

II-803- COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO ENTRE BIORREATOR A MEMBRANA DE LEITO MÓVEL E CONVENCIONAL NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LATICÍNIOS

Juliana Vieira Schulomei

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

Guilherme Gavlak

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO).

Jeanette Beber de Souza

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Carlos Magno de Sousa Vidal ⁽⁴⁾

Biólogo pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Endereço⁽⁴⁾: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, CEP 84505-677 – Irati, PR, Brasil.

(E-mail: cmsvidal@unicentro.br)

RESUMO

Os biorreatores a membrana (BRM) têm se destacado dentre as tecnologias de tratamento de efluentes devido as suas diversas vantagens frente aos processos convencionais. Nos BRM acontecem ao mesmo tempo o tratamento biológico no reator e a separação física de particulados pela membrana, resultando em um permeado de excelente qualidade. O presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar o desempenho de um BRM, com e sem leito móvel, na remoção de nitrogênio e fósforo presente em efluente de laticínio, verificando também a influência do material suporte no processo de colmatação da membrana. Para tanto, o experimento foi conduzido em duas estratégias: utilizando um biorreator a membrana convencional (E1) e um biorreator a membrana com leito móvel (E2), sendo o sistema operado por 120 dias, com 60 dias de operação em cada estratégia. As eficiências médias de remoção obtidas na E1 e E2 foram, respectivamente: 95,6% e 97,6% para nitrogênio total kjeldahl; 92,24% e 96,13% para nitrogênio amoniacal. Em contraste com os bons resultados obtidos para os parâmetros citados, as eficiências de remoção de fósforo foram insatisfatórias, sendo de 8,16% para E1 e 7,91% para E2. A inserção do material suporte resultou em melhoria na remoção da de nitrogênio, com destaque para redução do processo de colmatação das membranas. Conclui-se que a utilização de biorreatores a membrana com leito móvel no tratamento de efluente de laticínios mostra-se como uma excelente alternativa para aprimorar a remoção de nitrogênio e minimizar a colmatação das membranas durante a operação.

PALAVRAS-CHAVE: remoção de nutrientes, tratamento avançado, biofilme e colmatação de membranas.



INTRODUÇÃO

A deterioração da qualidade dos corpos hídricos, causada principalmente pelo lançamento de efluentes *in natura* ou submetidos a processos de tratamento inefficientes, é um grave problema aos ecossistemas aquáticos e à qualidade de vida da população, devido à elevada presença de matéria orgânica, nutrientes, substâncias tóxicas e microrganismos patogênicos, estes últimos principalmente associados aos esgotos sanitários.

Dentre as diversas atividades industriais, a de laticínios apresenta grande potencial poluidor devido ao elevado consumo de água e geração de efluentes líquidos. Estes, quando despejados nos corpos hídricos sem tratamento adequado geram impacto negativo na qualidade dos corpos receptores pois apresentam elevada carga orgânica, presença de sólidos suspensos, óleos e graxas e, também, grande concentração de nutrientes associados a elevada concentração de proteínas presentes nesse tipo de efluente e ao uso de detergentes e ácido fosfórico para lavagem das instalações (ALMEIDA *et al.*, 2004; ANDRADE; MOTTA; AMARAL, 2011; ANDRADE *et al.*, 2014).

O tratamento deste tipo de efluente envolve a remoção de sólidos suspensos, óleos e gorduras no tratamento primário, remoção de matéria orgânica e nutrientes no tratamento secundário e, quando necessário, tratamento terciário para o polimento final do efluente (ANDRADE; MOTTA; AMARAL, 2011). O processo de tratamento biológico mais comumente utilizado para o tratamento de efluente de laticínio é o sistema de lodo ativado convencional e as lagoas aeradas. Entretanto devido a elevada carga orgânica desta água residuária, o sistema de tratamento é bastante susceptível a problemas de intumescimento e sedimentação do lodo, havendo também a necessidade de grandes áreas destinadas ao sistema de tratamento deste resíduo (CRISTIANIURBINA *et al.*, 2000 apud ALMEIDA *et al.*, 2004; SUBTIL; HESPANHOL; MIERZWA, 2013).

Entre as alternativas potenciais para o tratamento de efluentes de laticínios, tem-se os biorreatores a membrana (BRM) devido as suas vantagens frente aos processos convencionais de tratamento. A operação do BRM ocorre de maneira semelhante ao sistema de lodo ativado convencional, porém, há a substituição da etapa de sedimentação pelo processo de filtração em membranas, onde os sólidos são efetivamente removidos em um menor período de tempo e com maior eficiência (JUDD; JUDD, 2006; JEGATHEESAN *et al.*, 2016; HO *et al.*, 2017). Além da elevada qualidade dos efluentes produzidos, esses sistemas possuem outras vantagens, como a menor área requerida para a instalação, redução na quantidade de lodo gerado e elevada retenção de biomassa no interior do reator, garantindo assim uma melhor remoção de matéria orgânica e de nutrientes (PROVENZI, 2005; BELLI *et al.*, 2017).

