

II-058 – BIORREATOR A MEMBRANA DE LEITO MÓVEL EM BATELADA SEQUENCIAL APLICADO AO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Emerson Souza⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Mestrando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Rayra Emanuely da Costa⁽²⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná. Doutoranda em Engenharia Ambiental pela UFSC;

Flávio Rubens Lapolli⁽³⁾

Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela USP; Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC

Tiago José Belli⁽⁴⁾

Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor do Departamento de Engenharia Sanitária do Centro de Educação do Alto Vale do Itajaí-CEAVI, Universidade do Estado de Santa Catarina-UDESC

Endereço⁽¹⁾: Rua Sebastiana Coutinho, 1420 – São José – SC - CEP: 88113-240 - Brasil - Tel: (48) 996486599 - e-mail: emeersons@hotmail.com

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de um biorreator a membrana em batelada sequencial de leito móvel (BRMBS-LM) para a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo de esgoto sanitário. O reator, que foi construído a uma escala piloto com um volume de 18,3 L, foi operado por 80 dias e alimentado com esgoto doméstico captado junto à rede coletora de esgoto. O BRMBS-LM foi operado sob regime batelada sequencial, com um tempo de ciclo total de 3 horas, incluindo as fases de alimentação, anóxica/anaeróbia e de aeração/filtração. Os resultados obtidos apontaram uma elevada capacidade do BRMBS-LM na remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, com eficiência média de remoção de DQO de 96,9%, nitrogênio total de 72,3% e fósforo total de 82,1%. Os ensaios de bancada com a biomassa do BRMBS-LM revelaram que a presença do material suporte favoreceu a absorção de fosfato pela respiração anóxica, realizada pelas DPAOs, em comparação a absorção de fosfato pela respiração aeróbia, realizada pelas PAOs. Além de se mostrar vantajoso para a remoção de fósforo, a presença do material suporte contribuiu para a alta remoção de nitrogênio total, visto que os processos de nitrificação e desnitrificação ocorriam sob o material suporte e no licor misto. Tais eficiências observadas neste estudo condicionam os biorreatores à membrana de leito móvel como uma alternativa interessante quando se almeja a remoção de remoção de matéria orgânica e nutrientes de esgoto sanitário.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreator a membrana em batelada sequencial, leito móvel, tratamento de esgoto, remoção de fósforo.

INTRODUÇÃO

O lançamento de efluentes domésticos sem o devido tratamento incorre em uma série de problemas aos corpos hídricos. Entre os problemas causados destacam-se: (i) a redução da concentração de oxigênio dissolvido do manancial, devido ao aporte excessivo de matéria orgânica; (ii) o aumento da turbidez da água e a redução da atividade fotossintética, devido a concentração elevada de nutrientes presentes nestes efluentes, como o fósforo e nitrogênio. Como consequência dessa problemática desenvolveram-se tecnologias avançadas de tratamento de águas residuais que possibilitassem uma eficiente remoção de matéria orgânica aliada a remoção de nutrientes (CAGATAYHAN, 2008). Dentre essas tecnologias de tratamento destacam-se os reatores em bateladas sequenciais (RBS). Os RBS são compostos basicamente de um único reator, o qual ao longo do seu ciclo operacional alterna entre ambientes anaeróbios, anóxicos e aeróbios. Essa alternância de ambientes em um único tanque ao longo do tempo propicia as condições necessárias para a remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo (CYBIS, SANTOS e GEHLING, 2004).

Os RBS quando comparados à sistemas convencionais de lodos ativados apresentam algumas vantagens, dentre as quais destaca-se a possibilidade do desenvolvimento dos processos de nitrificação, desnitrificação e remoção de fósforo em único reator. Freitas et al. (2009) destacam também a flexibilidade operacional sendo uma das principais vantagens desse sistema. Tal flexibilidade está associada ao seu formato cíclico, que pode ser facilmente alterado a qualquer momento a fim de compensar as alterações nas condições do processo, as características do efluente ou aos objetivos requeridos para o tratamento (POCHANA; KELLER, 1999).

