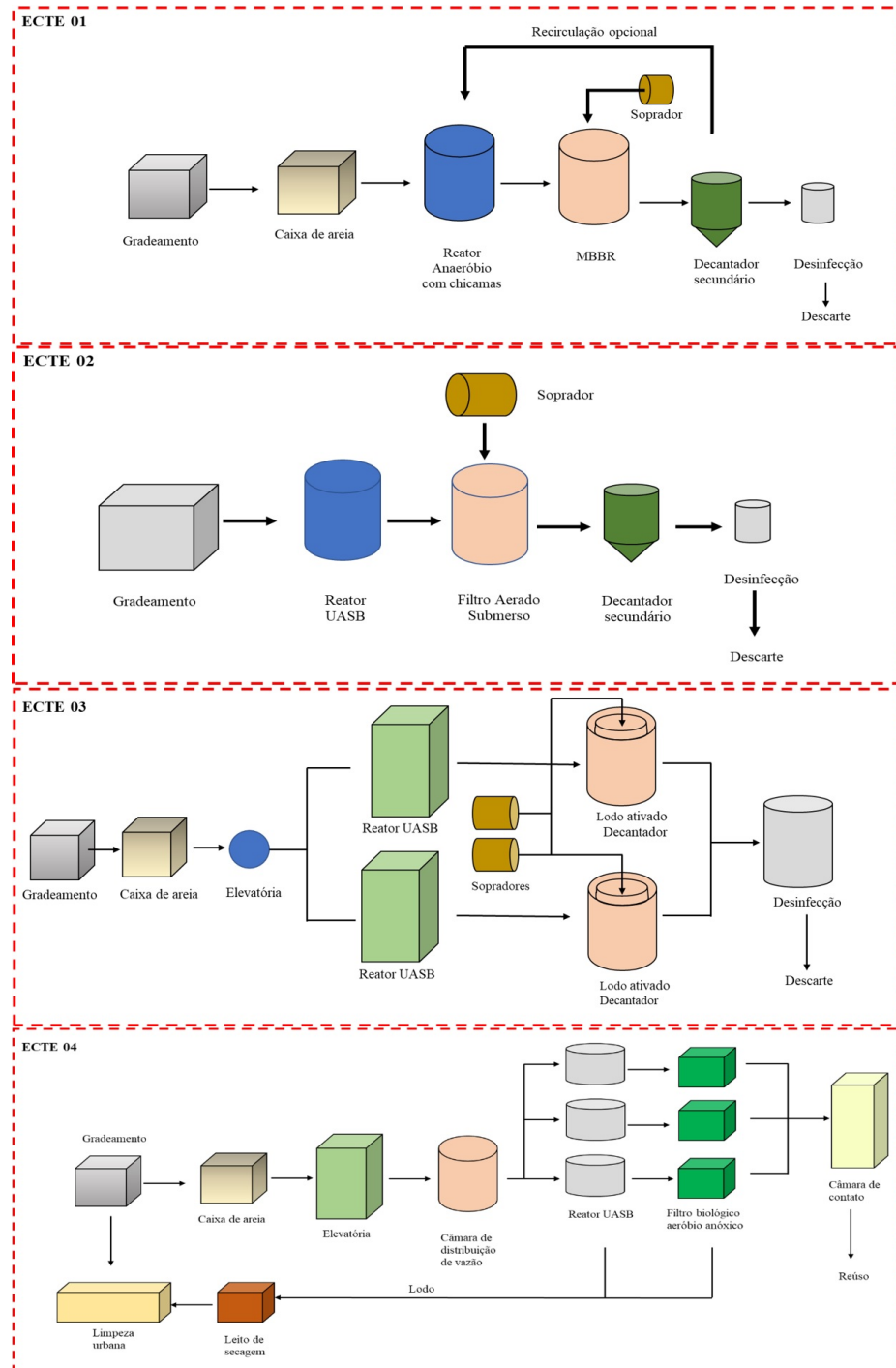


Figura 1 - Fluxogramas da ECTEs estudadas.

• Avaliação dos dados

A avaliação do esgoto bruto foi feita apenas em relação da concentração de matéria orgânica medida como DBO e comparada a tipologia citada por Metclaf & Eddy (2016) e Jordão & pessoa (2017), para esgotos de concentração alta (DBO > 400 mg/L), média (130 mg/L < DBO < 400 mg/L) e baixa (DBO < 130 mg/L).

Como as diferentes associações tecnológicas estudadas são tecnologias conhecidas e de comprovada eficiência, para entender a atuação do controle operacional nos resultados esperados, foi avaliada a capacidade de produzir efluente tratado de acordo com o exigido pelas Resoluções 430/2011 do CONAMA (Brasil, 2011), que dispõe sobre o lançamento de efluentes tratados em corpos d'água receptores, CONAMA 274/2000 (Brasil, 2000) que define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras, e CONAMA 503/2021 (Brasil, 2021) que estabelece padrões de qualidade para reuso, em sistemas de fertirrigação.