Os biorreatores a membrana realizam de forma integrada duas funções que se diferem, o tratamento biológico no biorreator e a separação física exercida pelas membranas (LAPOLLI, 1998). O biorreator tem por função transformar a matéria orgânica e mineral em matéria biológica, enquanto a membrana realiza a separação das fases sólida e líquida. Assim, as membranas funcionam como uma etapa de tratamento



avançado, removendo sólidos suspensos e bactérias, garantindo inclusive a segurança microbiológica do permeado (MAESTRI, 2007; YOON *et al.*, 2004; PROVENZI, 2005).

Apesar de apresentar muitas vantagens frente a outros processos de tratamento, os BRM também apresentam algumas limitações, como o alto custo de instalação e manutenção. Este é devido principalmente às membranas, pois possuem vida útil limitada, necessitando de trocas periódicas, além da necessidade de intenso controle do processo de colmatção das mesmas (METCALF & EDDY, 2003; PROVENZI, 2005).

O processo de colmatção das membranas é o principal limitante dos BRM, pois resulta em uma redução do desempenho do processo, maior consumo de energia e de limpeza das membranas, aumentando assim os custos operacionais (LIAO *et al.*, 2004; RADJENOVI, 2008). O fenômeno da colmatção consiste na obstrução progressiva dos poros da membrana, devido a deposição indesejada de partículas suspensas e coloidais na superfície externa ou interna dos poros e, também, pela adsorção de macromoléculas ou células microbianas na superfície, formando a chamada “torta” (VIERO, 2006; ZHANG *et al.*, 2012).

A natureza e a extensão deste processo de incrustação das membranas são influenciadas principalmente pelas características da biomassa, condições operacionais e características das membranas (CHANG *et al.*, 2002). O efeito resultante do processo de colmatção é a diminuição da área efetiva de filtração e, conseqüentemente, redução da permeabilidade, além de um aumento da pressão de transmembrana (VIERO, 2006; MANICA, 2019).

A fim de minimizar o fenômeno de colmatção de membranas, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas, entre elas a utilização de leito móvel em biorreatores a membrana, onde a inserção de material suporte em suspensão propicia o desenvolvimento de biofilme aderido à superfície desse material dentro do tanque de aeração (LIU *et al.*, 2010). Este processo baseia-se na inserção de pequenas peças, denominadas *biomedias*, de baixa densidade e elevada área superficial no interior do reator, atuando como meio suporte para o crescimento do biofilme (DELNAVAZ; AYATI; GANJIDOUST, 2010; LEYVA-DÍAZ *et al.*, 2013).

Além de uma melhora na eficiência do processo de tratamento, a literatura tem mostrado que a utilização de material suporte tem uma influência positiva na mitigação da colmatção das membranas, isto devido ao fato de que parte da biomassa fica retida no interior do material suporte contribuindo para diminuição da deposição do biofilme nas membranas, todavia são necessários mais estudos na área comparando um mesmo reator operado sob duas concepções diferentes, com ou sem a presença de *biomedias*, tal qual se faz presente nesta pesquisa.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de um biorreator a membrana, operado com e sem leito móvel, no tratamento de efluente de laticínio, comparando o desempenho na remoção de nutrientes, bem como avaliar a influência da inserção de material suporte no processo de colmatção da membrana.

MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade experimental utilizada é composta por um tanque retangular em acrílico, com volume total de 60,0 L e volume útil de 57,0 L, com as seguintes dimensões: 40,0 cm de comprimento, 35,0 cm de largura e 47,0 cm de altura. No centro do reator instalou-se o módulo de membrana, sendo este de microfiltração e do tipo submerso. A aeração do sistema foi realizada por um compressor, sendo o controle da vazão feito através de rotâmetros, um controlando a vazão de ar da membrana e outro ligado a três difusores de bolha fina, tipo mangueira porosa, instaladas na base do reator.

O sistema foi alimentado por gravidade, controlado através de bóia de nível, mantendo o sistema constante. A retirada de permeado fez-se através de uma bomba peristáltica digital (MILAN BPD/2), possibilitando a operação do sistema com vazão de entrada e saída constantes. O controle da pressão transmembrana fez-se através de um sensor de pressão conectado a um vacuômetro digital e acoplado à tubulação de saída de permeado. Para a automação do processo, o sistema era dotado de uma placa de arduino.

O módulo de membrana utilizado foi fabricado pela empresa Koch Membrane Systems®, tendo as seguintes dimensões: 0,37 m de altura, 0,26 m de diâmetro com tamanho médio dos poros ou diâmetro de corte de $3,0 \times 10^{-8}$ m e área útil de permeação de 0,5 m². Quanto à morfologia, as membranas são porosas assimétricas e constituídas de fluoreto de polivinilideno (PVDF).

O período total de operação do sistema foi de 120 dias, sendo estes divididos em duas etapas de 60 dias cada:

- Estratégia 1 (E1): período em que operou-se o sistema BRM convencional, servindo como controle para comparação com a etapa seguinte;
- Estratégia 2 (E2): período em que operou-se o sistema BRM acrescido de leito móvel.

