

Avaliação do desempenho de manta geotêxtil em reator em batelada sequencial no tratamento de esgoto sanitário

Performance evaluation of the geotextile blanket in sequential batch reactor in wastewater treatment

Oder Luiz Sousa Junior^{1*} , Carlos Gomes da Nave Mendes¹ , Amanda Rodrigues Inácio² 

RESUMO

No presente trabalho, foi avaliado o desempenho de um sistema de lodo ativado em batelada, com módulo de filtração, proporcionado por uma manta geotêxtil, na remoção de matéria orgânica presente em esgoto sanitário. O reator em escala piloto tinha volume útil de 85 L e foi operado durante 182 dias, com tempo total de ciclo de 24 horas de duração e idade do lodo (θ_c) de 25 dias. O sistema foi composto de um reator convencional (SBI), utilizado como controle e operado nas mesmas condições que o SM1, o qual utilizou a filtração em manta geotêxtil. Para confecção dos três módulos de filtração, foi utilizada uma manta sintética não tecida combinada com três tipos de espaçadores: tela antiderrapante em poliéster com revestimento em PVC (etapa I) durante 56 dias, geomanta tridimensional de filamentos de polipropileno termosoldados (etapa II) durante 49 dias e manta acrílica 100% poliéster (etapa III) durante 76 dias. A concentração de oxigênio dissolvido (OD) manteve-se na faixa de 3 mgO₂L⁻¹, a relação alimento (A)/microrganismo (M) variou de 0,2 a 0,1 gDBO₅gSSV⁻¹d⁻¹, e a carga orgânica média aplicada mudou de 0,194 a 0,267 kgDQO.m⁻³.d⁻¹. A remoção da turbidez manteve-se na faixa de 97%, a de matéria orgânica em termos de demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) foi de 93% e entre 87 e 93% para o parâmetro demanda química de oxigênio (DQO), com o reator SM1 apresentando valores de eficiência e estabilidade operacional superiores ao SBI.

Palavras-chave: lodos ativados; biorreator com membranas; manta sintética não tecida; aeração prolongada.

ABSTRACT

This work evaluated the performance of a batch activated sludge system with a filtration module, provided by a geotextile blanket to remove organic matter present in sewage. The pilot-scale reactor had a useful volume of 85L, and it was operated for 182 days, with a total cycle time of 24 hours, and sludge age (θ_c) 25 days. The system was based on a conventional controller (SBI), used as a control and operated under the same conditions as the reactor (SM1) using geotextile blanket filtration. The preparation of the three filtration modules was applied to a non-woven synthetic blanket combined with three types of spacers: PVC-coated non-slip polyester mesh (Step I) for 56 days, three-dimensional geo-mat of thermosolded polypropylene filament (Step II) for 49 days, and 100% polyester acrylic blanket (Step III) for 76 days. The OD concentration remained in the range of 3 mgO₂L⁻¹, an F/M ratio ranging from 0.2 to 0.1 gBOD₅gVSS⁻¹d⁻¹ and the organic loading rate average applied ranged from 0.194 to 0.267 kg COD / m³.d⁻¹. Turbidity removal remained in the range of 97%, and the organic matter removal in terms of BOD₅ was 93%, and from 87 to 93% in terms of COD, with SM1 reactor showing efficiency and stability values higher than SBI.

Keywords: activated sludge; membrane bioreactor; non-woven synthetic blanket; prolonged aeration.

INTRODUÇÃO

A água é considerada um dos recursos naturais mais vitais e tem importância econômica, social, política e ambiental em todo o mundo. A limitação dos recursos hídricos bem como a deterioração da qualidade da água proveniente do saneamento básico deficitário causam um enorme impacto na saúde pública e no meio ambiente (UNESCO,

2015). Esse quadro alarmante torna o desenvolvimento de novas tecnologias acessíveis e adequadas para o tratamento de esgoto sanitário uma necessidade urgente.

Entre as tecnologias promissoras de tratamento de águas residuais, de acordo com Judd (2011), encontram-se os biorreatores com membranas (MBR, na sigla em inglês), que consistem em uma só unidade

¹Universidade Estadual de Campinas - Campinas (SP), Brasil.

²Senac Campinas - Campinas (SP), Brasil.

*Autor correspondente: oderjunior@gmail.com

Recebido: 06/11/2017 - Aceito: 18/03/2019 - Reg. ABES: 187228

de associação do tratamento biológico no reator com a separação física pela membrana. No entanto, as inclusões de membranas nos biorreatores promovem o aumento de custos relacionados aos procedimentos operacionais, com o maior consumo de energia e a incrustação da superfície da membrana (METCALEF; EDDY, 2016; ASLAM *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, novas estratégias e alternativas foram desenvolvidas e aplicadas para resolver as limitações encontradas em processos de MBR. Alguns estudos focaram o material alternativo às membranas convencionais. Por exemplo, Xiong, Fu e Singh (2014) e Duan *et al.* (2017) relataram que, em vez da utilização das membranas de ultra e nanofiltração, a utilização de filtros com poros relativamente maiores, como uma manta não tecida e/ou tecida ou malha de aço inoxidável, é uma alternativa mais barata para o uso em MBR. Segundo Ersahin *et al.* (2012) e Ersahin, Ozgun e Van Lier (2013), esses materiais proporcionam o desenvolvimento da membrana dinâmica — que é a torta formada na superfície do módulo de filtração quando o permeado a ser filtrado inclui partículas em suspensão —, estão altamente relacionados com a retenção de partículas e constituintes e são retidos pela camada de biomassa, evitando que ocorra a incrustação no módulo de filtração.

O estudo do emprego de geossintéticos geotêxteis em reatores em batelada sequencial, como materiais filtrantes mais econômicos para o possesso de MBR, não foi sistematicamente estudado. As mantas geotêxteis são constituídas por estruturas de fibra aleatórias, geralmente na forma de folhas, e por sobreposições que criam múltiplos poros conectados. Ainda em razão das suas propriedades particulares (alta porosidade, permeabilidade, baixo peso e durabilidade), podem ser indicativas da viabilidade do uso de mantas sintéticas em sistemas MBR convencionais.

Dessa forma, o escopo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de um reator de lodo ativado em batelada, com módulo de filtração

proporcionado por manta geotêxtil, na remoção da matéria orgânica presente em esgoto sanitário.

METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Protótipos Aplicados ao Tratamento de Águas e Efluentes (LABPRO) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), câmpus Professor Zeferino Vaz, no município de Campinas, São Paulo.

O esgoto sanitário afluente utilizado foi gerado na região sudeste do câmpus universitário, em instalações (laboratórios, restaurantes, bancos e o Hospital de Clínicas) onde circulam diariamente cerca de 10 mil pessoas. A coleta diária dava-se em um poço de visita da rede coletora por meio de uma bomba (fabricante Anauger®, modelo Anauger 800, vazão de recalque de 1.000 L.h⁻¹) submersa em um balde de 50 L suportado por um sistema de polias para içamento. O afluente era, então, bombeado para um tanque de equalização com capacidade de 500 L, e o seu nível era controlado por meio de uma boia eletrônica.

O esgoto sanitário armazenado no tanque de equalização era bombeado até o segundo tanque com uma cota superior a 1,5 m, com capacidade de armazenamento de 1.000 L, suficiente para alimentar o sistema por 24 horas. Após esse período, o conteúdo era descartado e recebia esgoto sanitário novamente por uma bomba submersa (fabricante Schneider® Motobombas, modelo BCS — C5, vazão de recalque de 10.000 L.h⁻¹), controlada por uma boia eletrônica. A alimentação do sistema era realizada por gravidade, de forma que fossem processados os ciclos operacionais, conforme apresentado na Figura 1.