O desempenho das ECTEs foi avaliado pelo cálculo das eficiências de remoção de matéria orgânica (medida como DBO_{5,20}) e foi avaliada tanto mensalmente quanto pela média geral do período monitorado, cujos resultados foram comparados entre si e com dados da literatura.

Os dados das ECTEs foram organizados no programa Microsoft Office Excel versão 2019 e avaliados aplicando uma estatística descritiva básica, envolvendo o cálculo valor médio anual e o desvio padrão. Foi feita, também a análise a partir de gráficos que mostram a variação temporal dos parâmetros avaliados ao longo dos 12 meses de estudo.

• Levantamento operacional das ETEs

Para o levantamento operacional das ECTEs foi feita entrevista com os responsáveis pelas empresas que operam as ECTEs e realizadas visitas técnicas, nas quais se levantou junto com os operadores o estado de conservação dos equipamentos, e informações sobre as rotinas operacionais das unidades de tratamento buscando-se identificar como elas são operadas, se há acompanhamento de cada etapa dos processos biológicos (necessidade nutricional, oxigênio dissolvido, características e idade do lodo) e físico químico (dosagem de cloro e CRL), as principais limitações, dificuldade e facilidade operacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

• Caracterização do esgoto bruto e tratado

As características físico-químicas e bacteriológicas do esgoto bruto e tratado, das 4 ECTE estudadas, estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Síntese da caracterização do esgoto bruto e tratado nas ECTE estudadas

Parâmetro	ECTE 1		ECTE 2		ECTE 3		ECTE 4	
	RAnC + MBBR		UASB+BAS		UASB+LA		UASB+FP	
	bruto	Trat.	Bruto	Trat.	Bruto	Trat.	Bruto	Trat.
Temperatura (°C)	-	313±0,7	-	31± 1,4	-	31,3± 0,6	30,1± 2,6	30,4±2,0
Turbidez (UNT)	-	-	-	62±51	-	102±68	136±95	48±30
Sól. sediment. (mg/L)	-	<1	-	<1	-	<1	1,2±0,8	0,15±0,12
pH	-	7,43±0,25	-	7,05± 0,31	-	7,18±0,32	7,1±0,41	6,9±0,29
DBO _{5,20} (mg/L)	990±433	118±98	746±418	64±36	700±290	92±77	251±129	31±20
DQO (mg/L)	-	-	-	-	-	-	688± 412	133±53
Cloro residual livre (mg/L)	-	-	-	7,8 ± 2,6	-	6,9 ± 3,0	-	0,3±0,3
Termotolerantes (NMP/100mL)	-	-	-	352± 334	-	194± 237	>160.000	59.333 ± 61.303

Pela Tabela 2 verifica-se que as 4 ECTEs operaram a temperatura ambiente, nas mesmas faixas de temperatura mesofílica, e, portanto, este fator não interferiu na diferenciação do desempenho entre elas.

Com relação a turbidez, a ECTE 1 não monitora esse dado, certamente porque infiltra o efluente tratado no solo e não está sujeita a CONAMA 430/2011 (Art.2), no entanto, o órgão ambiental local

exige o mesmo padrão da CONAMA 430/2011 para esses casos. A ECTE 2 e a ECTE 3 que possuem aeração forçada, deixaram uma turbidez remanescente média de 62 ± 51 UNT e 102 ± 68 UNT, respectivamente, enquanto na ECTE 4 que possui aeração natural foi menor, de 47 ± 29 UNT. Os gráficos da Figura 2 apresentam a variação temporal da turbidez. A turbidez não impõe restrição de seu uso para irrigação.

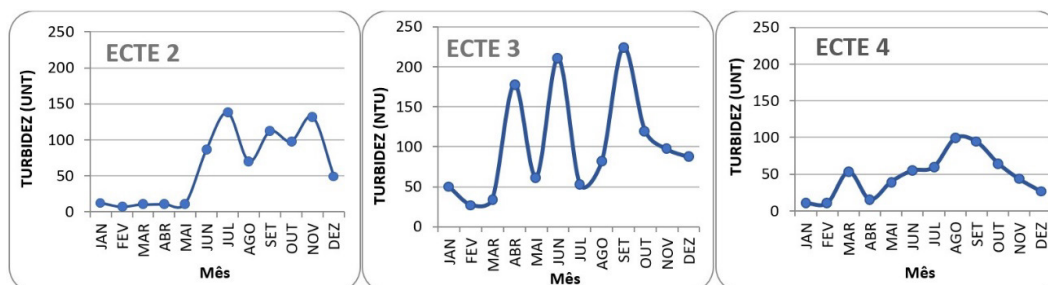


Figura 2 - Variação da turbidez remanescente no efluente tratado nas ECTE's estudadas

Os valores médios de pH, do efluente tratado, durante o período monitorado, se mantiveram em torno de faixa de 7,0. A Resolução CONAMA 430/2011 (Brasil, 2011) cita que o pH de lançamento do efluente tratado deve ser de 5 a 9.