Durante todo o período de monitoramento do sistema, o reator foi operado em fluxo contínuo, entretanto, a filtração foi aplicada de forma intermitente, permitindo o relaxamento da membrana, a cada 8 minutos de filtração havia uma pausa de 1 minuto sem filtração (JUDD; JUDD, 2006; WU *et al.*, 2008). Essa técnica é realizada para minimizar a colmatação das membranas durante a operação.

O reator foi operado com idade do lodo de 20 dias, sendo feito descartes diários de 2,8 L de lodo do licor misto. Este valor de θ_c está entre a faixa de valores mais utilizada na literatura (POLLICE *et al.*, 2008; DEZOTTI, 2008). O tempo de detenção hidráulica foi fixado em 20 horas, também estando dentro da faixa de TDH da literatura para a operação de BRM (HASAN, 2011; GIWA *et al.*, 2016). O TDH foi calculado dividindo-se o volume útil do reator, 57,0 L, pela vazão de saída do permeado, de 2,85 L/h.

A fim de manter o reator sob condições mais estáveis, a temperatura do ambiente onde era estava o BRM era controlada entre 20 e 25 °C durante todo o período de operação. O pH do licor misto também foi monitorado, buscando-se manter o mesmo entre 7,0 e 8,0, sendo feita a correção de pH quando necessário.

Para dar início à operação do sistema, o reator foi inoculado com lodo proveniente da estação de tratamento de uma indústria de laticínios da região. Na empresa, o efluente seguia por um sistema composto de caixa de gordura, flutador, uma segunda caixa de gordura, lagoa anaeróbia, lagoa aeróbia e lagoa de sedimentação. Antecedendo o período de operação, o lodo coletado na lagoa aeróbia foi aclimatado por 30 dias e somente após este período iniciou-se a coleta de dados para o presente trabalho. O reator foi alimentado durante todo o período de operação com efluente desta mesma indústria de laticínios, proveniente da lagoa anaeróbia, sendo feitas coletas semanais para reabastecer o reservatório do sistema.

Na segunda estratégia de operação, o reator foi preenchido com dois tipos de material suporte, ambos de forma cilíndrica, sendo o primeiro de polietileno, da marca AMB BioMedia™, com 15 mm de diâmetro e superfície de 550 m²/m³ e, o segundo, de polipropileno, da marca ALFA BioMídia™, com 30 mm de diâmetro e superfície de 700 m²/m³. Seguindo as recomendações presentes na literatura, adotou-se a proporção de preenchimento de 30% do volume do reator (RUSTEN *et al.*, 2006; YANG *et al.*, 2009; LEYVA-DÍAZ *et al.*, 2015), usando-se 15% de cada *biomedia*.

Para a obtenção de uma análise geral do funcionamento do sistema, foram coletadas amostras de três diferentes pontos, sendo eles: Ponto 1 – Reservatório de esgoto para alimentação (afluente); Ponto 2 – Tanque de aeração (licor misto); Ponto 3 – Reservatório de permeado (efluente). No Quadro 1 estão apresentados os parâmetros analisados em cada ponto de coleta.

Quadro 1 – Pontos de coleta e respectivas análises realizadas.

Ponto de coleta	Análises realizadas
1 – Reservatório de esgoto para alimentação	P-PO ₄ ³⁻ , N-NH ₄ ⁺ , Nitrogênio Total, pH
2 – Tanque de aeração	N-NH ₄ , pH
3 – Reservatório de permeado	P-PO ₄ ³⁻ , N-NH ₄ ⁺ , Nitrogênio Total e pH

A avaliação e o monitoramento do desempenho de cada estratégia foram realizados por meio das análises citadas no quadro acima. Além destas, fez-se o monitoramento da pressão transmembrana diretamente no sistema. Os métodos analíticos utilizados em cada análise e a frequência de realização destas encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Métodos analíticos, frequência de amostragem e respectivas técnicas utilizadas.

Parâmetro	Frequência	Técnica
Fosfato P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	2 vezes/semana	(4500-P) Método colorimétrico do ácido ascórbico (APHA, 1999) e leitura em espectrofotômetro UV-Vis HACH DR 6000
Nitrogênio Amoniacal N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	2 vezes/semana	Método colorimétrico de Nessler (VOGEL, 1992) e leitura em espectrofotômetro UV-Vis HACH DR 6000
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	1 vez/semana	(4500 A) Método Kjeldahl (APHA, 1999) e leitura em espectrofotômetro UV-Vis HACH DR 6000



pH	2 vezes/semana	(4500-H ⁺ B) Método potenciométrico de eletrodo combinado (APHA, 1999) e leitura em pHmetro PHS-38
PTM (bar)	1 vez/dia	Diferença de pressão (vacuômetro)

A partir do monitoramento da pressão de transmembrana, fez-se a limpeza física do módulo de membranas sempre que esta atingia o valor de 0,6 bar, de acordo com as instruções do fabricante. A limpeza química da membrana também foi realizada ao fim de cada estratégia, visando assegurar as mesmas condições operacionais para cada uma das etapas. Para este procedimento, fez-se a retirada do módulo do reator e a sua inserção em solução de limpeza, composta de hipoclorito de sódio 200 ppm por 2 horas. Após este processo, o módulo foi lavado com água corrente, a fim de retirar o excesso de hipoclorito, e retornado ao biorreator.