O sistema era constituído de dois reatores de lodos ativados de fluxo intermitente em escala piloto, com idade do lodo (θc) de 25 dias,

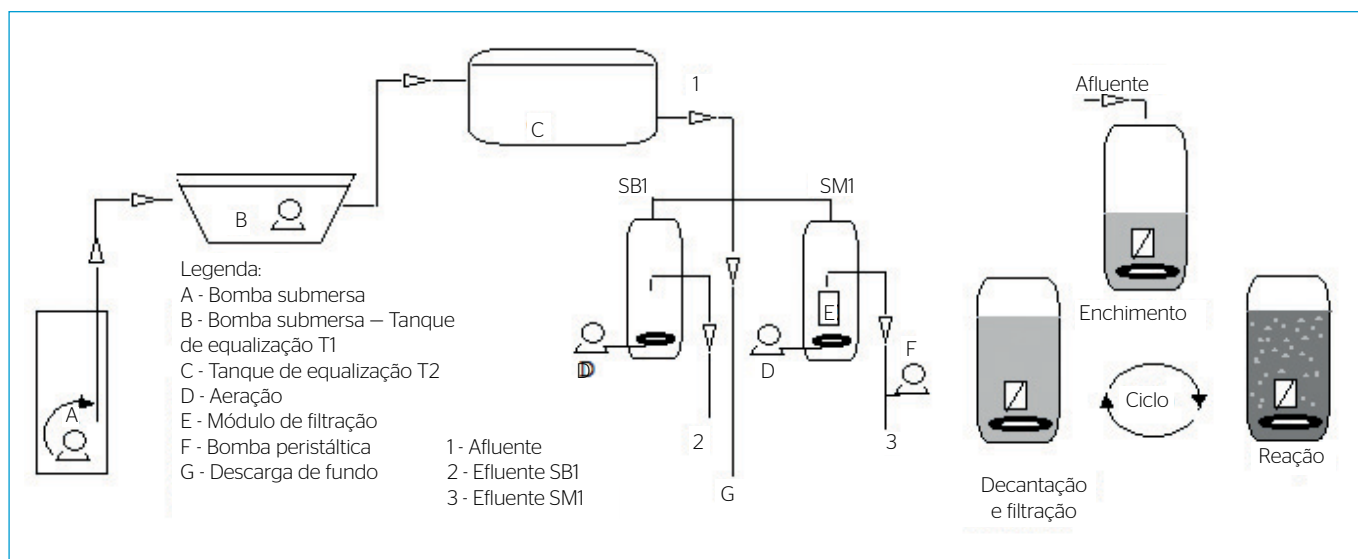


Figura 1 - Esquema do sistema de tratamento e ciclo de funcionamento.

sendo um na modalidade convencional utilizado como controle (SB1) e outro com módulo de filtração submersa (SM1), ambos operados nas mesmas condições operacionais.

Os reatores foram construídos em segmento de tubo de policloreto de polivinila (PVC) de 300 mm de diâmetro nominal (DN) e 1,5 m de altura. A altura útil de 1,4 m foi adotada para o tratamento, o que significou o volume máximo de 85 mL. As frações volumétricas adotadas para o enchimento e a preservação do lodo para cada ciclo foram iguais a 60% (51 L) e 40% (34 L), respectivamente (PEREIRA, 1996).

Na base de cada reator, foi instalado um difusor de cortina de ar flexível com microfuros — com 900 mm de comprimento e 16 mm diâmetro —, alimentado por um difusor de ar individual para fornecimento de oxigênio na massa líquida durante a etapa aeróbia (fabricante Boyu®, modelo ACQ-007 0,035 mPa, vazão de 100 L.min⁻¹). O sistema de aeração era controlado por temporizadores analógicos, pré-programados mantendo a concentração de oxigênio dissolvido (OD) na faixa de $2,34 \pm 0,40$ a $3,33 \pm 1,03$ mg.O₂.L⁻¹.

Para a operação do sistema, foi considerado um ciclo operacional de 24 horas, sendo, para cada ciclo, adotados os seguintes tempos (PEREIRA, 1996): enchimento (10 a 20 min), reação (17 h), repouso (1 h), drenagem (1 a 6 h) e espera (5 h ou até o início do novo ciclo).

Na fase de enchimento, o reator foi alimentado com esgoto sanitário até que o nível máximo de 85 L fosse atingido, indicando o fim dessa fase. O período de enchimento foi praticamente instantâneo, não sendo objeto de investigação do presente trabalho, e dependeu da vazão e do nível de afluente no reservatório externo.

A fase de reação foi iniciada imediatamente após a de alimentação, com o acionamento do sistema de aeração, para o fornecimento de oxigênio ao reator em fluxo intermitente (87,5% ligado e 12,5% desligado), útil para evitar o superaquecimento dos aeradores. Tal controle foi realizado por temporizadores analógicos, pré-programados para desligar o sistema durante 15 minutos a cada 1 hora por um período de 17 horas.

Cada reator teve defasagem de 10 minutos entre si, de forma que permitisse enchimentos e descartes não concomitantes. Ao fim da fase de reação, foi feito o descarte de lodo manual em excesso para permitir o controle da idade do lodo imposta. Dessa forma, com o volume dos reatores homogeneizados pela aeração, foi realizado o descarte do volume de cada reator, sendo 1/25 (3,4 L) para a manutenção de uma idade do lodo (θ_c) de 25 dias.

Na fase de repouso, o sistema de aeração foi desligado por um período de 1 hora, a fim de permitir a decantação do efluente e sedimentação da biomassa presente, na forma de flocos biológicos.

Na fase de drenagem, após a sedimentação, a bomba peristáltica (fabricante Provitec®, modelo AWG 5000 AX-D ABS, vazão de 140 L.min⁻¹) foi acionada, para o início da filtração do licor misto do reator, de forma que produzisse o permeado no reator com módulo de filtração, e do descarte do sobrenadante por gravidade no outro reator.

Na fase de espera, após a retirada do sobrenadante e do permeado nos reatores, o sistema permaneceu em repouso até o início de um novo ciclo.

Na realização deste estudo, foi utilizada, para confecção do módulo de filtração na modalidade espiral, a manta geotêxtil não-tecido agulhado, da fabricante Ober, especificação Geofort® GF7/130. Essa manta tem como principais aplicações obras ligadas à engenharia geotécnica e foi escolhida por ser amplamente encontrada no mercado. A Tabela 1 apresenta suas especificações técnicas.

A manta geotêxtil (Figura 2) foi cortada nas seguintes dimensões: 1.500 × 500 mm; em seguida, foi dobrada ao meio e costurada na lateral, formando uma peça com dimensões de 1.500 mm × 250 mm, que resulta em uma área superficial de 0,375 m². Como espaçadores, foram utilizados três tipos de materiais: tela antiderrapante feita em poliéster com revestimento em PVC; geomanta tridimensional fabricada em filamentos de polipropileno termosoldados; e C — manta acrílica 100% poliéster. Na Tabela 2, são apresentadas as principais características dos espaçadores.

Tabela 1 - Especificações técnicas da manta geotêxtil Ober.

| Característica | Propriedade | Norma | Unidade | Geofort® GF7/130 |
|----------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|------------------|
| Hidráulica | Permeabilidade normal | ASTM D4491 | cm.s ⁻¹ | 0,40 |
| | Abertura de filtração | AFNOR G 38017 | mm | 0,16 |
| | Permissividade | ASTM D 4491 | s ⁻¹ | 2,35 |
| Física | Espessura | - | mm | 1,70 |
| | Densidade superficial | - | g.m ⁻² | 130,00 |
| | Porosidade | - | % | 94,46 |
| | Superfície específica | - | m ² .m ⁻³ | 8263,00 |
| | Diâmetro médio das fibras | - | µm | 26,80 |
| | Matéria-prima | - | - | Poliéster |

Fonte: Ober (2015).