Ainda que os RBS tenham ocasionado grande interesse face a sua flexibilidade operacional, sabe-se que a etapa de clarificação do efluente através de sedimentadores convencionais é uma dificuldade operacional da unidade de tratamento, podendo, em determinadas situações, gerar um efluente fora dos padrões de lançamento. Neste enfoque, destaca-se a integração da tecnologia de separação por membranas aos reatores em bateladas sequenciais, em substituição à sedimentação, dando origem aos biorreatores à membrana em batelada sequencial (BRMBS) (MCADAM et al, 2005; KAEWSUK et al, 2010; BASSIN, 2012).

Os biorreatores à membrana em batelada sequencial (BRMBS) possuem a vantagem de não necessitar da etapa de sedimentação em seu ciclo, visto que a remoção do efluente do sistema é efetuada através da permeação realizada pelas membranas durante a etapa aeróbia. Os BRMBS apresentam algumas vantagens além da eliminação dos problemas de sedimentação, dentre as quais se destacam: (i) a capacidade de manter elevadas concentrações de biomassa; (ii) capacidade de operação em uma ampla faixa de idade do lodo com reduzidos tempos de detenção hidráulico; (iii) alta remoção de matéria orgânica e; (iv) reduzida produção de lodo (BERNAL et al.,2012; ZHANG et al., 1997; METCALF e EDDY, 2003).

Apesar das vantagens intrínsecas aos BRMBS, alguns problemas são constatados quando se objetiva a remoção simultânea de nitrogênio e fósforo. Tais problemas podem estar associados à transferência de concentrações elevadas de nitrato da etapa aeróbia para a etapa anaeróbia. A presença de nitrato durante a etapa anaeróbia propiciará o consumo de matéria orgânica via bactérias desnitrificantes, reduzindo a disponibilidade do substrato orgânico para os organismos acumuladores de fósforo, inibindo, por consequência, a rota metabólica dos microrganismos responsáveis pela remoção de fósforo, conhecidos como organismos acumuladores de fósforo (PAO – phosphate accumulating organisms, do inglês) (YANG et al 2010).

Uma alternativa para esta problemática é a inserção de material suporte nos BRMBS para o desenvolvimento de biomassa aderida, dando origem aos biorreatores à membrana em batelada sequencial de leito móvel (BRMBS-LM). O desenvolvimento do biofilme sob o meio suporte propicia a criação de microzonas anaeróbias, anóxicas e aeróbias ao longo de sua estrutura (KELNNER, 2014). A presença dessas microzonas possibilita que a remoção de nitrato proceda mesmo durante a etapa aeróbia, visto que sob o meio suporte haverá a possibilidade do ambiente anóxico. A remoção de nitrato ao longo da etapa aeróbia reduziria a sua transferência para a etapa anaeróbia, propiciando melhores condições para o processo de remoção de fósforo (COSTA, 2015).

Onnis-Hayden et al. (2004) reportam que a utilização dos BRMBS-LM também é vantajosa para o processo de nitrificação. De acordo com esses autores, as bactérias nitrificantes passam a crescer também de maneira aderida no material suporte, minimizando assim a sua perda junto com o descarte de lodo. Tal característica exclui a dependência entre a idade do lodo e o crescimento desse grupo de microrganismos. Este aspecto é de grande importância para as bactérias nitrificantes, visto que estas apresentam baixa taxa de crescimento celular, devido a sua natureza autotrófica (ZHANG et al, 2010).

As vantagens mencionadas condicionam os BRMBS-LM como um sistema propenso para a aplicação no tratamento de esgoto doméstico, quando objetivado a remoção simultânea de matéria orgânica e nutrientes. Neste enfoque, o presente estudo teve por objetivo avaliar o desempenho de um biorreator à membrana de leito móvel operado em batelada sequencial para a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo de esgoto sanitário.

MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade experimental utilizada nessa pesquisa é composta por um reator de material acrílico com formato cilíndrico. Este reator possui diâmetro de 14,5 centímetros e altura de 1,50 metros, resultando em um volume total de 24 litros e um volume útil de 18,3 litros. Na base do reator foi instalado o módulo de membrana, do

tipo fibra oca (ZW-10, ZENON) e com operação submersa. Foram dispostas 1960 unidades do material suporte, resultando em uma fração de enchimento de 30%. O material suporte utilizado no interior do reator foi confeccionado em polietileno, com o formato cilíndrico, diâmetro médio de 15 milímetros e área superficial de $550 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$. A Figura 1 representa de forma esquemática os componentes integrantes da unidade experimental utilizada nessa pesquisa.