Para a tabulação e análise estatística dos dados fez-se uso dos *softwares* Excel e R, realizando-se testes de normalidade e testes de Student e Wilcoxon, para amostras dependentes, a fim de verificar a existência de diferença estatística entre as estratégias utilizadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de operação do sistema, o efluente utilizado nesta pesquisa apresentou, em média, as concentrações expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização físico-química do efluente de laticínio estudado.

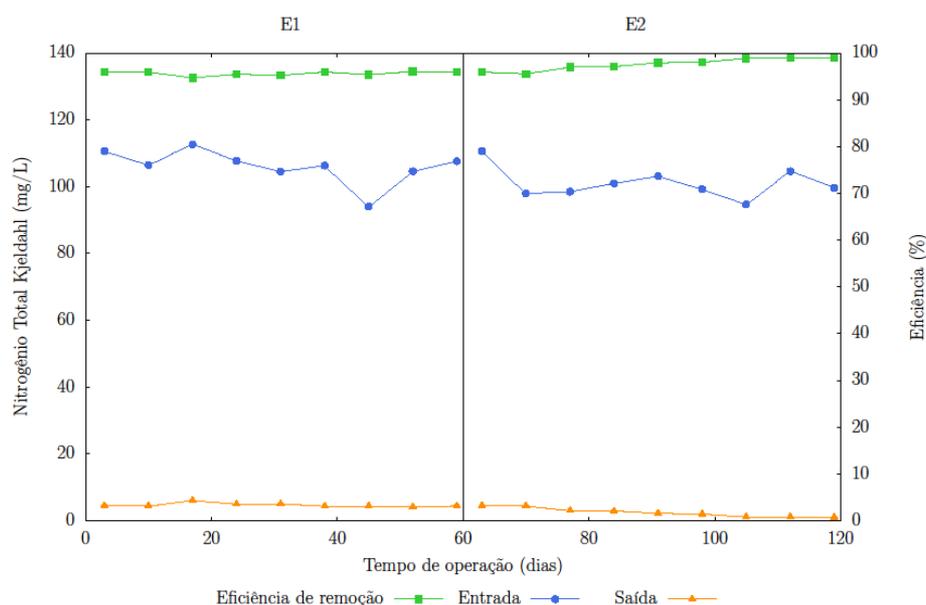
Parâmetro	Média
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	2,90 ± 0,47
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	51,9 ± 7,3
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	103,5 ± 5,4

A variação destas características ao longo do processo operacional é devido à frequência semanal de coletas do efluente, além da flutuação no próprio processo produtivo da indústria de laticínios. Verifica-se na Tabela 1 as elevadas concentrações de compostos nitrogenados presentes no efluente estudado.

Os efluentes de laticínios caracterizam-se por apresentarem uma elevada carga de nutrientes, proveniente principalmente das proteínas do leite e dos produtos de limpeza utilizados na indústria (ALMEIDA *et al.*, 2004; ANDRADE *et al.*, 2014). Para o nitrogênio total kjeldahl, o processo de tratamento aplicado apresentou uma eficiência média de remoção de 95,6% para E1 e 97,6% para E2. Já para o nitrogênio amoniacal, a eficiência média de remoção foi de 92,24% para E1 e 96,13% para E2. Para ambos os parâmetros, houve uma melhora significativa ($p \leq 0,05$) na eficiência de remoção de nitrogênio com a adição de leito móvel ao biorreator a membrana.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas as concentrações de entrada e saída destes parâmetros, bem como a eficiência de remoção de cada um deles.

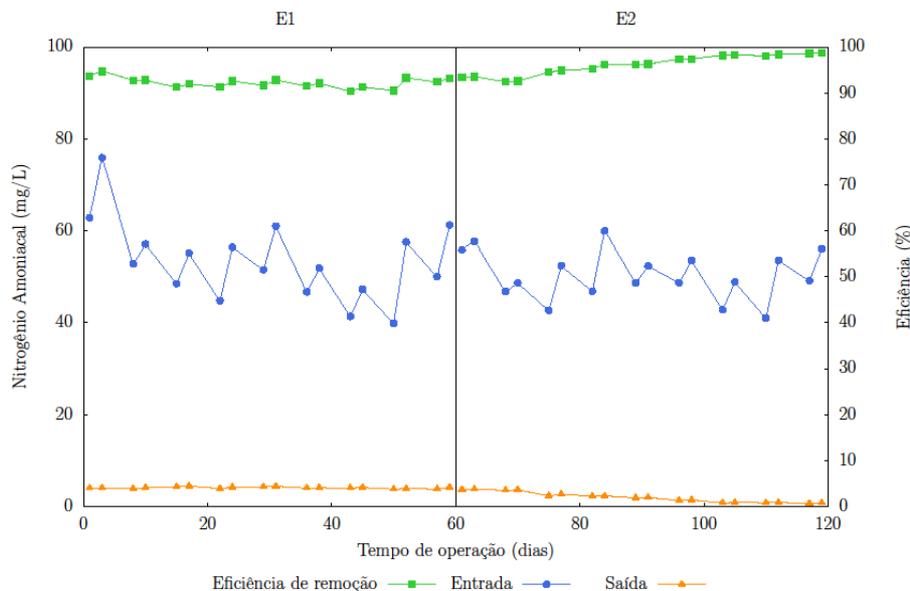
Figura 1 – Concentrações de entrada e saída de Nitrogênio Total Kjeldahl, bem como sua eficiência de remoção, para o biorreator a membrana convencional (E1) e para o biorreator a membrana com leito móvel (E2).