O módulo de filtração foi instalado na vertical, no fundo dos respectivos reatores, dentro da fração preservada para armazenamento de lodo para a batelada seguinte. A configuração geométrica dos filtros considerou a utilização de manta com um comprimento de cerca de 1 m e largura de 0,5 m.

Para a montagem dos módulos de filtrações, foram utilizados materiais como: cano de PVC de 25 mm de diâmetro, manta geotêxtil Ober (Geofort® GF7/130), espaçadores e abraçadeira de náilon. Após combinar a manta geotêxtil com os três espaçadores, conforme apresentado na Tabela 3, tem-se o módulo de filtração (SM1).

O estudo foi realizado de abril a outubro de 2016, totalizando 182 dias de operação, e foi dividido em três etapas (Tabela 3).

Para avaliar o desempenho do sistema de tratamento nos pontos 1, 2 e 3 (Figura 1), foram analisadas as variáveis baseadas em American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF) (2012). Na Tabela 4, são apresentados as variáveis e os seus respectivos métodos, bem como a frequência das análises do monitoramento. Nos 182 dias de operação, foram coletadas amostras simples do afluente, do licor misto e dos efluentes tratados.

Os reatores SB1 e SM1 foram inoculados com lodo aeróbio de um reator de lodos ativados de fluxo contínuo em escala piloto com volume útil de 200 L e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 18 h, alimentado por esgoto sanitário da mesma origem e operado por 74 dias para aclimação e desenvolvimento da biomassa. Após a sedimentação do lodo em um tambor de 50 L por 30 minutos e remoção do sobrenadante, foi adicionado um volume de 30 L de lodo com concentração média de 3.460 mgSSV.L⁻¹ em cada um dos reatores, completado com esgoto sanitário.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, o reator SM1 foi submetido à limpeza mecânica (manual) dos módulos de filtração para manutenção do fluxo de permeado e redução do potencial de depósito irreversível, no momento em que os módulos tiveram a capacidade de filtração significativamente reduzida e após determinado período de

operação no qual foi realizado o referido procedimento, denominado, neste estudo, de limpeza. A limpeza consistiu em uma metodologia em que foram realizados giros de 360° consecutivos com o módulo de filtração submerso no reator por um período de 2 minutos. Após esse

Tabela 2 - Especificações técnicas dos espaçadores.

| Espaçador | Principal função | Matéria-prima | Especificações |
|----------------------------------|--------------------------------|--|---|
| Tela antiderrapante | Tapete e utensílios domésticos | Poliéster com revestimento em PVC | Espessura média: 2,85 mm |
| | | | Gramatura: 180 g.m ² |
| | | | Espaçamento entre trama: 12 x 12 mm (centro a centro) |
| | | | Cor: areia |
| | | | Dimensão: 1,05 x 2,1 m |
| | | | Fabricante: Silkearte |
| Geomanta flexível tridimensional | Obras de engenharia geotécnica | Filamentos grossos de polipropileno fundidos nos pontos de contato | Espessura nominal: 16 mm |
| | | | Gramatura: 500 g.m ² |
| | | | Índice de vazios: > 90% |
| | | | Espessura do filamento: 0,65 mm |
| | | | Cor: negra |
| | | | Dimensão: 2 x 50 m |
| Manta acrílica | Forros, edredons e colchas | 100% poliéster | Espessura média: 20 mm |
| | | | Gramatura: 150 g.m ² |
| | | | Cor: branca |
| | | | Dimensão: 1,0 x 1,4 m |
| | | | Fabricante: Ober |

PVC: policloreto de vinila.

Fonte: Ober (2015); Maccaferri (2008) e Silkearte (2016).

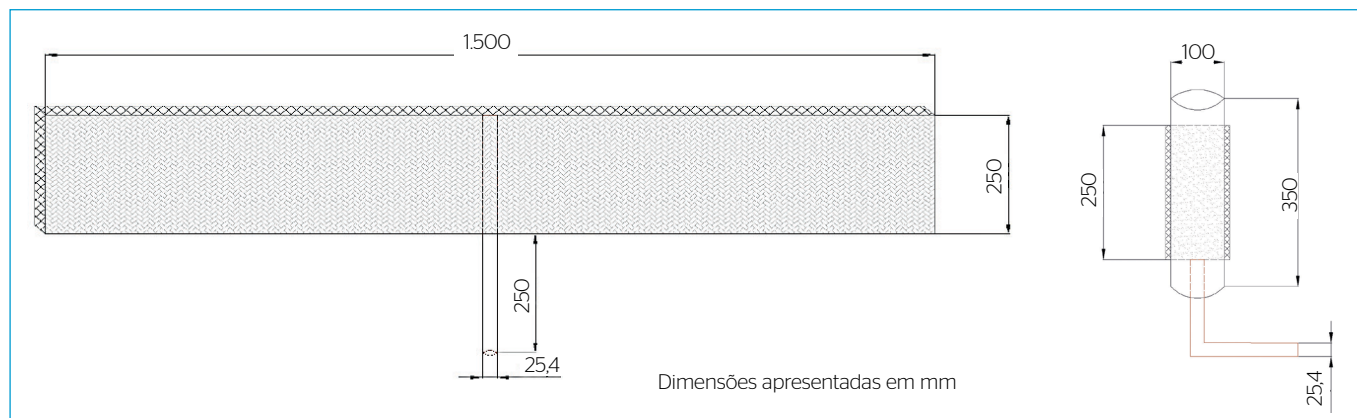


Figura 2 - Dimensões utilizadas para a manta geotêxtil.

procedimento, que visou ao desprendimento dos sólidos retidos nos módulos de filtração, o seu comportamento foi analisado por 1 hora, por meio das análises de permeado, através dos parâmetros turbidez e vazão. Por fim, se após 1 hora o módulo de filtração apresentasse uma vazão de saída semelhante à anterior ao processo de limpeza, considerava-se que o módulo apresentou depósito irreversível, impossibilitando o uso.

Cálculos realizados

Cálculo da carga volumétrica

O cálculo da carga volumétrica foi obtido dividindo-se a carga aplicada pelo volume do reator biológico, conforme Equação 1:

$$COV = \frac{C_{DBO}}{V} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

COV = carga orgânica volumétrica (kgDBO.m⁻³.dia⁻¹);

C_{DBO} = carga aplicada (kgDBO.dia⁻¹);

V = volume do reator biológico (m³).

Cálculo da idade do lodo

Para o descarte do lodo, foi adotada a retirada diretamente do tanque de aeração, a qual foi calculada pela Equação 2:

$$\theta_c = \frac{V}{Q_d} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

θ_c = tempo de residência celular ou idade do lodo;

V = volume útil do tanque de aeração;

Q_d = vazão de descarte de excesso de lodo ativado.

Cálculo do fluxo

O fluxo é definido como a vazão de permeado dividida pela área superficial total de membranas. O fluxo foi calculado por meio da Equação 3:

$$J = \frac{Q_p}{A_{sup.}} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

J = fluxo (L.m⁻².h⁻¹);

Q_p = vazão de permeado (L.h⁻¹);

A_{sup.} = área do módulo de filtração SM1 (m²).

Análise estatística dos resultados

A análise estatística dos dados para comparar o desempenho entre os reatores SB1 e SM1 foi realizada pelo teste de Wilcoxon e Mann-Whitney, para amostras não paramétricas e pareadas, com intervalo de confiança de 95% (p < 0,05). Para a avaliação entre as etapas de tratamento, foi utilizado o teste Kruskal-Wallis, com pós-teste de Mann-Whitney, ambos com intervalo de confiança de 95% (p < 0,05). Os testes estatísticos foram realizados utilizando o *software* Origin 9.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 5, 6 e 7, são apresentados os resultados médios dos efluentes tratados no reator SB1 ao fim da etapa de decantação, o permeado do SM1 e as condições operacionais dos reatores.