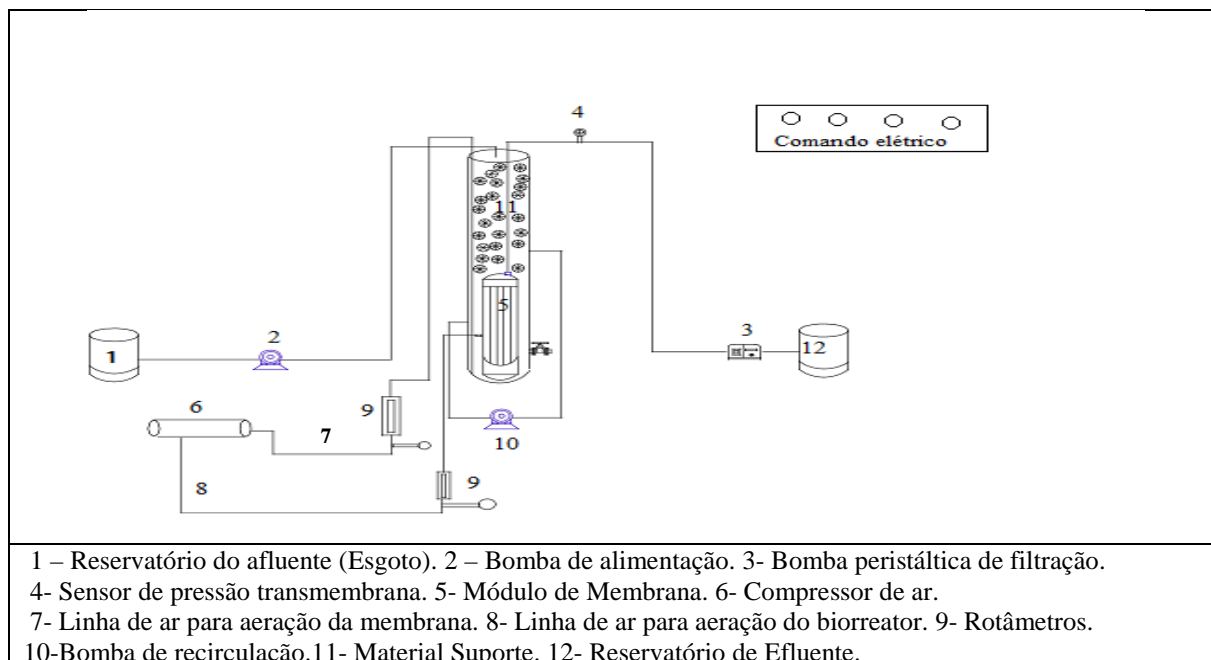


Figura 1 - Representação esquemática da unidade experimental.

O sistema foi operado sob regime batelada sequencial, com o tempo de ciclo de 3 horas, totalizando-se 8 ciclos por dia. Cada ciclo era composto por quatro fases distintas: (i) alimentação (1min); (ii) anóxica/anaeróbia (59 min); (iii) aeração (75 min) e; (iv) aeração/filtração (45 min). Tal condição de 8 ciclos por dia proporcionou uma vazão de esgoto tratado de $73,2 \text{ L} \cdot \text{dia}^{-1}$, resultando em um tempo de detenção hidráulico de 6 horas. O biorreator à membrana de leito móvel foi operado por 80 dias, sendo alimentado com esgoto doméstico captado junto à rede coletora de esgoto.