Luo *et al.* (2015) reportaram remoções de nitrogênio amoniacal de 84,9% e 56,1% e de nitrogênio total de 45,2% e 21,9% em um estudo comparando biorreatores a membrana com e sem leito móvel, respectivamente, para o tratamento de efluente sanitário sintético. Já para efluente de laticínios, Fraga *et al.* (2016) obtiveram remoções de nitrogênio total e amoniacal de 93,1% e 99,6% respectivamente, em um biorreator de membrana convencional.

A partir das Figuras 2 e 3 é possível concluir que os melhores resultados foram observados a partir da metade da segunda estratégia, onde as eficiências de remoção chegaram a 99% para o nitrogênio total kjeldahl e 98,7% para o nitrogênio amoniacal, pois já havia um maior crescimento e estabilidade do biofilme formado sobre o leito móvel inserido no reator.

Figura 2 – Concentrações de entrada e saída de Nitrogênio Amoniacal, bem como sua eficiência de remoção, para o biorreator a membrana convencional (E1) e para o biorreator a membrana com leito móvel (E2).

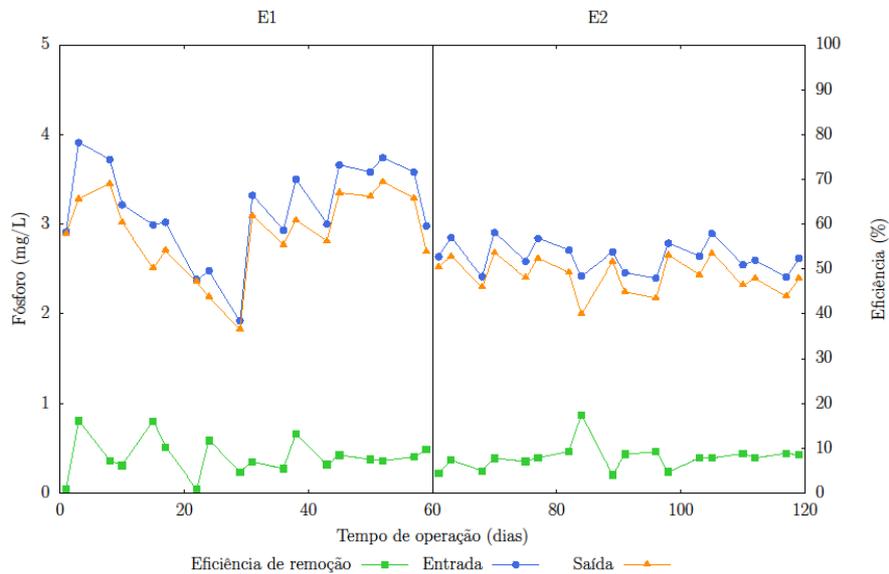


Em contraste com os resultados anteriores, para o fósforo total obteve-se baixas eficiências de remoção durante todo o período experimental. Para este parâmetro foram obtidas médias de remoção de 8,16% para E1 e 7,91% para E2, não apresentando diferença estatística significativa ($p \geq 0,05$) entre as duas estratégias utilizadas. Nos estudos de Luo *et al.* (2015), houve uma remoção de fosfato de 34,9% em um biorreator a membrana com leito móvel e 45,1% em um biorreator a membrana convencional.

Na Figura 3 é apresentada as concentrações de entrada e saída deste parâmetro e, também, sua eficiência de remoção. É possível observar uma maior instabilidade nas concentrações de fosfato durante a primeira estratégia, devido as variações de produção na indústria da qual era proveniente o efluente.

A pequena eficiência de remoção alcançada durante a operação do sistema possivelmente é resultado apenas da assimilação biológica de fósforo pela síntese celular das bactérias presentes no tanque de aeração. Assim, o sistema de biorreatores a membrana, com e sem leito móvel, não se mostra uma alternativa adequada para remoção de fósforo de efluentes de laticínios nas condições operacionais empregadas.

Figura 3 – Concentrações de entrada e saída de Fósforo, bem como sua eficiência de remoção, para o biorreator a membrana convencional (E1) e para o biorreator a membrana com leito móvel (E2).