Tabela 4 - Métodos empregados nos ensaios laboratoriais e respectivas frequências.

| Parâmetros | Metodologia* | Periodicidade |
|--------------------------------------|--|------------------|
| Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) | SM 5210 B | 2 vezes ao mês |
| Demanda química de oxigênio (DQO) | SM 5220 D | 1 vez por semana |
| Oxigênio dissolvido (OD) | SM 4500 O-G - Eletrodo | Diário |
| pH | SM 4500 H ⁺ B - potenciométrico | Diário |
| Temperatura | Termômetro (mercúrio/digital) | Diário |
| Turbidez | SM 2130 B - nefelométrico | Diário |
| Sólidos suspensos totais | SM22 2540 D | 1 vez por semana |
| Sólidos suspensos voláteis | SM22 2540 E | 1 vez por semana |

*APHA; AWWA; WEF (2012).

Tabela 3 - Características dos módulos de filtração e condições operacionais.

| Etapa | Módulo de filtração | | | Operação (dia) | Período (dia) | Q (L.dia ⁻¹) | Idade do lodo (dias) |
|-------|----------------------------------|----------|------------|----------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|
| | Espaçador | Peso (g) | Volume (L) | | | | |
| I | Tela antiderrapante | 269 | 1,1 | 56 | 1 a 57 | 51 | 25 |
| II | Geomanta flexível tridimensional | 341 | 1,3 | 49 | 56 a 105 | | |
| III | Manta acrílica | 237 | 1,1 | 76 | 106 a 182 | | |

Q: vazão de alimentação.

Segundo Braak *et al.* (2017), a concentração de OD nos reatores com membrana submersa têm as seguintes funções: insumo operacional para o metabolismo; minimização do processo de ocorrência de depósitos nos módulos de filtração; e manutenção da biomassa em suspensão. Os valores médios da concentração do OD descritos na Tabela 5 nas três etapas avaliadas em SB1 e SM1 variaram entre a mínima de $2,34 \pm 0,40 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ e a máxima de $3,33 \pm 1,03 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$.

Valores muito próximos foram encontrados por outros pesquisadores que empregaram materiais alternativos como filtração em seus estudos. He *et al.* (2014) estudaram, em um período de 61 dias, a utilização de saco tipo *bag* como material de meio suporte para a formação da membrana dinâmica em um reator com volume de 84,2 L e mantiveram a concentração de OD na faixa de $3 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$. Já Wang *et al.* (2015) analisaram o uso de um tecido hidrofóbico em um reator em escala piloto com volume de 28 L, alimentado com esgoto sanitário, e também mantiveram

a concentração de OD na faixa de $3,2 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$. Portanto, essa concentração empregada no presente estudo foi adequada para o tratamento.

Segundo Judd (2011), entre os fatores operacionais nos biorreatores com membranas, a temperatura é a mais importante, pois as mudanças podem afetar o desempenho dos reatores através da influência na concentração dos sólidos em suspensão do licor misto e na cinética microbiana. Conforme apresentado na Tabela 5, as temperaturas variaram, refletindo a sazonalidade climática do ambiente apresentada no decorrer do monitoramento ocorrido entre os meses de abril e outubro. Ao comparar os dados apresentados, não houve diferenças significativas (Kruskal-Wallis $p < 0,05$) entre as etapas experimentais.

Quanto ao pH, o afluente apresentou média de $6,83 \pm 0,55$ a $7,07 \pm 0,50$ nos três passos considerados. O pH médio dos dois reatores em todas as etapas ficou na faixa de neutralidade, adequada aos processos biológicos de tratamento de esgotos.

Tabela 5 - Valores médios e desvio padrão obtidos para oxigênio dissolvido, temperatura e pH.

| Etapa (n*) | OD (mg.L ⁻¹) | | | T (°C) | | | pH | | |
|------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | T1 | SB1 | SM1 | T1 | SB1 | SM1 | T1 | SB1 | SM1 |
| I (55)* | 1,08 ± 0,22 | 3,33 ± 1,03 | 3,13 ± 0,85 | 21,70 ± 2,01 | 22,70 ± 2,20 | 22,90 ± 2,20 | 6,83 ± 0,55 | 7,28 ± 0,42 | 7,23 ± 0,33 |
| II (49)* | 1,23 ± 0,39 | 2,62 ± 0,64 | 2,81 ± 0,61 | 18,35 ± 2,8 | 19,65 ± 1,84 | 19,71 ± 1,95 | 7,07 ± 0,50 | 7,60 ± 0,21 | 7,49 ± 0,21 |
| III (75)* | 1,25 ± 0,40 | 2,34 ± 0,40 | 2,70 ± 0,61 | 21,47 ± 2,17 | 21,70 ± 1,39 | 21,72 ± 1,35 | 6,84 ± 0,32 | 7,49 ± 0,17 | 7,28 ± 0,28 |

OD: oxigênio dissolvido; T: temperatura; T1: afluente; *número de amostras analisadas.

Tabela 6 - Condições operacionais durante o monitoramento.

| Condições operacionais | | | | | | |
|---|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Parâmetro | Média e desvio padrão | | | | | |
| | Etapa I | | Etapa II | | Etapa III | |
| | SB1 | SM1 | SB1 | SM1 | SB1 | SM1 |
| A/M (kgDBO.kgSSV ³ .dia ⁻³) | 0,140 ± 0,031 | 0,143 ± 0,040 | 0,130 ± 0,110 | 0,224 ± 0,211 | 0,157 ± 0,041 | 0,111 ± 0,070 |
| COV (kgDBO.m ⁻³ .dia ⁻³) | 0,267 ± 0,026 | | 0,253 ± 0,126 | | 0,194 ± 0,076 | |
| Sólidos suspensos totais (mgSST.L ⁻¹) | 1.913 ± 624 | 2.500 ± 816 | 2.152 ± 1.128 | 2.394 ± 1.380 | 1.373 ± 148 | 2.817 ± 4.394 |
| Sólidos suspensos voláteis (mgSSV.L ⁻¹) | 1.757 ± 489 | 2.420 ± 831 | 1.868 ± 865 | 2.201 ± 1.351 | 1.242 ± 357 | 2.684 ± 4.390 |

A/M: relação alimento/microrganismo; COV: carga orgânica volumétrica.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros demanda química de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio do afluente e dos efluentes tratados.

| Parâmetro | | Etapa I | | Etapa II | | Etapa III | |
|---|-----------|-------------------|--------------|--------------------|-------------|-------------------|--------------|
| | | SB1 | SM1 | SB1 | SM1 | SB1 | SM1 |
| | Entrada | 1122 ± 583,4 (8)* | | 1.269 ± 364,4 (7)* | | 899 ± 297,7 (11)* | |
| DQO (mgO ₂ .L ⁻¹) | Saída | 124 ± 53,4 | 111,0 ± 99,9 | 107,0 ± 26,1 | 80,0 ± 19,4 | 128,0 ± 60,9 | 102,9 ± 87,7 |
| | % remoção | 86,8 ± 6,8 | 90,0 ± 5,6 | 91,4 ± 1,7 | 93,2 ± 2,6 | 85,4 ± 5,6 | 87,7 ± 9,0 |
| | Entrada | 445 ± 43,9 (4) | | 422,0 ± 209,3 (4) | | 323,0 ± 127,4 | |
| DBO ₅ (mgO ₂ .L ⁻¹) | Saída | 43 ± 12 | 29,0 ± 6,2 | 31,0 ± 35,1 | 26,0 ± 36,9 | 43 ± 39 | 23,0 ± 11,6 |
| | % remoção | 90,4 ± 2,0 | 93,4 ± 1,8 | 92,4 ± 4,1 | 93,6 ± 4,3 | 87,8 ± 7,5 | 92,8 ± 1,7 |

DQO: demanda química de oxigênio; DBO₅: demanda bioquímica de oxigênio; *número de amostras analisadas.

