

REVISTA AIDIS

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

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE UM BIORREATOR A MEMBRANA EM BATELADAS SEQUENCIAIS NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

* Guilherme Gavlak ¹
Carlos Raphael Pedrosa ¹
Gabriele Monique de Andrade Setnarski ¹
Lucas Eduardo Müller ¹
Andressa de Andrade ¹

EVALUATION OF THE APPLICATION OF A MEMBRANE BIOREACTOR IN SEQUENTIAL BATCHES IN THE TREATMENT OF DOMESTIC SEWAGE

Recibido el 31 de octubre de 2023. Aceptado el 9 de abril de 2024

Abstract

The membrane bioreactor system (MBR) has been gaining prominence in recent years compared to traditional domestic effluent treatment systems, as restrictions are increasingly greater due to its release into water bodies. Therefore, the present study aimed to evaluate the application, on a pilot scale, of a sequential batch membrane bioreactor (MBR-SB) in the treatment of domestic sewage. Reactor performance was evaluated based on the removal of parameters: soluble chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), ammonia nitrogen, soluble phosphorus, apparent color and turbidity. At the same time, analyzes related to membrane fouling processes were evaluated in the reactor: soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) in terms of proteins and polysaccharides, as well as transmembrane pressure (TMP). MBR-SB showed significant efficiencies in removing CODs, true color and turbidity, being 94%, 93% and 99%, respectively. The values of SMP, EPS, CODs significantly correlated with the increase in PTM, however, with a low clogging speed. In conclusion, the use of MBR-SB presents a promising approach to mitigate the environmental impacts associated with domestic sewage.

Keywords: membrane filtration, biological treatment, membrane fouling.

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO), Campus de Irati, Rua Professora Maria Zanon de Almeida s/n, Riozinho, Irati/PR. CEP 84505-677. Brasil. Email: eng.guilhermegavlak@gmail.com

Resumo

O sistema de biorreator com membranas (BRM) vem ganhando destaque nos últimos anos em comparação aos sistemas tradicionais de tratamento de efluentes domésticos, uma vez que as restrições estão cada vez maiores em função dos seus lançamentos em corpos hídricos. Desse modo, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação, em escala piloto, de um biorreator a membranas em bateladas sequenciais (BRM-BS) no tratamento de esgoto doméstico. O desempenho do reator foi avaliado com base na remoção dos parâmetros: demanda química de oxigênio solúvel (DQOs), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal, fósforo solúvel, cor aparente e turbidez. Paralelamente, foi avaliado no reator análises relacionadas aos processos de colmatação das membranas: produtos microbianos solúveis (SMP) e substâncias poliméricas extracelulares (EPS) em termos de proteínas e polissacarídeos, assim como a pressão transmembrana (PTM). O BRM-BS, apresentou eficiências expressivas na remoção de DQOs, cor verdadeira e turbidez, sendo de 94%, 93% e 99%, respectivamente. Os valores de SMP, EPS, DQOs correlacionaram significativamente com o aumento da PTM, porém, com baixa velocidade de colmatação. Em conclusão, a utilização de BRM-BS apresenta uma abordagem promissora para mitigar os impactos ambientais associados aos esgotos domésticos.

Palavras-chave: filtração por membranas, tratamento biológico, colmatação das membranas.

Introdução

Devido à grande expansão populacional somado com a falta de medidas adequadas de saneamento básico e educação sanitária, parte da população tende a lançar seus efluentes diretamente em solos e corpos hídricos, ocasionando a poluição e a contaminação destes ambientes os quais são altamente degradados, o que favorece a disseminação de doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado (Moura *et al.*, 2016).

A coleta e o tratamento de esgotos desempenham um papel fundamental na sociedade e são vitais para promover a saúde pública e conservar os recursos naturais, especialmente os mananciais dos quais a água para o abastecimento público é captada. Uma das principais fontes de poluição de corpos hídricos hoje no Brasil está associada a inexistência do tratamento dos esgotos doméstico, assim como, a ineficiência das estações quando existentes. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2022, aproximadamente 56% da população brasileira tinha acesso a serviços de coleta de esgoto, sendo que apenas cerca de 52.2% do esgoto coletado recebia tratamento adequado antes de ser lançado no meio ambiente, o que corresponde a um volume de esgoto coletado de 6.1 bilhões de m³ e somente 5.0 bilhões de m³ deste montante é tratado corretamente (SNIS, 2022).

O esgoto doméstico, quando tratado de forma ineficiente gera a poluição dos recursos hídricos, devido ao alto teor de material orgânico, sólidos, nitrogênio, fósforo e organismos patogênicos. Estes fatores favorecem a eutrofização em corpos d'água, a qual está relacionada ao aumento da concentração de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, aumentando o desequilíbrio dos

ciclos biogeoquímicos e da cadeia trófica, além da perda do oxigênio dissolvido (Esteves, 2011). Entre os efeitos negativos também pode ser citado o aumento da cor e turbidez dos corpos receptores, devido a presença de sólidos provenientes do esgoto descartado, resultando na redução da zona eufótica sendo prejudicial no processo de fotossíntese o que reduz a entrada de oxigênio no meio aquático, restringindo a diversidade de vida biológica.