Segundo Metcalf & Eddy (2016), tipicamente o pH varia de 6 e 9, para esgoto bruto e 6,5 a 8,5 para esgoto tratado, dependendo do processo de tratamento empregado. Para Silva & Nour (2005), essa faixa é considerada ótima para as atividades das arqueas metanogênicas, que estão presentes nos processos anaeróbios, pois não afeta a eficiência do reator. Dessa feita, o pH do afluente das quatro estações de tratamento se mantiveram na faixa adequada para as atividades biológicas anaeróbias, favorecendo a remoção de matéria orgânica.

Por outro lado, o pH está intimamente relacionado com a alcalinidade. No processo de amonificação, que acontece tanto em ambiente anaeróbio quanto aeróbio, ocorre a geração de alcalinidade resultando na tendência de aumento do pH. Já nos processos aeróbios que visam a nitrificação, esse processo consome a alcalinidade resultando numa tendência de queda do pH.

O valor próximo a neutralidade observado no efluente dos esgotos tratados pode ter dupla interpretação, ou havia alcalinidade suficiente para a nitrificação de forma que o processo de nitrificação tenha acontecido e a aplicação de hipoclorito para desinfecção tenha corrigido o pH deixando-o levemente alcalino, ou o processo de amonificação nos reatores anaeróbios não foi completo, e continuou acontecendo nas unidades aeróbias gerando alcalinidade, sem o estabelecimento de uma completa nitrificação.

Como o valor do N-amoniaco total não é um parâmetro de lançamento exigido pela CONAMA 430/2011 (§1 do Art.21) para lançamento de esgoto sanitário em corpos de água e nem para irrigação, ele não é monitorado. No entanto, sua importância vai além do controle de descarte, pois o nitrogênio na forma amoniaco ele é gerado em todas as ECTE e interfere no processo de desinfecção com cloro, uma vez que o cloro reage com o nitrogênio amoniaco formando cloraminas de menor poder oxidante, resultando num maior consumo de produto químico para desinfecção.

A DBO e a DQO ainda são os parâmetros mais utilizados para dimensionamento e avaliação de desempenho de estações de tratamento de efluentes. A DBO é responsável pela estimativa da quantidade de matéria orgânica facilmente degradável presente no esgoto, enquanto a DQO representa o conjunto da fração biodegradável e de difícil degradação. A Resolução 430/2011 do CONAMA estabelece o valor máximo de 120 mg/L para o esgoto tratado e a possibilidade desse valor ser ultrapassado, desde que ocorra uma eficiência de remoção mínima de DBO de 60%. Os gráficos do perfil temporal com a variação da $DBO_{5,20}$ das 4 ETES estudadas estão apresentados na Figura 3.

A ECTE 1, dotada de reator anaeróbio de chicanas seguido de MBBR, apresentou uma DBO de entrada média de 989 ± 432 mg/L, demonstrando a grande variabilidade nos dados, o mês de maior e menor valor de DBO foi, respectivamente, 2.037 mg/L e 490 mg/L, nos meses de fevereiro e junho, nessa ordem. A DBO média de saída foi de 118 mg/L, abaixo de 120 mg/L conforme preconiza a CONAMA 430/2011. O menor e maior valor de DBO de saída foram 25 mg/L e 417 mg/L, respectivamente, nos meses de maio e abril, nessa ordem, não atendendo esse mês o valor máximo de 120 mg/L de DBO.

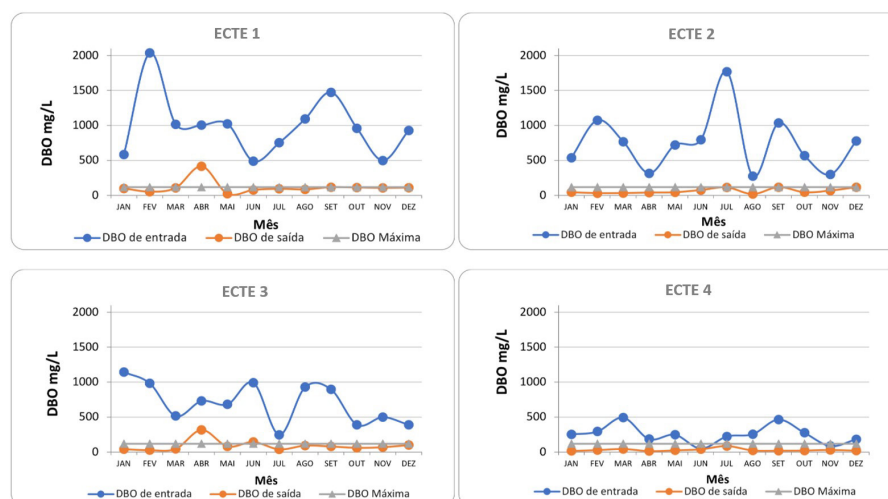


Figura 3. Variação temporal da DBO das ECTEs ao longo do tempo.