O desempenho BRMBS-LM foi avaliado quanto a remoção de demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+) e fósforo total (PT). Paralelamente, foi realizada também análise de ciclo do reator, amostrando o licor misto em tempos predeterminados durante os 180 min de seu ciclo operacional. Por fim, o monitoramento envolveu também a realização de ensaios de bancada com a biomassa do reator, a fim de se avaliar o potencial de remoção de fósforo via respiração aeróbia e via respiração anóxica. Tal ensaio foi baseado na metodologia proposta por Wachtmeister et al. (1997), a qual consiste em expor a biomassa a condições anaeróbias, anóxicas e aeróbias, a fim de determinar individualmente as taxas de acumulação de fosfato via organismos acumuladores de fosfato (PAO) e organismos acumuladores de fosfato desnitrificantes (DPAO). Este ensaio foi realizado sob duas condições, sendo: uma apenas com o licor misto do reator e; (ii) licor misto do reator com a presença do material suporte. Estas duas condições foram realizadas com intuito de verificar a interferência do material suporte na liberação e absorção de fósforo via PAO e DPAO.

RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 1 apresenta as concentrações médias de DQO, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e fósforo total no afluente e efluente do biorreator, bem como as respectivas eficiências médias de remoção alcançadas.

Tabela 1 - Concentração de demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e fósforo total no afluente e no efluente, bem como as suas respectivas eficiências médias.

Parâmetro	Afluente (mg L ⁻¹)	Efluente (mg L ⁻¹)	Eficiência (%)
DQO	589,1 ± 38,7	18,2 ± 13,6	96,9
Nitrogênio Total	65,6 ± 10,4	18,1 ± 3,3	72,3
Nitrogênio Amoniacal	49,2 ± 3,4	0,3 ± 0,2	99,3
Fósforo Total	6,6 ± 2,6	1,1 ± 0,4	82,1

A concentração média de DQO no esgoto foi de 589,1 ± 38,7 mg.L⁻¹, enquanto que no permeado esta concentração foi de 18,2 ± 13,6 mg.L⁻¹, resultando em uma eficiência média de remoção desse parâmetro de 96,9%. Para os parâmetros nitrogênio total (NT) e nitrogênio amoniacal, as eficiências obtidas foram de 72,3% e 99,3% respectivamente, com concentrações média no permeado de 18,1 ± 3,3 mg.L⁻¹ para NT e 0,3 ± 0,2 para N-NH₄⁺. Por fim, em relação ao fósforo, observou-se uma concentração média no permeado de 1,1 ± 0,4 mg.L⁻¹, atingindo, em decorrência, uma eficiência média de remoção desse parâmetro acima de 80%, e enquadrando-se no limite de 4 mg L⁻¹ de fósforo total estipulado pela Fundação do meio Ambiente de Santa Catarina (Fatma) para lançamento.

A Figura 2 apresenta as concentrações médias de P-PO₄³⁻ ao final de cada fase do ciclo operacional do reator.

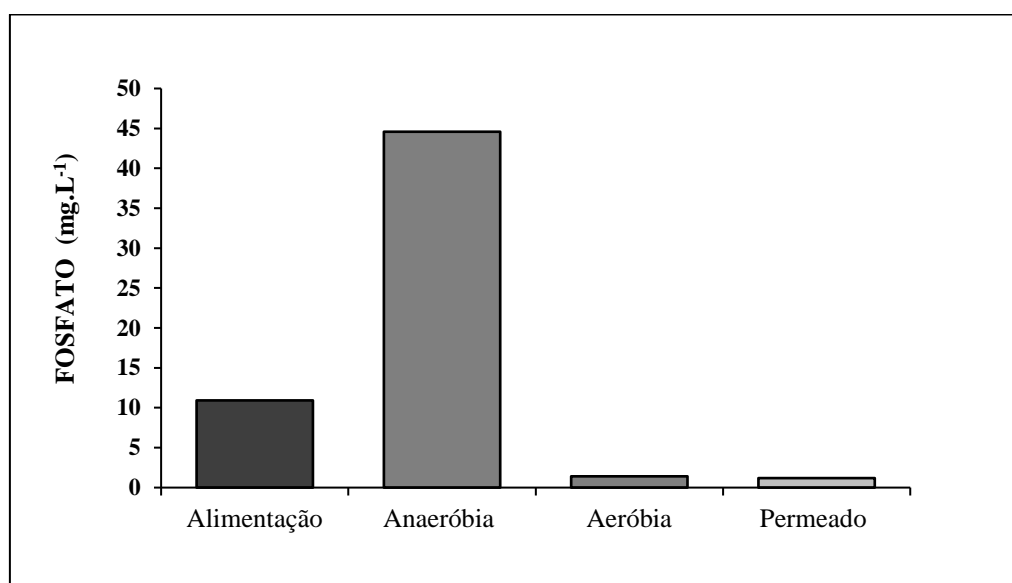


Figura 2 - Concentração média de fosfato ao final das etapas de alimentação, anaeróbia, aeróbia e no permeado.