Devido às restrições impostas por lei, os esgotos domésticos, assim como os demais efluentes industriais, precisam receber um tratamento necessário de acordo com as classes dos corpos hídricos nos quais são lançados (Brasil, 2005), assim como, para se enquadrar nos padrões de lançamentos dispostos na Resolução CONAMA 430 de 2011 (Brasil, 2011). Portanto, devido a elevada deterioração ambiental da qualidade dos corpos receptores e suas restrições cada vez maiores, faz-se necessário a implantação de sistemas avançados de tratamento deste tipo de água residuária.

Dentre os tratamentos utilizados destaca-se os biorreatores de membranas (BRMs). Os BRMs vêm aos poucos sendo reconhecidos de forma global, devido à elevada qualidade do efluente obtido por meio da utilização deste sistema (Lin *et al.*, 2014). Os BRMs operam de maneira semelhante ao processo de lodo ativado (Bernhardt e Newfield, 2006), porém com redução significativa da área de instalação através da substituição do decantador secundário por um módulo de membranas, normalmente de microfiltração ou ultrafiltração (Belli *et al.*, 2019).

Segundo Judd e Judd (2011), este módulo de membrana mantém a concentração de biomassa elevada dentro do reator, o que intensifica o processo de degradação da matéria orgânica aumentando a eficiência do tratamento. A utilização das membranas possibilita ainda gerar um efluente livre de patógenos e com reduzido teor de sólidos em suspensão (Melin *et al.*, 2006), portanto, esse tipo de sistema tem a capacidade de reduzir de forma muito significativa o potencial poluidor dos efluentes.

Diante deste cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a viabilidade de um biorreator a membranas em bateladas sequenciais aplicado ao tratamento de esgoto doméstico, avaliando a eficiência de remoção dos parâmetros físicos e químicos, assim como, o processo de colmatação do módulo de membranas.

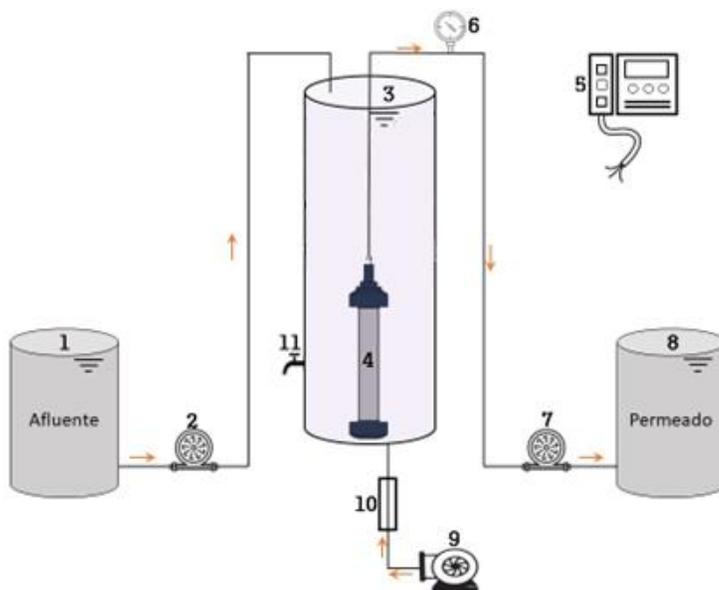
Metodologia

O efluente a qual foi submetido ao tratamento proposto, foi coletado em uma estação de tratamento de esgotos (ETE) após os processos de gradeamento e sedimentação dos sólidos em um decantador primário da ETE e armazenado a 4 °C para que não houvesse degradação anaeróbia no período de armazenamento. Já a biomassa utilizada como inóculo foi oriunda de

uma lagoa aeróbia pertencente a um sistema de tratamento de esgotos gerados em uma indústria de laticínios e concentrada por gravimetria até que fosse atingido a concentração de 5 g/L de sólidos suspensos totais (SST). Antecedente ao início da coleta de dados, o biorreator a membrana passou por um período de aclimação e estabilização da concentração de SST por um período de aproximadamente 30 dias, obtendo uma concentração de 4.5 g/L.

Características da unidade experimental

A esquematização da unidade experimental operada em escala piloto composta por um biorreator a membrana em bateladas sequenciais (BRMBS) utilizada no presente estudo está apresentada na Figura 1.



1 – Reservatório afluyente; 2 – Bomba de alimentação; 3 – reator; 4 – Módulo de membranas; 5 – Painel de controle; 6 – Vacuômetro; 7 – Bomba para filtração; 8 – Reservatório do permeado; 9 – Soprador de ar; 10 – Rotâmetro; 11 – Descarte de lodo.