A DBO no efluente bruto da ECTE 2, dotada de reator UASB seguido de Filtro biológico aeróbio, apresentou concentração entre 296 e 1.074 mg/L, com valor médio de 746 ± 418 mg/L, enquanto no efluente tratado o valor da DBO oscilou entre 32 mg/L e 118 mg/L, com valor médio de 64 ± 36 mg/L. O efluente tratado atendeu sempre ao respectivo valor limite de DBO previsto na Resolução CONAMA nº 430/2011, indicando que essa configuração foi capaz de remover a carga orgânica presente nos efluentes domésticos.

De modo análogo, a DBO no efluente bruto da ECTE 3, dotada de reator UASB seguido de lodo ativado convencional, apresentou concentração entre 247 mg/L e 982 mg/L, com valor médio de 700 ± 290 mg/L, enquanto no efluente tratado o valor da DBO oscilou entre 28 mg/L e 317 mg/L, com média de 92 ± 78 mg/L. O efluente tratado atendeu sempre ao respectivo valor limite de DBO previsto na Resolução CONAMA nº 430/2011, exceto no mês de abril cujo valor foi superior ao limite máximo de 120 mg/L de DBO para lançamento.

Na ECTE 4, dotada de reator UASB seguido de filtro biológico híbrido, com camada superior funcionando como filtro percolador aeróbio, e uma camada inferior funcionando como filtro anaeróbio submerso, o valor médio da DBO do esgoto bruto foi de DBO média de 251 ± 129 mg/L, com valor máximo de 493 mg/L e valor mínimo de 50 mg/L. Já o efluente tratado o valor médio foi de 31 ± 20 mg/L mostrando que, durante o período estudado, o efluente tratado atendeu ao valor limite de DBO previsto na Resolução CONAMA nº 430/2011, indicando que essa configuração foi capaz de manter o enquadramento do efluente tratado dentro dos padrões de lançamento.

O reuso utilizado pelos efluentes dessa ECTE 4 se encaixa na classe 2 da NBR 13.696/97 (lavagens de pisos, calçadas e irrigação de jardins) e na modalidade do item I do Art. 3 da Resolução 54/2005 (Brasil, 2005) do CNRH (reuso não potável para fins urbanos: irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos, etc), logo seu efluente também deve atender aos padrões para esse reuso. A Resolução 54/2005 do CNRH define apenas as modalidades de reuso, não estabelece os padrões de qualidade requeridos. A NBR 13.696/97 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997) não faz referência ao valor da DBO. Recentemente a CONAMA 503/2021, estabeleceu como padrões de qualidade para reuso, em sistemas de fertirrigação, os parâmetros e valores máximos estabelecidos na Resolução CONAMA nº 430/2011, sendo assim a DBO remanescente da ECTE atende aos padrões de reuso e de descarte.

Com relação a DQO, somente a ETE 4 faz o monitoramento, os dados do esgoto bruto mostram valor médio anual de 688 ± 412 mg/L, com relação DQO/DBO de 2,74, considerada intermediária (2,5 a 4), indicando o aporte de uma carga orgânica de difícil degradação. Já para as características do esgoto tratado mostram que a relação DQO/DBO de 4,3, indicando que a matéria orgânica remanescente da ECTE 4 já não é de fácil degradação, como a presente no esgoto bruto quando a relação era de 2,74.

Avaliando a presença de matéria orgânica medida como DBO, verifica-se que, de acordo de Metcalf & Eddy (2016), o esgoto bruto da ECTE 1 que trata esgoto sanitário de um supermercado e das ETEs 2 e 3 que tratam esgotos sanitário de condomínios verticais de classe média tem características de esgoto sanitário de alta concentração ($DBO > 400$ mg/L), enquanto o esgoto sanitário bruto da ETE 4, que é proveniente de um condomínio residencial horizontal de classe alta, tem característica típica de esgoto sanitário de média concentração (100 mg/L $< DBO < 400$ mg/L).

Essa característica de esgoto de média concentração da ECTE 4, inferior as das demais ECTEs, pode estar associada a infiltrações na rede coletora, pois é a única cuja rede coletora está em zona

baixa com lençol freático alto, ou pelo maior consumo *per capita* de água pela população da alta renda, ou ainda pelo descarte de água de manutenção de piscinas na rede coletora que dilui o esgoto gerado.

Um dos objetivos do tratamento terciário de efluentes é a eliminação de patógenos, e a cloração ainda é a alternativa mais atraente, em razão de maior domínio tecnológico e viabilidade econômica. Os gráficos da Figura 4 apresenta a variação temporal do cloro residual e do número de coliformes termotolerantes durante o período avaliado.