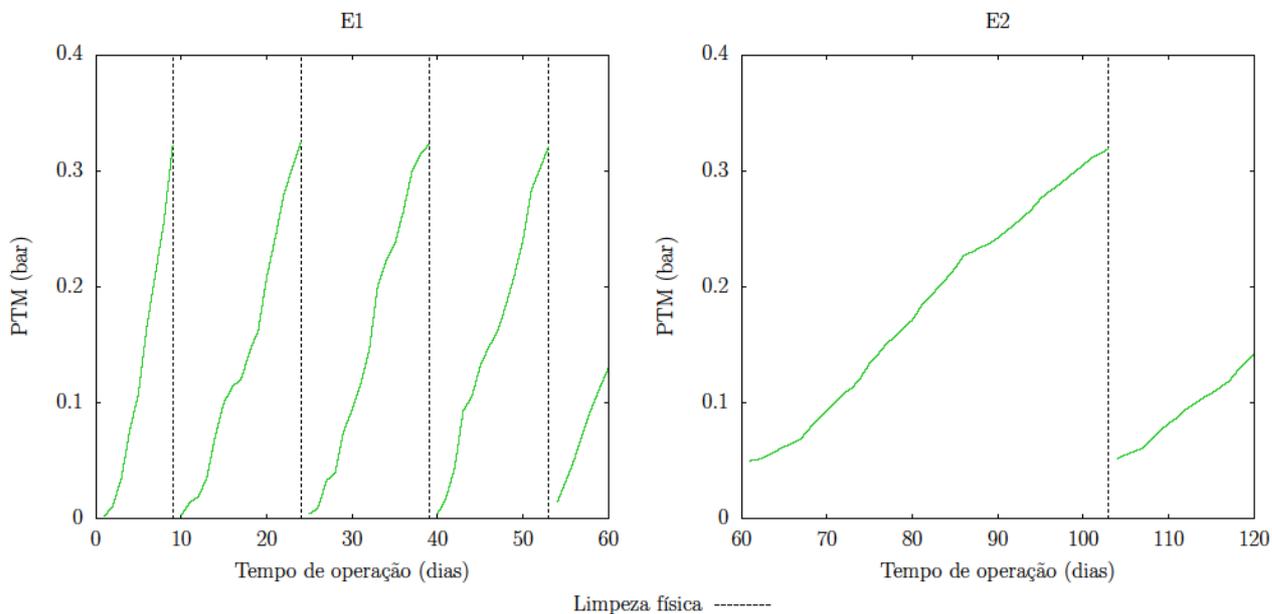
Os biorreatores a membrana de leito móvel podem apresentar maior remoção de fósforo, entretanto é necessário um tempo maior de aclimação para o desenvolvimento das bactérias responsáveis pelo processo de remoção biológica avançada de fósforo. No efluente em estudo, as concentrações encontradas de fósforo foram relativamente baixas, não trazendo grandes impactos aos corpos receptores. Assim, em efluentes com altas concentrações de fósforo ou em sistemas de tratamento onde o principal objetivo seja a adequação deste parâmetro, uma alternativa é a utilização de eletrocoagulação associada ao biorreator a membrana. Em eletrobiorreatores a membrana (EBRM), os íons de alumínio dissociados reagem com os íons fosfatos formando complexos insolúveis que precipitam. Manica (2019) reportou uma eficiência próxima a 100% na remoção de fósforo de esgoto sanitário sintético utilizando o sistema EBRM com diferentes densidades de corrente elétrica.

Colmatação da membrana

Nos biorreatores a membrana a colmatação ocorre devido principalmente a adsorção de solutos ou colóides sobre a superfície ou poros da membrana, deposição de flocos biológicos sobre sua superfície, formação de “torta” sobre a membrana e mudanças na composição das partículas ao longo do período de operação do sistema (MENG *et al.*, 2009).

A Figura 4 apresenta o comportamento da pressão transmembrana ao longo de todo o período experimental.

Figura 4 – Comportamento da PTM e frequência de limpeza para o biorreator a membrana convencional (E1) e para o biorreator a membrana com leito móvel (E2).



Por meio da Figura 5 é possível observar que a adição de material suporte ao tanque de aeração interferiu positivamente no fenômeno de colmatação da membrana, apresentando excelentes resultados. Durante a E1 a colmatação da membrana ocorreu com maior intensidade, sendo necessária também uma maior frequência de realização de limpeza física da membrana, sempre que esta atingiu o limite de pressão indicado pelo fabricante. Já durante a E2 o processo de colmatação deu-se de forma mais lenta, sendo necessária apenas uma limpeza física da membrana durante toda a estratégia. Esse foi o principal resultado obtido na presente pesquisa, evidenciando-se a minimização da colmatação das membranas quando o BRM foi operado com leito móvel.

Os estudos de Liu *et al.* (2012) mostram que a presença de leito móvel no reator retardou o aumento da pressão transmembrana em comparação ao reator com biomassa em suspensão. Já Khan *et al.* (2012) concluíram que a presença de material suporte diminuiu em 33% o processo de colmatação de membranas em um reator híbrido em comparação com um reator convencional.