Figura 1. Esquematização da unidade piloto do biorreator a membrana em bateladas sequenciais utilizado na presente pesquisa. *Fonte: os Autores, 2023.*

O biorreator com membranas utilizado foi constituído de um tanque em formato cilíndrico feito de acrílico com um volume total e útil de 20 e 15 litros, respectivamente. Para que fosse possível manter o sistema totalmente aeróbio, era fornecida uma aeração com oxigênio por meio de um compressor de ar e sua vazão de 8 L/min era regulada com o auxílio de rotômetros, sendo que a mesma era dividida entre a base do sistema e o módulo de membranas.

Para que o sistema fosse automatizado, foi utilizado de uma central lógica de processamento (CLP) a qual era responsável pelo acionamento dos processos de filtração e enchimento do reator.

Para realização da filtração, foi utilizado de uma bomba peristáltica e um módulo de membranas submerso de fibras ocas compostas de fluoreto de polivinilideno (PVDF), com comprimento de 53.5 cm cada fibra, totalizando 300 unidades. O diâmetro externo das fibras era de 2 mm e seus poros possuíam diâmetro de 0.04 μm , resultando em uma área de filtração de 0.93 m^2 . Acoplado a bomba peristáltica e o módulo de membranas, foi inserido um vacuômetro com o intuito de medir a pressão de filtração e monitorar a colmatação.

Condições operacionais do biorreator a membrana em bateladas sequenciais

Para a operação do sistema em bateladas sequenciais foram adotados ciclos de 6 horas com filtração intermitente, no final de cada ciclo, 30 minutos eram destinados a esse processo, sendo interrompida a filtração a cada 10 minutos para o relaxamento da membrana, o tempo destinado ao relaxamento foi de 1 minuto (Judd, 2016). Por meio das condições adotadas, resultou em um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 18 horas. O valor de fluxo de filtração foi de 10.75 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, o qual está situado dentro da faixa de operação de BRM municipais, entre 5 – 30 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (Judd e Judd, 2011). No período destinado a filtração, eram retirados do sistema 5 litros de efluente tratado no período de filtração no final de cada ciclo, após esse processo, o enchimento era acionado realizando a reposição do mesmo volume de esgoto *in natura*. A aeração do sistema era realizada de maneira constante, sendo responsável pelos processos de homogeneização e oxigenação do licor misto. A concentração média de oxigênio dissolvido no reator era de 5 mg/L e, a demanda específica de aeração era de 0.5 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ e o tempo de homogeneização do reator era de 80 segundos.

A idade do lodo adotada para a operação do sistema foi de 20 dias controlada por meio da retirada diária de 750 mL de licor misto (biomassa). O tempo de operação do sistema foi de 60 dias corridos após a estabilização do sistema, período este adotado em função do tempo relativo à três vezes a idade do lodo ($\theta_c=20$ dias).

Monitoramento da eficiência do sistema

Foram realizadas análises laboratoriais das amostras coletadas em três pontos do sistema. O primeiro ponto analisado é caracterizado pelo esgoto “bruto” antes de entrar no sistema, o segundo ponto avaliado foi o licor misto localizado no reator aeróbio e o terceiro ponto o permeado, sendo este o efluente após o tratamento proposto.

As amostras coletadas foram caracterizadas de acordo com procedimentos padrão descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) segundo os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para caracterização do efluente e sua metodologia analítica empregada.

Parâmetros	Metodologia empregada
Demanda química de oxigênio solúvel (DQOs)	5220D
Demanda Bioquímica de oxigênio (DBO)	5530D
Nitrogênio amoniacal (NH ₃)	4500-NH ₃ F
Fósforo solúvel (P)	4500B
Cor aparente	2120C
Sólidos suspensos totais	2130B
Turbidez	2540B
pH	4500H+B

Para realização das análises de DQOs, NH₃ e P solúvel, as amostras foram previamente filtradas em membranas de 0.45 µm, com a finalidade de retirar os sólidos presentes no meio líquido e obter apenas a fração solúvel, evitando valores superestimados. Ainda foram monitorados a temperatura, a pressão transmembrana no momento da filtração, a concentração de sólidos suspensos voláteis e de produtos microbianos solúveis (SMP) e substâncias poliméricas extracelulares (EPS) em termos de proteínas e polissacarídeos do licor misto.

Além das análises supracitadas, foram realizados os cálculos da relação Alimento/Microrganismo (relação A/M) e da carga orgânica volumétrica (COV) por meio das equações 1 e 2, respectivamente, dispostas a seguir:

$$COV = \frac{Q \cdot DBO}{Vr} \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{A}{M} = \frac{DBO \cdot Q}{Vr \cdot SSV} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

COV = carga orgânica volumétrica (mg/L.dia)

Q = vazão (L/dia)

DBO = concentração de demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)

Vr = volume do reator

A/M = relação alimento/microrganismo (mgDBO/mgSSV.dia)

SSV = concentração de sólidos suspensos voláteis (mg/L)

Frequência das análises de monitoramento

As análises de monitoramento da pressão transmembrana eram realizadas diariamente com o objetivo de analisar o processo de colmatação do módulo de membranas, assim como, a aferição da temperatura do reator. Juntamente com essa análise, foi realizado o cálculo da velocidade de colmatação (VC) das membranas, a qual foi calculada considerando a variação da PTM ao longo

do tempo total de operação. Já as análises laboratoriais de DQOs, DBO, NH₃, P, SMP, EPS, cor aparente, turbidez e pH dos pontos de amostragem adotados e os sólidos suspensos totais e voláteis do licor misto foram realizadas semanalmente.

Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram analisados por meio da estatística descritiva. A análise de variância de um fator (ANOVA) seguido do teste de comparação de Tukey com significância de 5%, foi feita para a variável DQOs, o qual passou por transformação dos dados (raiz) para atingir os pressupostos da ANOVA. No que se refere aos dados relacionados ao potencial incrustante, foi feita uma matriz de correlação de Kendall envolvendo a PTM com as variáveis SMP, EPS, DQOs.

Resultados e discussão

Caracterização do efluente em estudo

A caracterização do esgoto está apresentada na Tabela 2 para os parâmetros avaliados.

Tabela 2. Valores médios da caracterização do esgoto doméstico bruto utilizado para tratamento por biorreator a membrana no decorrer da estratégia de operação.

Parâmetros	Valores médios
Demanda química de oxigênio solúvel (mg/L)	823
Demanda Bioquímica de oxigênio (mg/L)	611
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	16
Fósforo solúvel (mg/L)	4.6
Cor aparente (uC)	520
Turbidez (uT)	74
pH	5.18

Ao analisar a Tabela 2, é verificado elevados valores de demanda química de oxigênio solúvel e de demanda bioquímica de oxigênio, essas elevadas concentrações resultam numa relação entre DQO e DBO inferior a 2.5 (relação DQO/DBO: 1.3), o que segundo Von Sperling (2009), indica que o efluente é caracterizado por possuir uma elevada fração de material orgânico biodegradável. Este tipo de efluente, quando lançados em corpos hídricos sem seu devido tratamento, é responsável por diversos impactos ambientais, principalmente devido ao decaimento do oxigênio dissolvido por meio da sua degradação por microrganismos aeróbios, o que acarreta num grande desequilíbrio em toda a dinâmica aquática do local (Villa *et al.*, 2007).

Além disso, é expressiva as concentrações dos nutrientes na água residuária de estudo, dando ênfase especialmente na forma amoniacal do nitrogênio, onde o excesso desses compostos

resulta na eutrofização dos ambientes aquáticos. Esse desequilíbrio acarreta a redução das trocas gasosas com a atmosfera e na passagem de luz para o interior da massa líquida, além da poluição visual do local (Brum *et al.*, 2009).

É notório também os elevados teores de cor aparente e turbidez no esgoto os quais se dão principalmente devido a presença de sólidos coloidais, dissolvidos e em suspensão presentes no efluente. Estes quando despejados nos ambientes aquáticos resultam na redução da zona eufótica do meio, afetando os processos fotossintéticos.

Monitoramento do biorreator a membrana

O BRM-BS utilizado foi monitorado por meio da concentração de sólidos suspensos totais e voláteis do licor misto e o comportamento destes sólidos está apresentado na Figura 2.

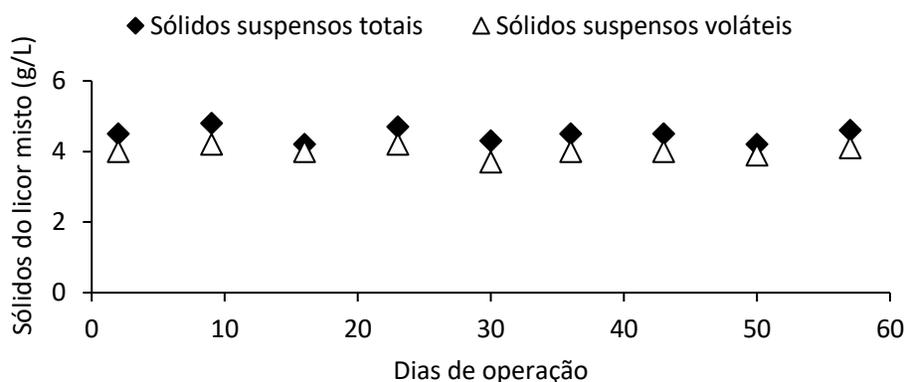


Figura 2. Comportamento da concentração de sólidos no licor misto do biorreator a membrana no decorrer da operação do sistema.

É verificado na Figura 2 que os teores de sólidos suspensos totais e sólidos suspensos voláteis do licor misto sofreram pouca variação no decorrer do período operado, o que indica uma boa estabilização do sistema. A concentração média de sólidos suspensos totais e voláteis no licor misto durante o período de operação do sistema foi de 4.5 e 4.0 g/L, respectivamente. Pode-se verificar uma elevada concentração das frações de sólidos avaliadas e isso se dá principalmente devido a retenção destes por meio do módulo de filtração, uma das principais vantagens dos biorreatores a membrana.