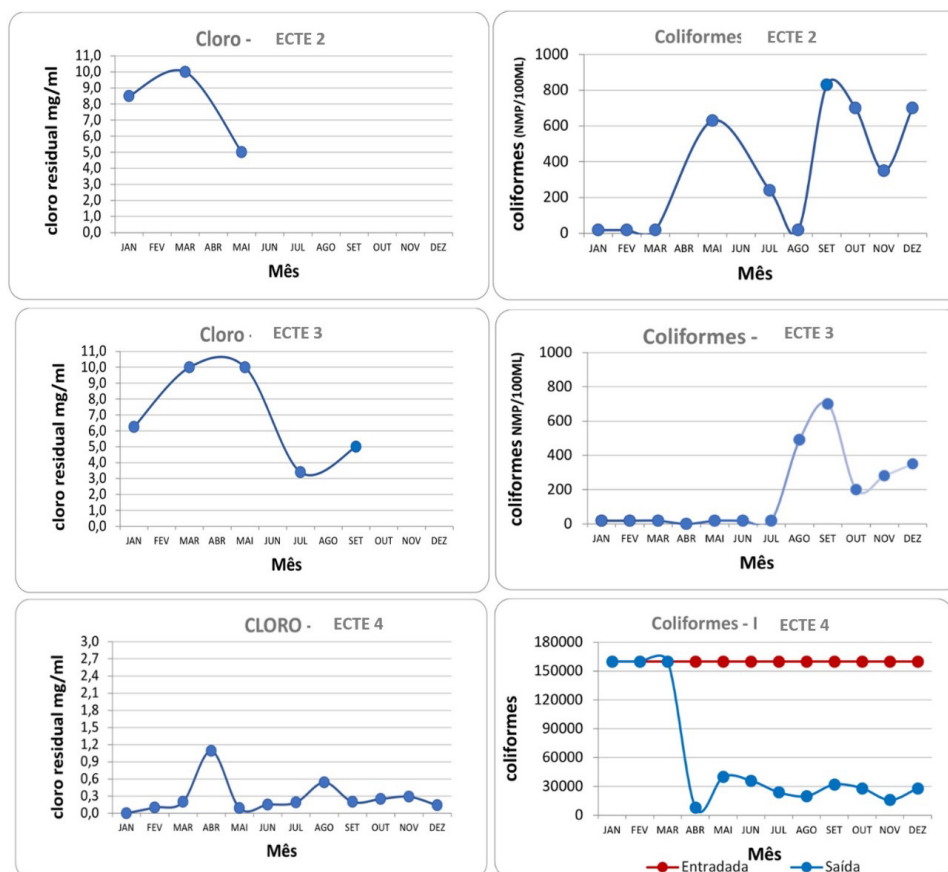


Figura 4 - Variação temporal de CRL e Coliformes ao longo do tempo.

Para as 4 ETEs estudadas, a ETE 1 embora faça a desinfecção com hipoclorito de sódio, ela não fez controle do cloro residual. Apenas as ETEs 2, 3 e 4 que realizam esse controle. Para as ETEs 2 e 3 verifica-se que o cloro residual está acima dos valores citados na literatura para efluentes tratados. Já para a ETE 4 os valores estão abaixo do recomendado, inclusive para os padrões de reúso que cita o valor mínimo de 1,0 mg/L (USEPA, 2012).

Verifica-se que as ETEs com elevadas concentrações de CRL, superiores aos valores citados na literatura de 1 a 3 mg/L (Silva & Souza, 2011), resultaram em número de termotolerantes inferiores a 10^3 e dentro dos padrões de balneabilidade citado pela CONAMA 274/2000 de 1.000 NMP/100 mL. No entanto os elevados valores de CRL, resultam de uma dosagem de hipoclorito de sódio acima da necessária, que apesar de promover uma eficiente desinfecção, resulta em desperdício de produto químico e, devido a matéria orgânica e turbidez remanescente, contribui para a formação de subprodutos tóxicos.

Já a ETE 4 que apresentou CRL inferior ao valor citado pela literatura apresentou número de termotolerantes acima dos padrões de balneabilidade, fora do requerido para o reúso urbano não potável de 500 NMP/100 mL (NBR 13.969/97) e de reúso em outras culturas e pastagens de 10.000 NMP/100mL (CONAMA N° 503/2021). Percebe-se na Figura 4 que a partir do mês de abril os valores de coliformes no efluente caíram, após ter sido substituída a cloração por meio de pastilhas de cloro pela aplicação de hipoclorito de sódio, com dosagens que foram sendo corrigidas buscando um CRL de 2 mg/L, na faixa (2,0-2,5 mg/L) em que Silva & Souza (2011) observaram maiores remoções de coliformes na desinfecção de esgoto tratado em filtro anaeróbico, de forma a se obter termotolerantes inferiores a 10^3 , fato alcançado somente no ano subsequente.

• Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica

Não existe apenas uma variável responsável pela avaliação do desempenho de uma ETE e da qualidade e variabilidade do efluente tratado. De maneira geral a eficiência de uma ETE depende das variações na carga afluente, das condições ambientais nos reatores, da natureza do esgoto a ser tratado, da presença de substâncias tóxicas, da variabilidade inerente aos processos de tratamento biológico, entre outros. No entanto para as ETEs estudadas, como apenas a DBO é monitorada, a avaliação do desempenho foi feita apenas em termos de remoção de matéria orgânica, como DBO.