Como pode ser observado na Figura 3, os valores médios da turbidez do afluente variaram entre $190,0 \pm 73,9$ uT na etapa I e $311,0 \pm 115,2$ uT na II. Após análise estatística (Kruskal-Wallis $p < 0,05$) do afluente, foi possível verificar que não houve diferença significativa, apesar da variação das médias entre as etapas.

Após análise da Figura 4 e dos dados (Wilcoxon $p < 0,05$), foi possível verificar que houve diferença estatística entre os reatores SB1 e SM1. Este foi mais eficiente e apresentou turbidez média geral abaixo de 5 uT, o que correspondeu à remoção na faixa de 97,0% em relação ao afluente.

Valores muito próximos foram encontrados por outros pesquisadores. Por exemplo, Zhao *et al.* (2016) avaliaram a utilização de um

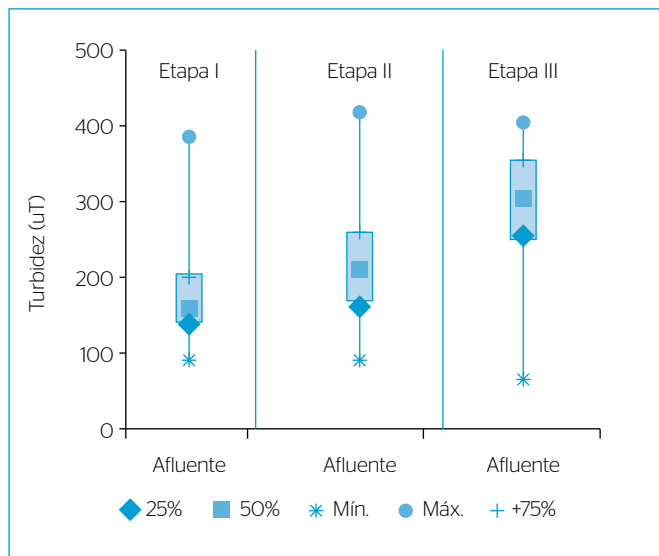


Figura 3 - Gráfico box-plot das concentrações de turbidez do afluente.

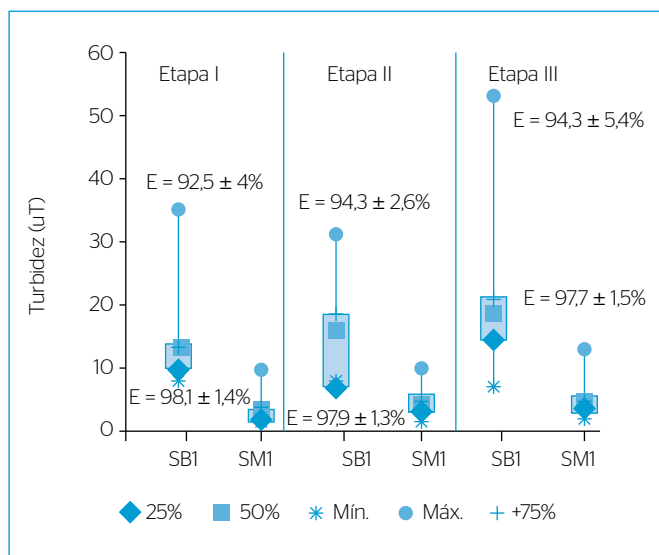


Figura 4 - Gráfico box-plot das concentrações de turbidez dos efluentes tratados.

tecido de três dimensões fabricado em monofilamento de nylon e alcançaram, na filtração de efluente sintético, em um reator com volume de 12 L, médias abaixo de 3 uT e eficiência de remoção na ordem de 95,2 a 97,6% da turbidez. Wang *et al.* (2015) obtiveram médias de turbidez abaixo de 5 uT, com eficiência de remoção na faixa de 95,8 a 98,0% na utilização de uma manta não tecida em um reator com fluxo contínuo em escala piloto, com volume de 28 L no tratamento de esgoto sanitário. Chu e Li (2006) avaliaram a utilização de tecido como material alternativo às membranas convencionais ao sistema MBR e obtiveram médias de turbidez abaixo de 9 uT, com variação da eficiência de remoção entre 95,2 e 97,6%.

A relação A/M (Tabela 6) manteve-se na faixa de $0,130 \pm 0,110$ $\text{kgDBO}_5 \cdot \text{kgSSV}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ na etapa II e $0,157 \pm 0,041$ $\text{kgDBO}_5 \cdot \text{kgSSV}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ na III, tal como recomenda a literatura clássica. Metcalf e Eddy (2016) sugerem essa relação entre 0,04 e 0,10 $\text{kgDBO}_5 \cdot \text{kgSSV}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ para reatores em batelada sequencial, e Von Sperling (2012) recomenda valores de 0,08 a 0,15 $\text{kgDBO}_5 \cdot \text{kgSSV}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ para aqueles operados na modalidade de aeração prolongada.

De acordo com Brown, Ong e Lee (2011), baixas relações A/M são observadas em reatores MBR, os quais operam próximos a condições de endogenia. Os referidos autores destacam ainda que esses sistemas permitem a aplicação de altas cargas orgânicas sem prejudicar a qualidade do efluente final. Adicionalmente, a manutenção de baixos valores de A/M conduz à diminuição significativa na produção de lodo.

Em relação às concentrações de sólidos suspensos no licor misto dos reatores monitorados (Tabela 6), foram encontradas concentrações abaixo do esperado em ambos os reatores SB1 e SM1, em comparação com a literatura. Segundo Jordão e Pessoa (2014), em sistemas de lodos ativados com aeração prolongada, a concentração varia entre 4.000 e 8.000 $\text{mgSST} \cdot \text{L}^{-1}$ e entre 8.000 e 12.000 $\text{mgSST} \cdot \text{L}^{-1}$ nos com processos de separação por membranas (MBR) (METCALF; EDDY, 2016). Tal fato pode ter sido decorrente dos seguintes aspectos: controle da idade do lodo, visto que diariamente eram retirados 3,4 L de licor misto, a fim de se manter a idade do lodo em 25 dias — consequentemente, havia perda de sólidos; e da alimentação do sistema, já que o ciclo operacional foi de 24 horas, portanto próximo a condições de endogenia.

No trabalho desenvolvido por Inácio (2017), na utilização de manta não tecida na substituição do decantador secundário em um sistema de lodo ativado de fluxo contínuo, em escala piloto com volume de 200 L, no tratamento de efluente sanitário, também foi relatada a baixa concentração de SST do licor misto. Entre os fatores que influenciaram a baixa concentração de SST em relação à literatura, o autor destacou os seguintes aspectos: controle diário da idade do lodo e retenção da biomassa nos módulos de filtração.

Em relação à qualidade dos efluentes tratados em termos de DQO e demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5) (Tabela 7 e Figura 5), foi possível verificar, após análise estatística (Wilcoxon $p < 0,05$), que

houve diferença estatística entre SB1 e SM1, com exceção da etapa II, na avaliação de DBO_5 . Este foi mais eficiente, alcançando remoção de DQO acima de $87,7 \pm 9\%$ na etapa III, com concentrações médias do permeado entre $111 \pm 99,9 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ na fase I e $80 \pm 19,4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ na II. Já para o parâmetro DBO_5 , observou-se, em SM1, remoção superior a $92,8 \pm 1,7\%$ no passo III, produzindo um permeado com concentrações médias variando entre $29 \pm 6,2$ e $23 \pm 11,6 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$.