Os elevados teores de sólidos suspensos voláteis estão diretamente relacionados a concentração de microrganismos presentes no sistema, os quais são responsáveis pelos processos de

degradação do material orgânico do efluente (Jordão e Pessôa, 2011). Porém, em alguns casos, as elevadas concentrações destes parâmetros podem afetar de forma negativa, pois, favorecem o processo de colmatação dos módulos de membrana de filtração (Wu e Huang, 2009). Entretanto, diversos estudos foram realizados com biorreatores a membrana utilizando concentrações as quais variam 2 a 24 g/L e a partir dos mesmos, verificou-se que a concentração de sólidos não interferiu de forma negativa no processo de colmatação (Rosenberger e Kraume, 2002).

Ao analisar a relação entre SSV/SST, a qual está diretamente relacionada com o grau de mineralização do licor misto, é verificado o valor de 0.9. Desse modo o lodo é considerado de baixa mineralização e está dentro do recomendado para reatores biológicos (0.85) (Metcalf e Eddy, 2003).

Além dos sólidos do licor misto, monitorou-se também a temperatura a qual foi obtida um valor médio de 28 ± 1.27 °C no decorrer da operação do sistema, ocorrendo pouca variação devido ao seu controle realizado por meio do ar-condicionado presente na unidade. Os valores obtidos diariamente estiveram dentro dos considerados ideais para sistemas de tratamento biológico, os quais variam entre 25°C e 35°C (Jordão e Pessoa, 2011).

Avaliação da eficiência do tratamento

Por meio das análises realizadas obteve-se o monitoramento dos parâmetros avaliados em cada um dos pontos de amostragem adotados e os resultados médios obtidos estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Avaliação da eficiência do tratamento proposto em cada um dos pontos avaliados e sua eficiência total de remoção.

Parâmetros	Efluente bruto	Licor Misto	Permeado	Eficiência (%)
DQOs (mg/L)	797 ± 109	117 ± 60	45 ± 27	94
DBO (mg/L)	615 ± 199	-	0	100
NH ₃ (mg/L)	16 ± 1.3	13 ± 1.5	12.5 ± 1.4	20
Fósforo solúvel (mg/L)	4.6 ± 0.5	4.6 ± 0.3	4.6 ± 0.5	0
Cor aparente (uC)	520 ± 45.5	-	38.2 ± 9.9	93
Turbidez (uT)	74 ± 9.8	-	0.45 ± 0.1	99
pH	5.2 ± 1.1	6.8 ± 0.3	5.2 ± 1.5	-

Quando avaliado a remoção de demanda química de oxigênio em sua fração solúvel, o efluente bruto, antes do tratamento proposto, possuía uma concentração média de 797 mg/L a qual foi reduzida a 117 mg/L no reator aeróbio em função da elevada degradação biológica pelos

microrganismos decompositores. Após a filtração pelo módulo de membranas, a concentração de DQOs foi reduzida a uma média de 45 mg/L, reduzindo ainda mais tal concentração, conforme os testes estatísticos ANOVA e Tukey (5%) ($F=255$; $p=6.7E-17$).

A eficiência total de remoção no sistema BRMBS foi de 94%. Dessa remoção total, 85% foi atribuído à biomassa enquanto que 9% foi atribuído à membrana. A alta eficiência de remoção é resultado principalmente devido a elevada fração biodegradável do efluente em estudo como já mencionado anteriormente, todavia, a alta concentração de biomassa no sistema, a qual é uma das vantagens dos biorreatores a membrana, tende a maximizar os processos de degradação das frações orgânicas, além de não sobrecarregar o módulo de membranas (Judd e Judd, 2011).

Quando realizado o cálculo da estimativa da carga orgânica volumétrica (COV) do efluente em estudo, nota-se que a COV encontra-se dentro dos valores médios considerados ideais em sistemas de lodos ativados convencionais, o qual é operado de maneira similar aos biorreatores a membrana, variando de 0.8 a 2 kgDQO/m³/d, onde foi obtido um valor médio de 0.9 kgDQO/m³.d (Metcalf e Eddy, 2003). Quando realizado a estimativa da relação alimento microrganismo (A/M), ou seja, a quantidade de material orgânico fornecida de alimento para os microrganismos decompositores, foi obtido o valor médio de 0.5 KgDQO/KgSSV.d, valor o qual se encontra entre 0.3 a 0.6 kgDQO/kgSSV.d, que segundo Metcalf e Eddy (2003), são considerados ideais em sistemas de lodos ativados convencional, logo, a operação do sistema com elevadas concentrações de biomassa resultam valores mais baixos da relação A/M e uma remoção expressiva dos compostos orgânicos. Portanto, por meio dos valores obtidos, explica-se a elevada eficiência de remoção de tal parâmetro e torna-se explícito as vantagens da utilização dos BRM. Yang *et al.* (2009) ao operarem um biorreator a membrana de leito móvel e de forma convencional, obtiveram eficiências de remoção de DQO de 95 e 96%, respectivamente.