Além disso, a avaliação do desempenho deve ser feita para cada unidade componente da ETE, para avaliar os diferentes processos que estão interligados, ou seja, a saída de uma é a entrada de outro, e deve se basear na visão sistêmica proposta pela ISO 9001 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000). No entanto nas ECTEs estudadas essa avaliação é apenas de forma global, considerando o esgoto bruto e tratado, cujos resultados constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores comparativos da eficiência atingida nas ECTEs em estudo.

Parâmetro	ECTE 1	ECTE 2	ECTE 3	ECTE 4
	RAnC + MBBR	UASB+BAS	UASB+LA	UASB+FPH
DBO esgoto bruto, mg/L	990±433	746±418	700±290	251±129
DBO efluente tratado, mg/L	118±98	64±36	92±78	31±20
Eficiência de remoção de mat. Orgânica, %	86±10	90±5	85±11	87±12

As 4 ECTEs apresentaram eficiências semelhantes, 87±2%, onde a ECTE 1 (RAC+MBBR) apresentou remoção média de DBO de 86±10%, a ECTE 2 (UASB+BAS) de 90±5%, a ECTE 3 (UASB+LA) de 85±11% e a ECTE 4 (UASB+FPH) de 87±12%. Todas elas superaram a eficiência mínima de 60% estabelecida pela CONAMA 430/2011.

Embora as condições operacionais sejam distintas, aparentemente a ECTE que operou com maior estabilidade de remoção de matéria orgânica foi a ECTE 2 com eficiência de 90% e desvio padrão de ±5%. Mas, de maneira geral, eficiência das ECTEs aeradas mecanicamente e a eficiência da ECTE com aeração natural, são da mesma ordem de grandeza. Certamente essas tecnologias aeradas mecanicamente necessitam de maior controle operacional, como por exemplo o controle de oxigênio dissolvido, e quando não acontece, essas tecnologias não alcançam a eficiência esperada.

A Figura 5 apresenta a variação temporal da eficiência das ECTEs estudadas.

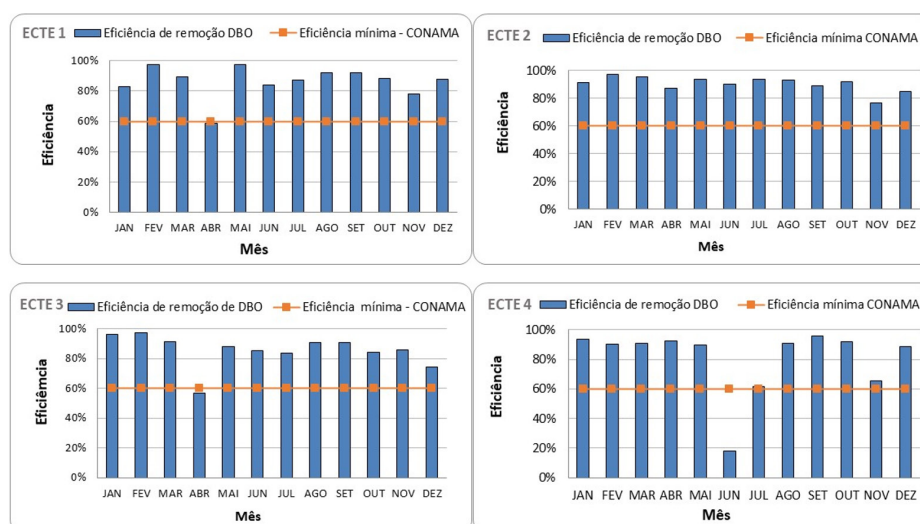


Figura 5 - Variação temporal da eficiência das ECTEs ao longo do tempo.

As eficiências observadas nas 4 ECTEs são maiores que as encontradas por Silva (2018), que estudou o desempenho de 3 ECTEs, também em condições operacionais distintas, e com 3 diferentes tecnologias (UASB, lodo ativado, e reator híbrido anaeróbio/aeróbio). O autor verificou que a ECTE dotada apenas de reator anaeróbio UASB foi a que apresentou melhor resultado (remoção de 72% de DBO e DQO) sendo também a de maior simplicidade operacional gerando efluente tratado com a qualidade esperada para a tecnologia

empregada. A ECTE com tecnologia de lodo ativado aeróbio foi a que produziu efluente com maior carga orgânica e apresentou menor eficiência (remoção de 67% de DBO e DQO) e a ECTE que combinava os processos anaeróbio seguido de aeróbio apresentou desempenho semelhante a ECTE somente com UASB (remoção de 78% DBO e 76% de DQO). O autor relata que o maior controle exigido pelo processo aeróbio aliado ao custo energético e a baixa qualificação da mão de obra operacional realizada por prestadores de serviços gerais, limitam o seu desempenho.

• Controle operacional e de processos das ECTEs

A operação das ECTEs é feita por profissionais de serviços gerais assessorados por empresas especializadas em operação de ETEs. Embora as empresas dominem os processos empregados, os operadores os desconhecem. Durante as visitas verificou-se que nenhuma delas dispõe de dispositivo de medição de vazão, a rotina operacional diária envolve basicamente a remoção de sólidos grosseiros retidos nas grades e a reposição dos bombonas de hipoclorito de sódio.