Alves (2016) também concluiu que a presença de material suporte no reator diminuiu significativamente a incrustação da membrana, que para Duan *et al.* (2015) deve-se ao fato da colisão entre o material suporte e as fibras da membrana levarem a formação de forças de atrito, que mitigam a formação de biofilme na superfície externa da membrana, melhorando assim a sua permeabilidade.

Assim pode-se observar que a inserção de material suporte ao biorreator a membrana, além de melhorar a eficiência global do tratamento, também diminuiu significativamente o processo de colmatação de membranas, reduzindo assim os custos do processo.



CONCLUSÕES

A presente pesquisa evidencia o biorreator a membrana, com e sem leito móvel, como uma excelente alternativa no tratamento de efluentes de laticínios, principalmente no que tange a remoção de matéria orgânica, nitrogênio, cor verdadeira e turbidez.

Também é possível observar como principal conclusão da pesquisa a minimização da colmatação da membrana quando o reator foi operado com as *biomedias*. Aliado a isso, constatou-se uma melhora na eficiência global do processo com a adição de leito móvel ao tanque de aeração, no que se refere a remoção de matéria orgânica, cor verdadeira, nitrogênio total kjeldahl e nitrogênio amoniacal. Entretanto, para o fósforo, não foram obtidos resultados satisfatórios em nenhuma das estratégias operacionais utilizadas.

Portanto, é possível concluir que a utilização de material suporte nos BRM mostra-se como uma alternativa de grande potencial para o aprimoramento da qualidade do permeado e na minimização da colmatação da membrana durante o processo de tratamento de efluente de laticínio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, E.; ASSALIN, M. R.; ROSA, M. A.; DURÁN, N. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. *Química Nova*, v. 27, n. 5, p. 818–824, out. 2004.
- ALVES, A. B. B. **Avaliação da filtrabilidade do licor misto em biorreator a membrana com biomassa flocculenta e biorreator a membrana com biomassa aderida**. 2016. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- ANDRADE, L. H.; MENDES, F. D. S.; CERQUEIRA, N.; ESPÍNDOLA, J. C. A.; AMARAL, M. C. S. Distribuição de massa molar em um biorreator com membrana para tratamento de efluente de laticínios. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 325-334, 2014.
- ANDRADE, L.H.; MOTTA, G.E.; AMARAL, M.C.S. Caracterização detalhada de efluentes de indústria de laticínios. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 26 **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2011.
- ANDRADE, L. H.; SANTOS, L. S.; SOUZA, M.; ESPINDOLA, J. C.; AMARAL, M.C.S. Comparação do desempenho de biorreatores com membranas com e sem leito móvel para tratamento de vinhoto. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia. **Anais do 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2013.
- BELLI, T. J.; BERNARDELLI, J. K. B.; COSTA, R. E.; BASSIN, J. P.; AMARAL, M. C. S.; LAPOLLI, F. R. Effect of solids retention time on nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in a sequencing batch membrane bioreactor. *Environ Technol.*, v. 38, n. 7, p. 806-815, 2017.
- CHANG, I.-S.; LE-CLECH, P.; JEFFERSON, B.; JUDD, S. Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering*, v. 128, n. 11, p. 1018–1029, 2002.
- DELNAVAZ, M.; AYATI, B.; GANJIDOUST, H. Prediction of moving bed biofilm reactor (MBBR) performance for the treatment of aniline using artificial neural networks (ANN). *Journal of Hazardous Materials*, v.179, p. 769-77, 2010.
- DEZOTTI, M. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008.
- DUAN, L.; LI, S.; HAN, L.; SONG, Y.-H.; ZHOU, B.; ZHANG, J. Comparison between moving bed-membrane bioreactor and conventional membrane bioreactor systems. Part I: membrane fouling. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, n. 9, p. 4881–4890, 2015.