Da mesma maneira, é notória e muito expressiva a remoção de demanda bioquímica de oxigênio do esgoto tratado, onde 100% da concentração deste parâmetro foi removida. A DBO está diretamente relacionada com a fração orgânica presente no efluente, todavia, como supracitado, a elevada concentração de microrganismos decompositores resultou na remoção total deste parâmetro.

A avaliar a remoção dos nutrientes, as eficiências obtidas foram consideradas baixas, tendo em vista que essa concepção de tratamento não é responsável por remoção de compostos nitrogenados e fosfatados. Em relação ao nitrogênio em sua forma de amônia, foram removidos uma pequena porcentagem de 20%, não sendo de forma tão expressiva. Para que houvesse uma maior eficiência na remoção de nitrogênio, uma das alternativas a serem implantadas é a adição de um leito móvel no reator aeróbio favorecendo o desenvolvimento de microrganismos aderidos ao leito os quais são responsáveis pela degradação do material orgânico e também dos nutrientes

presentes nos esgotos (Fujii, *et al.*, 2013). Segundo Kermani *et al.* (2008), esses tipos de reatores favorecem o crescimento de microrganismos lentos como as bactérias nitrificantes e desnitrificantes o qual é favorecido devido ao seu mantimento no sistema e a produção de zonas anaeróbias e anóxicas no interior das peças.

Quando referido aos nutrientes de formas fosfatadas, o BRM operado de maneira convencional não é capaz de remover as concentrações de fósforo presentes no esgoto, o que fica nítido no presente estudo. Uma alternativa que se observa na prática é a incorporação de uma etapa anaeróbia ao sistema, onde os microrganismos presentes nestas zonas são capazes de assimilar o fósforo do esgoto e posteriormente são retiradas por meio do descarte do lodo, etapa conhecida como desfosfatação (Von Sperling, 2009). Outra alternativa seria a adição da eletrocoagulação, originando o que é chamado de eletrobiorreator, sendo capaz de precipitar o fósforo presente.

Ao avaliar a remoção de cor aparente e turbidez do esgoto, a eficiência é expressiva, uma vez que a filtração por membranas é responsável por reter a maior parte dos sólidos no reator, obtendo as eficiências de 92% e 99%, respectivamente. Devido a existência do processo de filtração nesse tipo de tratamento, resulta-se em um grande potencial de clarificação dos efluentes tratados, principalmente em função da retirada da fração sólida presente no esgoto, melhorando assim os aspectos estéticos e não impactando de forma maléfica nos corpos hídricos quando lançados, principalmente em função da redução da penetração da luz no meio aquático e assoreamento do local (Subtil *et al.*, 2013).

Avaliação do processo de colmatação da membrana de filtração

Na Figura 3 é apresentada o comportamento da pressão transmembrana (PTM) no decorrer dos 60 dias operacionais do BRM-BS. De acordo com a figura, a PTM aumentou gradualmente ao longo dos 60 dias operacionais, apresentando valor mínimo de 0.04 bar, máximo de 0.2 bar e uma velocidade de colmatação de 0.5 kPa/d. Tal valor encontra-se próximo ao observado por Jiang *et al.* (2018) para tempo de detenção hidráulica (TDH) de 18 horas e, abaixo dos valores de 1 – 3 kPa/d observados por Rodríguez-Hernandez *et al.* (2014) em um reator operado de modo contínuo. Desse modo, infere-se que além do TDH, a operação de modo descontínuo contribui em menores velocidades de colmatação das membranas.

Destaca-se que a PTM ficou abaixo do limite de 0.6 bar, assim, não havendo necessidade de limpeza química do módulo de membranas, de acordo com o recomendado pelo fabricante e com os autores Zsiri *et al.*, (2012). Tal comportamento pode estar relacionado com a operação do BRMBS em regime de fluxo sub-crítico, o qual é possível observar um crescimento da PTM mais lento no início da operação, seguido de um crescimento acentuado no decorrer da operação (Pollice *et al.*, 2005).