Ao se compararem os resultados obtidos com a literatura, valores muito próximos foram encontrados em outros estudos. Por exemplo, He *et al.* (2014) estudaram uma manta não tecida com abertura de filtração de 0,01 mm como alternativa ao MBR em um reator de lodos ativados de fluxo intermitente e alcançaram uma eficiência na remoção de DQO na faixa de 78%. Wang *et al.* (2015) utilizaram uma manta não tecida hidrofóbica, com abertura de filtração de 0,038 mm, em um reator de lodos ativados de fluxo intermitente e obtiveram remoção de DQO em média de 85,7%. Já SEO *et al.* (2003) relataram a eficiência de um sistema com filtração em manta não tecida em um sistema de lodos ativados de fluxo contínuo e obtiveram eficiência de remoção de DQO de 91,6%, produzindo concentração de efluente de $13 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$. E Chang *et al.* (2007) avaliaram uma manta não tecida como material alternativo ao reator MBR e obtiveram uma eficiência na remoção de DQO superior a 90%.

Kiso *et al.* (2005) avaliaram a utilização de malha inoxidável como material alternativo ao MBR em um reator de lodos ativados com fluxo intermitente e obtiveram eficiência na remoção de DBO_5 na faixa de 95%. Os referidos autores relatam ainda que a malha filtrante proporcionou o desenvolvimento da membrana dinâmica. Tais valores estão

compatíveis com os encontrados no presente trabalho, com exceção da etapa II, na qual foi observado que não houve diferença estatística entre os reatores SB1 e SM1. Dessa forma, a fase II, a qual utilizou a geomanta tridimensional como espaçador na confecção do módulo de filtração, não influenciou o desempenho da remoção de DBO_5 em relação aos outros materiais utilizados (tela antiderrapante e manta acrílica).

Analisando os dados apresentados com relação à legislação, é possível perceber que, em todos os casos, as concentrações de DBO estiveram abaixo do limite máximo estabelecido no estado de São Paulo (DECRETO n° 8.468, 1976): $60 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ (DBO) para o lançamento de efluentes em corpos hídricos e na Resolução n° 430 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2011), o qual dispõe sobre as condições e os padrões de lançamento de efluentes em território nacional.

Desempenho dos módulos de filtração

No presente estudo, foram adotados os parâmetros de turbidez e o fluxo para o controle de monitoramento do sistema de separação sólido-líquido de filtração na modalidade espiral (Figuras 6, 7 e 8).

Analisando os dados apresentados com relação à limpeza dos módulos de filtração, Chu e Li (2006) e Ersahin *et al.* (2012) citam que esta pode ser acompanhada pela perda temporária da qualidade do efluente. Tal fato ocorreu nas três etapas, entretanto somente na III foi obtida recuperação satisfatória da capacidade de filtração após a limpeza, o que a qualifica como a mais eficiente, na condição da filtração e na formação da camada de torta sobre a superfície dos módulos de filtração. Tal fato foi confirmado após análise dos dados das variáveis de remoção de matéria orgânica. Segundo Li *et al.* (2011) e Zhang *et al.* (2017), isso ocorreu por causa da deposição da

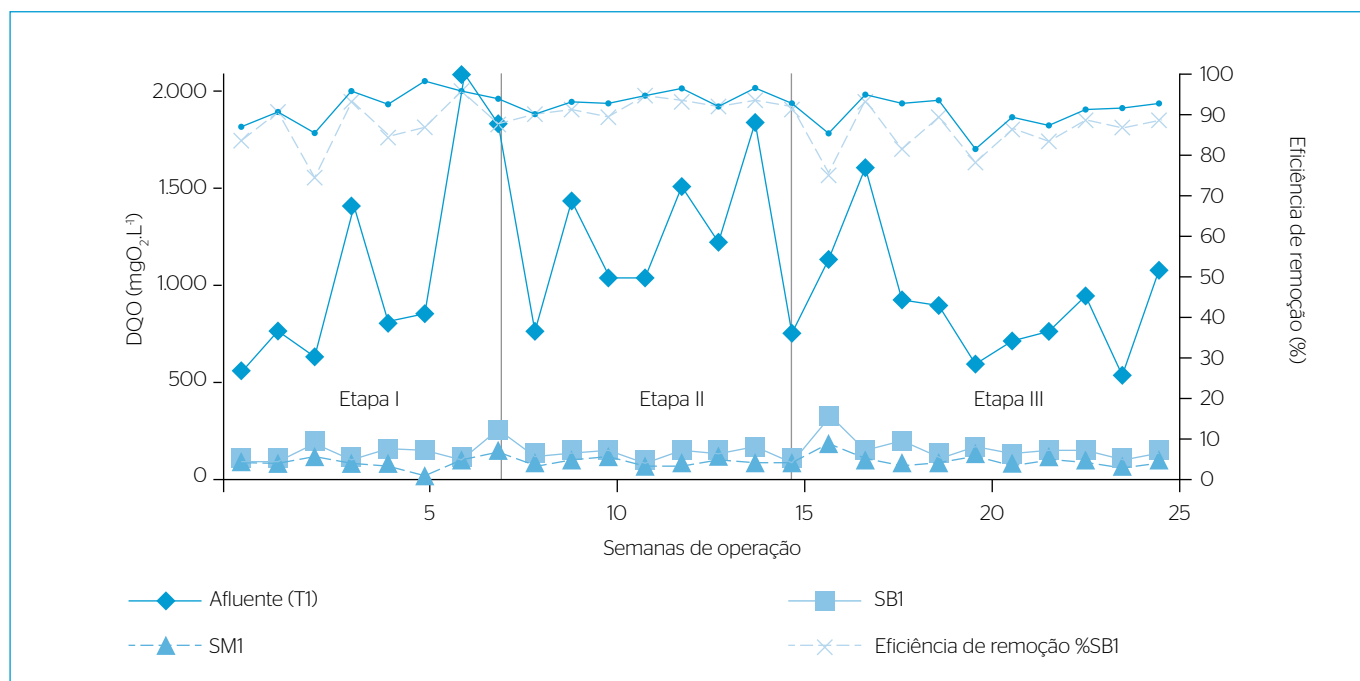


Figura 5 - Valores das concentrações e eficiência de remoção de demanda química de oxigênio nos efluentes tratados.

camada de torta que atuou como uma membrana secundária antes do módulo de filtração.

Em um estudo de revisão de artigos científicos relacionados às tecnologias de membrana dinâmica, Li, Xu e Yu (2018) relatam que, entre os métodos de limpeza, os mais eficientes são os que utilizam a retrolavagem, pois o depósito desenvolvido no módulo de filtração é composto basicamente de materiais, como partículas de lodo, células,

biopolímeros e poluentes. Dessa forma, a estratégia mais eficaz para recuperar o fluxo é a contracorrente, possível também em estudo em escala real. Entretanto, ao comparar as configurações das membranas utilizadas, assim como os meios suporte avaliados, a configuração em espiral, a qual foi analisada no presente trabalho, apesar de apresentar a maior área de filtração em relação às de placas planas, é também a que exibiu a menor eficiência de recuperação do fluxo.