Embora três delas utilizem aeração forçada, em nenhuma há o monitoramento do oxigênio dissolvido no tanque de reação, o que pode estar limitando a eficiência dessas unidades, cujos sopradores de ar também não funcionam 24/dia, devido aos custos de energia elétrica e paralisação devido a quebra e manutenção desses equipamentos. Em nenhuma delas se avalia a necessidade nutricional (relação C:N:P) dos processos anaeróbios e aeróbios, e não se faz análise da qualidade do lodo.

Nas três ECTEs com aeração forçada, a necessidade de descarte de lodo é feita facilmente por caminhão limpa fossas sempre que se percebe, visualmente, que há acúmulo de lodo em excesso, tanto das unidades anaeróbias quanto das aeróbias. Na ECTE 4 o descarte de lodo do reator UASB é feito pelo monitoramento da altura da manta de lodo, com descarte em leito de secagem, e depois de seco é encaminhado ao sistema de limpeza urbana, e nos filtros percoladores híbridos a limpeza é feita manualmente com frequência anual ou sempre que se percebe a colmatção do meio suporte, sendo essa limpeza a maior dificuldade operacional apontada. Ressalta-se que, a função do tratamento aeróbio nas associações estudadas restringe-se sobretudo à remoção de compostos solúveis remanescentes no efluente anaeróbio, o que leva a menor formação e descarte de lodo.

Como nenhuma delas dispõe de dispositivo de medição de vazão, impossibilita a verificação de possíveis sobrecargas hidráulicas e ajuste de dosagem de produtos químicos, como por exemplo a dosagem de hipoclorito, que nas ECTE 1, 2 e 3 é feita uma superdosagem, e apenas a ECTE 4 busca-se ajustar a dosagem aplicada ao CRL em de 2 mg/L.

Quanto ao monitoramento, só a ECTE 4 avalia o esgoto bruto e o tratado, nas demais, ECTE 1, 2 e 3, este monitoramento é feito somente para o efluente tratado. De forma geral o monitoramento operacional visa tão-somente o atendimento dos padrões de lançamento da CONAMA 430/2011. Os parâmetros de controle são insuficientes para avaliar os processos tecnológicos, não se sabe a contribuição de cada unidade para a eficiência global do processo. As principais limitações apontadas é o custo das análises laboratoriais para ampliar o monitoramento para o controle dos processos, já que a meta contratual é apenas atender as exigências do órgão ambiental.

As entrevistas com as diferentes equipes mostraram que a ECTE 1 (RAnC+MBBR), operando sem recirculação de lodo, como a de fácil operação, juntamente com a ECTE 4 (UASB+FPH), enquanto as ECTE 2 (UASB+LA) e 3 (UASB+BAS) as de maior dificuldade. A ECTE 2 pelo fato de ser construída totalmente enterrada em ambiente confinado no subsolo do prédio com difícil acesso operacional, e a ECTE 3 pelo fato do sistema de lodo ativado ter uma configuração diferenciada, o tanque de reação aerado, com biomassa suspensa, fica no centro do reator e o decantador secundário fica no anel externo que contorna o tanque de aeração, o que torna a operação e monitoramento do sistema mais difícil, inclusive no que diz respeito a recirculação do lodo decantado para o tanque de reação.

CONCLUSÕES

As quatro ETEs apresentaram eficiências de remoção de matéria orgânica semelhantes $87,2 \pm 2,2\%$, tanto para as ETEs aeradas mecanicamente quanto para a ETE com aeração natural, com baixa concentração de sólidos sedimentáveis no efluente tratado, o que mostra que os 4 sistemas estudados, com diferentes tecnologias de pós-tratamento, tanto com biomassa suspensa quanto com biomassa aderida, apresentam capacidade de retenção dos sólidos sedimentáveis satisfatórias e geram efluentes que atendem aos padrões de lançamento. Como a função do tratamento aeróbio nas associações estudadas restringe-se sobretudo à remoção de compostos solúveis remanescentes no efluente anaeróbio, o que leva a menor formação de lodo, o descarte do excesso de lodo não tem sido um problema operacional.

O monitoramento da qualidade do efluente das ETEs estudadas visa apenas verificar o cumprimento dos padrões de descarte, sem preocupação com o monitoramento dos processos anaeróbio e aeróbio. A principal limitação do controle operacional ocorre pelo custo da energia elétrica dos aeradores e ausência de medição de vazão afluente as ETEs o que impede verificar os parâmetros operacionais e o ajuste da dosagem de hipoclorito de sódio.

A rotina operacional sem o devido controle dos processos biológicos levam as 4 ECTEs apresentarem eficiências e qualidade do efluente tratado semelhantes, indicando que, sob essas condições operacionais, a tecnologia aplicada no pós-tratamento e a forma de aeração não interfere na eficiência de remoção de matéria orgânica. A principal limitação relatada quanto ao controle de processos é o custo das análises laboratoriais.