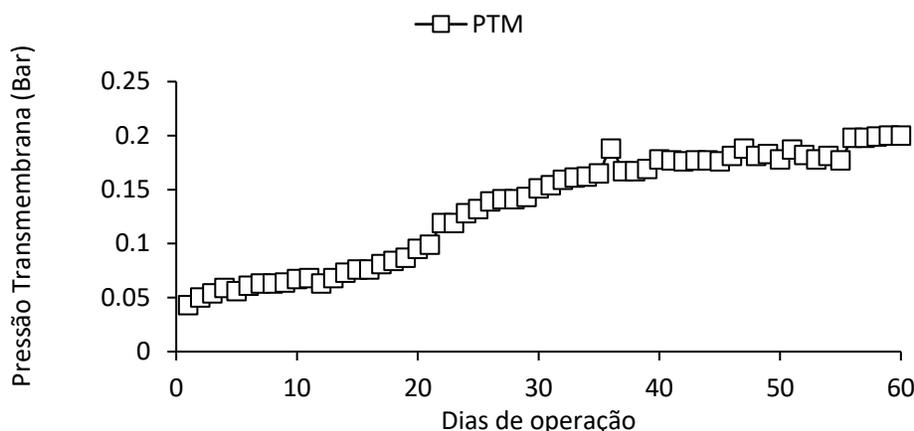


Figura 3. Valores da pressão transmembrana (PTM) ao longo dos dias operacionais

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios da fração solúvel em suspensão (SMP) e aderidas ao floco (EPS) de proteínas e polissacarídeos.

Tabela 4. Concentração média de proteínas e polissacarídeos na fração solúvel (SMP) e aderidas ao floco biológico (EPS) do licor misto

Parâmetros	Valores médios
SMP-proteínas (mg/L)	11.7 ± 1.5
SMP-polissacarídeos mg/L)	10.3 ± 1.6
EPS-proteínas (mg/gSSV)	104.7 ± 17.1
EPS-polissacarídeos (mg/gSSV)	126 ± 17

Segundo Judd (2016) e Lin *et al.*, (2014), SMP e EPS em ambas as formas contribuem com os processos relacionados à colmatagem. Desse modo, na Tabela 5, é apresentada uma matriz de correlação envolvendo esses parâmetros, além da DQOs, com a PTM.

Tabela 5. Matriz de correlação de Kendal da PTM com as variáveis DQOs, SMP e EPS.

Parâmetros	PTM (r_{Kendal} e p-valor)
DQO _s	0.85 – 0.0006*
SMP-proteínas (mg/L)	0.67 – 0.007*
SMP-polissacarídeos mg/L)	0.80 – 0.001*
EPS-proteínas (mg/gSSV)	0.76 – 0.002*
EPS-polissacarídeos (mg/gSSV)	0.70 – 0.0009*

*: significativo à 5% de probabilidade.

É possível observar que a concentração de proteínas e polissacarídeos na fração solúvel (SMP) foram menores quando comparadas as frações aderidas ao floco (EPS) (Tabela 4). Mesmo com baixos valores de PTM e velocidade de colmatação, tais parâmetros tiveram influência significativa com o aumento da PTM nas condições testadas, contribuindo diretamente com os fenômenos de colmatação das membranas. Roseberger *et al.* (2006) observaram correlação entre a concentração de EPS e índice de colmatação das membranas e, Wang *et al.* (2012) mostraram que a concentração de SMP influenciava na colmatação das membranas. O mesmo foi observado nas condições testadas.

Outro fator que pode contribuir com a baixa velocidade de colmatação das membranas é a idade do lodo. De acordo com Meng *et al.*, (2009), idade de lodo na faixa de 20-50 dias, contribuem para controle da concentração de EPS e colmatação das membranas, pois idades de lodo muito baixas favorecem a produção de SMP e EPS. Na presente pesquisa a mesma se encontra dentro da faixa observada pelos autores.

Os dados mostraram que a baixa velocidade de colmatação das membranas podem ser decorrentes, principalmente, da elevada eficiência de remoção de DQOs pela biomassa em conjunto com a idade de lodo utilizada e a forma de operação em batelada sequencial, os quais tornaram os processos relacionados à colmatação menos severos, trazendo a vantagem de uma maior vida útil para o módulo de membranas.

Conclusões

O sistema BRMBS apresentou excelente desempenho no tratamento de efluente municipal, atingindo eficiência média de remoção de: 94% DQOs, 100% de DBO₅, 93% de cor aparente e 99% de turbidez. Em contrapartida não foram observadas eficiências satisfatórias na remoção de nitrogênio amoniacal e fósforo.

Em relação ao potencial incrustante, as variáveis DQOs, SMP e EPS na forma de proteínas e polissacarídeos influenciaram significativamente no aumento da pressão transmembrana.

O modo de operação em batelada sequencial, as variáveis idade do lodo em 20 dias e a elevada contribuição pela biomassa na remoção de DQOs, tornaram os processos relacionados à colmatação menos severos. Outra vantagem observada foi a não necessidade de limpeza química do módulo de membranas devido ao não atingimento da pressão crítica.