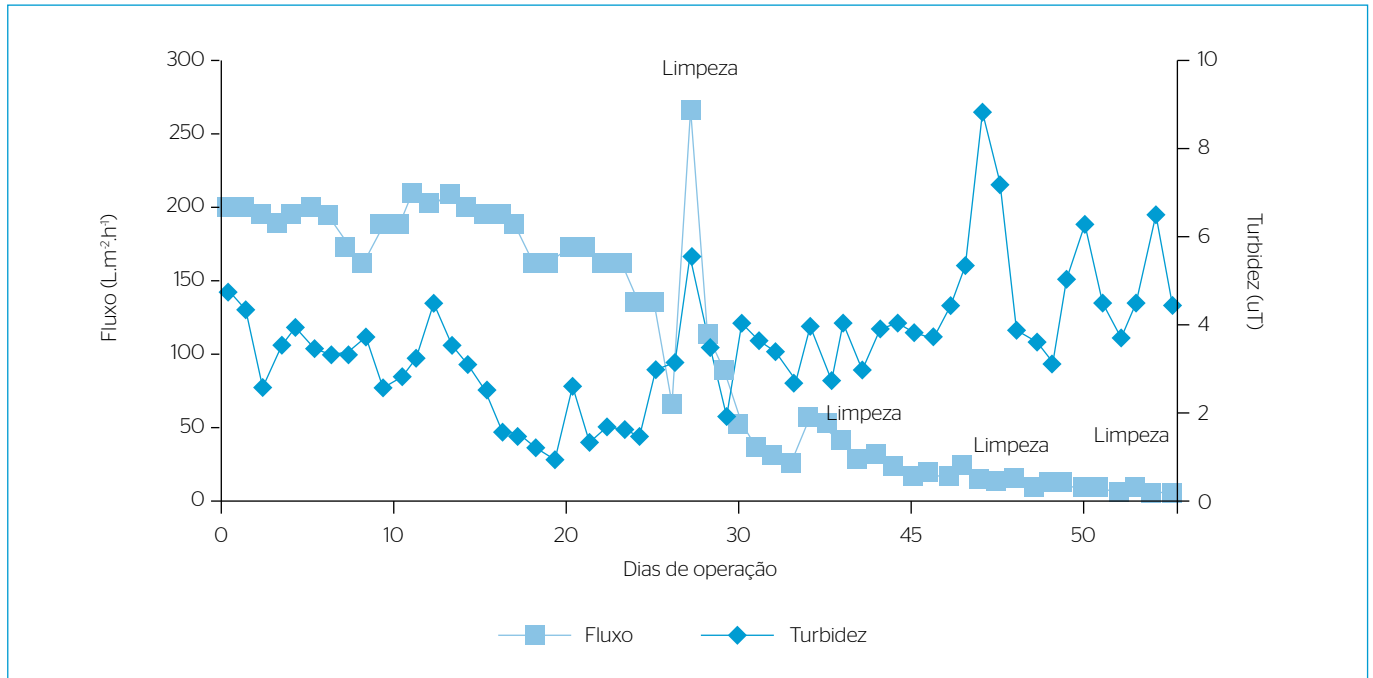


Figura 6 - Relação entre o fluxo e a turbidez na etapa I.

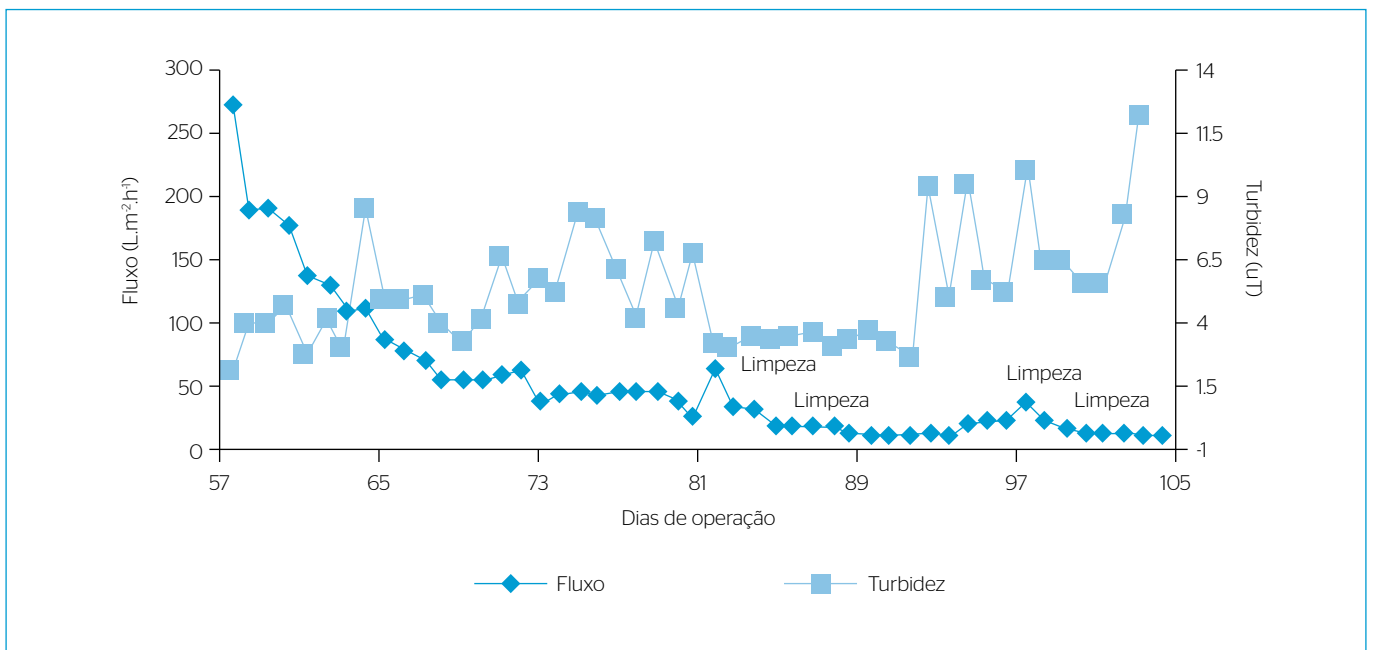


Figura 7 - Relação entre o fluxo e a turbidez na etapa II.