REFERÊNCIAS

- American Public Health Association – APHA. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). Washington: APHA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1997). *Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação: 13.969/97*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2000). *Sistemas de gestão da qualidade: NBR ISO 9001*. Rio de Janeiro.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2000). Resolução nº 274 de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 3 de março de 2020, de http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=272
- Brasil. Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. (2005). Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para prática de reúso direto não potável de água. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 3 de março de 2020, de <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0054-281105.PDF>
- Brasil. (2007). Lei nº. 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 3 de março de 2020, de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2011). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho CONAMA. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 3 de março de 2020, de http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627
- Brasil. (2020). Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 3 de março de 2020, de https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/14026.htm#view
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2021). Resolução nº 503 de 14 de dezembro de 2021. Define critérios e procedimentos para o reúso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 3 de março de 2020, de http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=813
- Buarque, P. M. C. (2017). *Avaliação da remoção de micropoluentes emergentes e nitrogênio em sistemas anaeróbios e microaeróbios seguidos de filtros biológicos percoladores sujeitos à aeração natural e forçada* (Tese de doutorado). Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.
- Jordão, E. P., Pessoa, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 8. ed. RIO DE JANEIRO: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.
- Khan, A. A., Gaur, R. Z., Tyagi, V. K., Khursheed, A., Lew, B., Mehrotr, I., & Kazm, A. A. (2011). Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: a review - Resources. *Conservation & Recycling*, 55(12), 1232-1251.
- Medeiros, R. C., & Daniel, L. A. (2017). Cloração de esgoto sanitário: variação de cloro residual e o uso de parâmetros facilmente mensuráveis na indicação de *breakpoint*. *Revista DAE*, 87-98 <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2016.030>
- METCALF & EDDY. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. 5. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2016, 1980 p. ISBN 978-85-8055-523-3. (Tradução: Ivanildo Hespagnol e José Carlos Mierzwa).

- Oliveira, D. V. M. (2008). *Caracterização dos Parâmetros de Controle e Avaliação de Desempenho de um Reator Biológico com Leito Móvel (MBBR)* (Dissertação de mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Pauli, A. R. (2018). *Tratamento em duas fases na purificação de efluentes de lixiviados pela integração dos processos de eletrocoagulação e oxidação biológica* (Tese de doutorado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo.
- Ruscalleda, M., Balaguer, M., Colprim, J., Pellicer-Nàcher, C., Ni, B. J., Smets, B., Sun, S. P., & Wang, R. (2011). 6.27 - *Biological Nitrogen Removal from Domestic Wastewater*. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00533-X>.
- Saliba, P. D. (2016). *Avaliação do desempenho de sistema de tratamento de esgoto sanitário composto de reator UASB seguido de lodo ativado: estudo de caso da ETE Betim Central-MG* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Santos, E. M. A. et al. Reator anaeróbio tipo UASB conjugado com processo Fenton para a remoção de cor e demanda química de oxigênio de água residuária sintética de indústria têxtil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.22, n. 02, 2016.
- Santos, L. S. (2012). *A influência da salinidade nos processos de tratamento de efluentes por lodos ativados* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Silva, A. C. R. (2018). *Caracterização e classificação de reúso dos efluentes tratados em estações compactas no município de Maceió* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- Silva, F. J. A., & Souza, R. O. (2011). Turbidez e cloro residual livre na monitoração de ETE tipo tanque séptico seguido de filtro anaeróbio. *Acta Scientiarum. Technology*, 33(4), 407-413. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i4.9603>.
- Silva, G. H. R.; Nour, E. A. A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio: Sistema de baixo custo para tratamento de esgotos de pequenas comunidades. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.2, p.268-275, 2005.
- Silva, T. M. R. (2016). *Aplicação de sistema combinado por filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso ao tratamento de esgotos sanitários de unidades residenciais unifamiliares* (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília, Brasília.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Guidelines for water reuse. U. S. Washington, DC: EPA, 2012.
- Volschan, Ic. (2018). *Reator UASB*. Recuperado em 3 de março de 2020, de <http://www.saneamento.poli.ufrj.br/index.php/br/infraestrutura/reator-usab>
- Water Environment Federation – WEF. (2010). *Biofilm reactors, water environment federation manual of practice* (No. 35). Alexandria, Virginia: WEF Press.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., Han X. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw, *Bioresource Technology*, Volume 120, 2012, Pages 78-83, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>.

Contribuições dos autores:

Ana Karoline de Almeida Silva: responsável pelo levantamento de dados de campo, e tratamento dos dados os quais fazem parte de sua dissertação de mestrado.

Nélia Henrique Callado: responsável pela supervisão e acompanhamento do trabalho de campo, assim como da análise de dados com foco na qualidade das águas e correção geral do artigo.

Vladimir Caramori Borges de Souza: responsável pela supervisão e acompanhamento do trabalho de campo, assim como da análise de dados com foco na análise estatística e correção geral do artigo.