Referências bibliográficas

- APHA, American Public Health Association (2017) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23rd.
- Belli, T. J., Battistelli, A.A., Bassin, J.P., Amaral, M.C.S., Lapolli, F.R. (2019). Influência da idade do lodo na colmatção das membranas em um biorreator à membrana tratando esgoto sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **24**(1), 157–168. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019169848>
- Brasil (2011) *Resolução CONAMA n° 430 de 13 de maio de 2011*. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA. Brasília, DF.
- Brum, L. F. W.; Santos Júnior, L. C. O.; Benedetti, S. (2009) Reaproveitamento de Água de Processo e Resíduos da Indústria de Laticínios. In: *Internacional Workshop Advances in Cleaner Production*, **2**, 2009, São Paulo. Anais. Acesso em: 12 set. 2023. Disponível em: <https://www.advancesincleanerproduction.net/second/files/sessoes/4a/5/L.%20F.%20W.%20Brum%20-%20Abstract.pdf>
- Esteves, F.A. (2011) *Fundamentos de limnologia*. 3a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 826 pp.
- Fujii, F.Y., Pivelli, R.P., Campos, F., Bueno, R.F., Sobrinho, P.A. (2013) Desempenho do reator integrado de lodo ativado com biofilme em leito móvel. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **18**(4), 349-358. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000400007>
- Jiang, Q., Hao, H.N.N., Nghiem, L.D, Hai, F.I., Price, W.E., Zhang, J., Liang, S. Deng, L., Guo, W. (2018) Effect of hydraulic retention time on the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system for micropollutants removal from municipal wastewater. *Bioresource Technology*, **247**, 1228-1232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.114>
- Jordão, E.P., Pessoa, C.A. (2011) *Tratamentos de esgotos domésticos*. 6rd ed. Rio de Janeiro: ABES.
- Judd, S.J. (2016) The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology. *Chemical Engineering Journal*, **305**(1), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.141>
- Judd, S.J., Judd, C. (2011) *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. 2a ed. Elsevier Ltd, Oxford, UK, 519 pp.
- Kermani, M., Bina, B., Movahedian, H., Amin, M.M., Nikaein, M. (2008) Application of Moving Bed Biofilm Process for Biological Organics and Nutrients Removal from Municipal Wastewater. *American Journal of Environmental Sciences*, **4**(6), 682-689. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.675.682>
- Lin, H., Zhang, M., Wang, F., Mneng, F., Liao, B-Q., Hong, H., Chen, J., Gao, W. (2014) A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. *Journal of Membrane Science*, **460**, 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.034>
- Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Those, C., Wilde, W., Koning, J., Van der Graaf, J., Wintgens, T. (2006) Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, **187**, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.086>
- Meng, F., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F. (2009) Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water research*, **43**(6), 1489- 1512. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- Metcalf, L., Eddy, H.P. (2016) *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5rd ed. Porto Alegre: AMGH, 2008 pp.
- Moura, L., Landau, E.C., Ferreira, A.M. (2016) Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado no Brasil. In: Moura, L., Landau, E.C. (Eds.), *Variação Geográfica Do Saneamento Básico No Brasil Em 2010: Domicílios Urbanos E Rurais*, Embrapa, Brasília – DF, 189-210.
- Pollice, A.; Brookes, A.; Jefferson, B.; Judd, S. Sub-critical flux fouling in membrane bioreactors: a review of recent literature. *Desalination*, **174**, 221-230, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.09.012>

- Rodríguez-Hernández, L., Esteban-García, A. L., Tejero, I. (2014). Comparison between a fixed bed hybrid membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor for municipal wastewater treatment: A pilot-scale study. *Bioresource Technology*, **152**, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.081>
- Rosenberger S., Kraume, M. (2002) Filterability of Activated Sludge in Membrane Bioreactors. *Desalination*, **146**, 373-379. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00515-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00515-5)
- Rosenberger, S., Laabs, C., Lesjean, B., Gnirss, R., Amy, G., Jekel, M., Schrotter, J. C. (2006) Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal
- SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2022) *Diagnóstico dos Serviços de Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - Água e Esgotos - 2022*. Acesso em: 22 mar. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>
- Subtil, E. L., Hespanhol, I., Mierzwa, J. C. (2013) Biorreatores com Membranas Submersas (BRMs): alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reúso. *Rev. Ambient. Água*, **8**(3). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1230>
- Villa, R. D., Silva, M. R., A., Nogueira, R. F. P. (2007) *Potencial de aplicação do processo foto fenton/solar como o pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios*. Acesso em: 13 set. 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/fxZjZwkjFPkYpNGZTZG3czp>
- Von Sperling, M. (2009) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. 4. reimp. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 452 pp.
- Wang, Z., Mei, X., Wu, Z., Ye, S., Yang, D. (2012) Effects of biopolymer discharge from MBR mixture on sludge characteristics and membrane fouling. *Chemical Engineering Journal*, **193**, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.019>
- Wu, J., Huang, X. (2009). Effect of mixed liquor properties on fouling propensity in membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, **342**, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.06.024>
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R. (2009) Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, **100**, 2369–2374. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00002890>
- Zsirai, T., Buzatu, P., Aerts, P., Judd, S.J. (2012) Efficacy of relaxation, backflushing, chemical cleaning and clogging removal for an immersed hollow fibre membrane bioreactor. *Water Research*, **46**(14), 4499-4507. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.004>