- FRAGA, F. A.; GARCÍA, H. A.; HOOIJMANS, C. M.; A, MÍGUEZ, D.; BRDJANOVIC, D. Evaluation of a membrane bioreactor on dairy wastewater treatment and reuse in Uruguay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, p. 1-13, 2016.
- GIWA, A.; DAER, S.; AHMED, I.; MARPU, P. R.; HASAN, S. W. Experimental investigation and artificial neural networks ANNs modeling of electrically-enhanced membrane bioreactor for wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 11, p. 88-97, 2016.
- HASAN, S. **Design and Performance of a Pilot Submerged Membrane Electro-Bioreactor (SMEBR) for Wastewater Treatment**. 2011. 261 f. Tese (Doutorado em Filosofia - Engenharia Civil) - Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, Canadá, 2011.
- HO, K. C.; TEOW, Y. H.; ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. An Overview of Electrically enhanced Membrane Bioreactor (EMBR) for Fouling Suppression. **Journal of Engineering Science & Technology Review**, v. 10, n. 3, 2017.
- JEGATHEESAN, V.; PRAMANIK, B.; CHEN, J.; NAVARATNA, D.; CHANG, C.-Y.; SHU, L. Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 204, p.202-212, 2016.
- JUDD, S.; JUDD, C. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment**. 1. ed. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2006.
- JUDD, S.; JUDD, C. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment**. 2. ed. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2011.
- KHAN, S. J.; AFRID, Z.U.R.; VISVANATHAN, C.; JEGATHEESAN, V. Influence of biofilm carriers on membrane fouling propensity in moving biofilm membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, v. 113, p. 161-164, 2012.
- LAPOLLI, F. R. **Biofiltração e Microfiltração Tangencial para Tratamento de Esgotos**. 1998. 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- LEYVA-DIAZ, J.C.; CALDERON, K.; RODRIGUEZ, F.A.; GONZALEZ-LOPEZ, J.; HONTORIA, E.; POYATOS, J. M. Comparative kinetic study between moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor and membrane bioreactor systems and their influence on organic matter and nutrients removal, **Biochemical Engineering Journal**, v. 77, p. 28-40, 2013.
- LIAO, B. Q., BAGLEY, D. M., KRAEMER, H. E., LEPPARD, G. G., LISS, S. N., A Review of Biofouling and its Control in Membrane Separation Bioreactors, **Water Environmental Research**, v. 76, n. 5, p. 425-436, 2004.
- LIU, Q.; WANG, X. C.; LIU, Y.; YUAN, H.; DU, Y. Performance of a hybrid membrane bioreactor in municipal wastewater treatment. **Desalination**, v. 258, n. 1-3, p. 143- 147, 2010.
- LIU, Y.; LIU, Z.; ZHANG, A.; CHEN, Y.; WANG, X. The role of EPS concentration on membrane fouling control: Comparison analysis of hybrid membrane bioreactor and conventional membrane bioreactor. **Desalination**, v. 305, p. 38-43, 2012.
- LUO, Y.; JIANG, Q.; NGO, H. H.; NGHIEM, L. D.; HAI, F. I.; PRICE, W. E.; WANG, J.; GUO, W. Evaluation of micropollutant removal and fouling reduction in a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system. **Bioresource Technology**, v. 191, p. 355-359, 2015.
- MAESTRI, R. S. **Biorreator a membrana como alternativa para o tratamento de esgotos sanitários e reúso da água**. 2007. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- MANICA, M. **Eletrobiorreator a membrana aplicado ao tratamento de esgoto sanitário visando a remoção de matéria orgânica e nutrientes e o estudo do processo de colmatação da membrana**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2018.
- MENG, F.; SHI, B.; YANG, F.; ZHANG, H. Effect of hydraulic retention time on membrane fouling and biomass characteristics in submerged membrane bioreactors. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 30, n. 5, p. 359-367, 2007.
- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment and Reuse**. Fourth Edition, New York, 1819 p., 2003.
- POLLICE, A.; LAERA, G.; SATURNO, D.; GIORDANO, C. Effects of sludge retention time on the performance of membrane bioreactor treating municipal wastewater. **Journal of Membrane Science**, v. 317, n. 1-2, p. 65-70, 2008.
- PROVENZI, G. **Biorreator a membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: estudos hidrodinâmicos e físico-químicos no controle da colmatação**. 2005. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia



Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

RADJENIVI, J. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. **Handbook of Environmental Chemistry**, v. 5, p. 37–101, 2008.

RUSTEN, B.; EIKEBROKK, B.; ULGENES, Y.; LYGREN, E. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. **Aquacultural Engineering**, v. 34, p.322–331, 2006.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reúso**. 1. ed. São Paulo: ABES, 2001.

SOUZA, E.; COSTA, R. E.; LAPOLLI, F. R.; BELLI, T. J. Biorreator a membrana de leito móvel em batelada sequencial aplicado ao tratamento de esgoto sanitário. In: Congresso ABES/Feira Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2017, São Paulo. Anais Congresso ABES/Feira Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 2017.

SUBTIL, E. L.; HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C. Biorreatores com Membranas Submersas (BRMs): alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reúso. **Rev. Ambient. Água**, v. 8, n. 3, 2013.

VIERO, A. F. **Avaliação do desempenho de um biorreator com membranas submersas para tratamento de efluente**. 2006. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio De Janeiro, 2006.

WU, J.; LE-CLECH, P.; STUETZ, R. M.; FANE, A. G.; CHEN, V. Effects of relaxation and backwashing conditions on fouling in membrane bioreactor. **Journal of Membrane Science**, v. 324, n. 1, p. 26-32, 2008.

YANG, S.; YANG, F.; FU, Z.; LEI, R. Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 2369–2374, 2009.

YOON, S.H.; KIM, H.S.; YEOM, I.T. The optimum operational condition of membrane bioreactor (MBR): Cost estimation of aeration and sludge treatment. **Water Research**. v.38, 37-46 p., 2004.

ZHANG, T. C.; SURAMPALLI, R. Y.; VIGNESWARAN, S.; TYAGI, R. D.; LEONG ONG, S.; KAO, C. M. Membrane technology and environmental applications. **American Society of Civil Engineers**: Virginia, 2012.