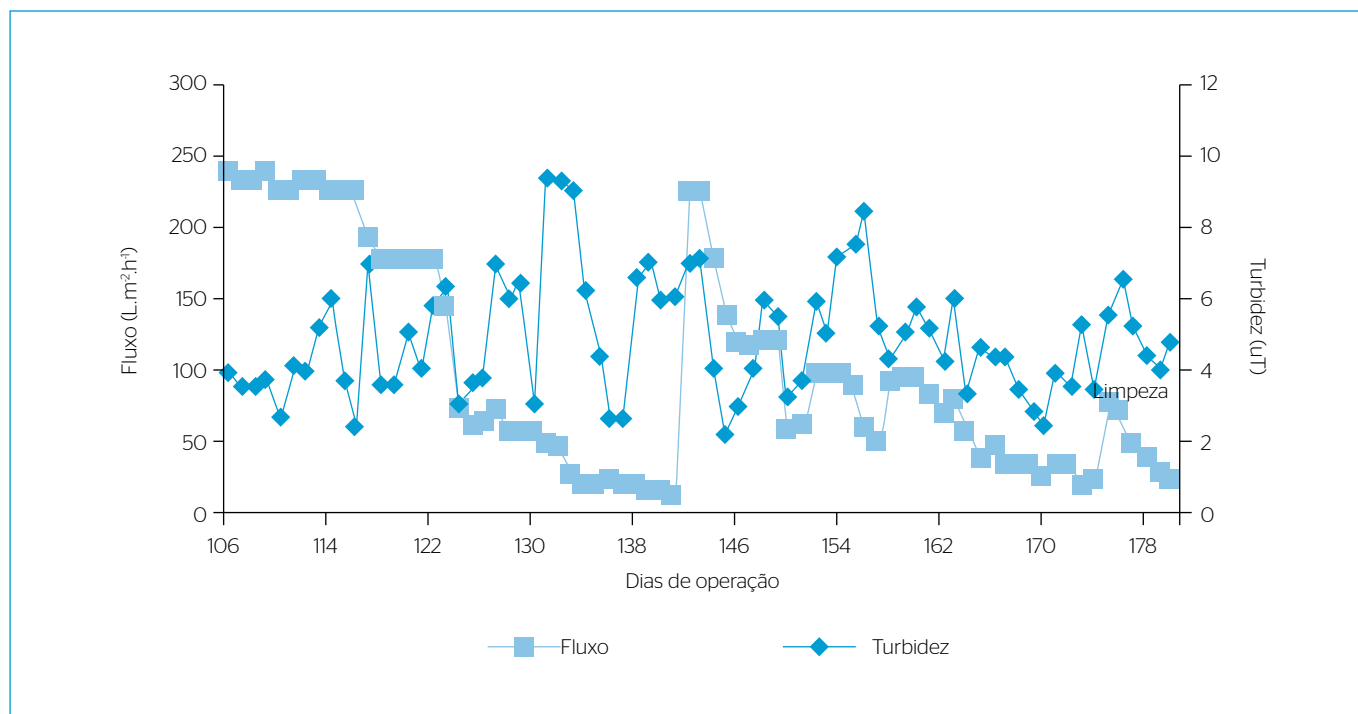


Figura 8 - Relação entre o fluxo e a turbidez na etapa III.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo, ao longo dos 182 dias de monitoramento, demonstram que o reator em batelada sequencial com filtração em manta geotêxtil (SM1), operado com um ciclo de 24 horas, foi capaz de produzir um efluente de elevada qualidade, em relação à remoção da matéria orgânica e turbidez, com características constantes, praticamente independente da qualidade do afluente e configurações avaliadas, em comparação ao reator em batelada sequencial (SB1), utilizado como controle.

Deve-se destacar também que o espaçador influenciou no desempenho do módulo de filtração em termos de eficiência e operação. A geomanta tridimensional de filamentos de polipropileno termosoldados empregada como espaçador na etapa II apresentou desempenho insatisfatório em relação à recuperação da capacidade de filtração quando comparada à tela antiderrapante em poliéster com revestimento em PVC e a manta acrílica 100% poliéster.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2012) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association. 1082 p.

ASLAM, M.; CHARFI, A.; LESAGE, G.; HERAN, M.; KIM, J. (2017) Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling. *Chemical Engineering Journal*, v. 307. <https://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.144>

BRAAK, E.; ALBASI, C.; ANNE-ARCHARD, D.; SCHETRITTE, S.; ALLIET, M. (2017) Impact of Aeration on Mixed Liquor in Submerged-Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. *Chem. Eng. Technol.*, v. 40, n. 8, p. 1453-1465. <https://doi.org/10.1002/ceat.201600470>

BRASIL. (2011) Resolução CONAMA nº 430/2011, 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 Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. *Diário Oficial da União*, n. 92, p. 89.

BROWN, P.; ONG, S.K.; LEE, Y.W. (2011) Influence of anoxic and anaerobic hydraulic retention time on biological nitrogen and phosphorus removal in a membrane bioreactor. *Desalination*, v. 270, n. 1-3, p. 227-232. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.001>

CHANG, W.K.; HU, A.Y.J.; HORNG, R.Y.; TZOU, W.Y. (2007) Membrane bioreactor with nonwoven fabrics as solid-liquid separation media for wastewater treatment. *Desalination*, v. 202, n. 1-3, p. 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.047>

- CHU, L.; LI, S. (2006) Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 51, n. 2, p. 173-179. <https://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2006.01.009>
- DUAN, W.; NIU, Q.; XU, X.; LI, W.; FU, D. (2017) Influence of attapulgite addition on the biological performance and microbial communities of submerged dynamic membrane bioreactor. *Journal of Water Reuse and Desalination*, v. 7, n. 4, p. 488-501. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.133>
- ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; DERELI, R.K.; OZTURK, I.; ROEST, K.; VAN LIER, J. (2012) A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives. *Bioresource Technology*, v. 122, p. 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.086>
- ERSAHIN, M.E.; OZGUN, H.; VAN LIER, J. (2013) Effect of Support Material Properties on Dynamic Membrane Filtration Performance. *Separation Science and Technology*, v. 48, n. 15, p. 2263-2269. <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.804840>
- HE, Y.; ZHANG, W.; RAO, P.; JIN, P. (2014) Performance of diatomite/iron oxide modified nonwoven membrane used in membrane bioreactor process for wastewater reclamation. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 3, p. 533-539. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.254>
- INÁCIO, A.R. (2017) *Utilização de geossintéticos para lodos ativados de aeração prolongada em fluxo contínuo*. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. (2014) *Tratamento de esgotos domésticos*. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES.
- JUDD, S. (2011) *The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. 2. ed. Oxford: Elsevier. 519 p.
- KISO, Y.; JUNG, Y.J.; PARK, M.S.; WANG, W.; SHIMASE, M.; YAMADA, T.; MIN, K.S. (2005) Coupling of sequencing batch reactor and mesh filtration: Operational parameters and wastewater treatment performance. *Water Research*, v. 39, n. 20, p. 4887-4898. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.025>
- LI, L.; XU, G.; YU, H. (2018) Review: Dynamic Membrane Filtration: Formation, Filtration, Cleaning, and Applications. *Chemical, Engineering Technology*, v. 41, n. 1, p. 7-18. <https://doi.org/10.1002/ceat.201700095>
- LI, W.W.; SHENG, G.P.; WANG, Y.K.; LIU, X.-W.; XU, J.; YU, H.-Q. (2011) Filtration behaviors and biocake formation mechanism of mesh filters used in membrane bioreactors. *Separation and Purification Technology*, v. 81, n. 3, p. 472-479. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.08.026>
- MACCAFERRI. (2008) *Tabela de Especificações Técnicas. Geomanta MacMat® S. Maccaferri do Brasil*.
- METCALF; EDDY. (2016) *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH.
- OBBER. (2015) *Tabela de Especificações Técnicas: Linha Ober. Geofort. Ober S.A Indústria e Comércio*.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). (2015) *United Nations World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris: UNESCO.
- PEREIRA, R.U.H. (1996) *Proposição de metodologia para determinação de parâmetros de projeto e operação de reatores biológicos de lodos ativados por batelada*. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Saneamento e Ambiente, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SÃO PAULO (Estado). (1996) *Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976 (atualizado com redação dada pelo Decreto nº 54.487, de 26 de junho de 2009)*. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente.
- SEO, G.T.; MOON, B.H.; LEE, T.S.; LIM, T.J.; KIM, I.S. (2003) Non-woven fabric filter separation activated sludge reactor for domestic wastewater reclamation. *Water Science & Technology*, v. 47, n. 1, p. 133-138. <https://dx.doi.org/10.2166/wst.2003.0035>
- SILKEARTE. (2016) *Especificações técnicas: Telas Antiderrapantes. Silkearte Estamparia e Decorações*.
- VON SPERLING, M. (2012) *Lodos Ativados: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade de Minas Gerais. 428 p. v. 4.
- WANG, C.; CHEN, W.N.; HU, Q.Y.; JI, M.; GAO, X. (2015) Dynamic fouling behavior and cake layer structure changes in nonwoven membrane bioreactor for bath wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, v. 264, p. 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.132>
- XIONG, J.; FU, D.; SINGH, R.P. (2014) Self-adaptive dynamic membrane module with a high flux and stable operation for the municipal wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, v. 471, p. 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.08.001>
- ZHAO, F.; WENG, F.; XUE, G.; JIANG, G.; QIU, Y. (2016) Filtration performance of three dimensional fabric filter in a membrane bioreactor for wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 157, p. 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.11.022>
- ZHANG, W.; TANG, B.; BIN, L. (2017) Research progress in biofilm-membrane bioreactor: a critical review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 56, n. 2, p. 6900-6909.