Observa-se que ao final da fase anaeróbia a concentração de fosfato atinge o maior valor (44,5 mg.L⁻¹), enquanto que ao final da fase aeróbia observa-se a menor concentração desse parâmetro (1,41 mg.L⁻¹). Tal comportamento evidencia a existência do processo conhecido como “*enhanced biological phosphorus removal process*” (EBPR) (Mino et al., 1998). Os resultados da análise de ciclo do reator demonstram o mesmo comportamento, conforme pode-se visualizar na Figura 3.

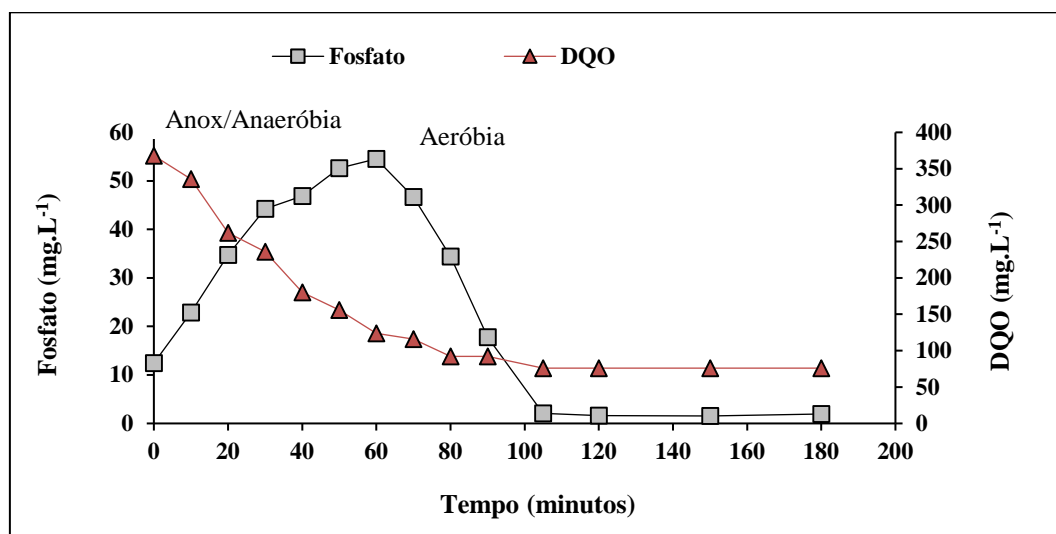


Figura 3 - Concentrações de fosfato e DQO ao longo do ciclo operacional do BRMBS-LM.

Observa-se que a concentração máxima de P-PO₄ é atingida ao final da fase anaeróbia, enquanto que a mínima foi verificada durante a fase aeróbia, com valores de 54,53 mg.L⁻¹ e 1,54 mg.L⁻¹, respectivamente. Em relação a DQO, constata-se um alto consumo na fase anóxica/anaeróbia, enquanto que na etapa aeróbia esse consumo de matéria orgânica é pouco expressivo.

Os resultados do ensaio de bancada relativos a determinação da atividade das PAOs e DPAOs são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Velocidade de liberação e absorção de fosfato via organismos acumuladores de fosfato (PAO) e organismos acumuladores de fosfato desnitrificantes (DPAO).

Ensaio	Parâmetro	Unidade	LICOR MISTO	LICOR MISTO + MS
PAO	P-Liberação	mgP.gSSV ⁻¹ .h ⁻¹	18,29	18,25
	P-Absorção	mgP.gSSV ⁻¹ .h ⁻¹	6,64	7,06
DPAO	P-Liberação	mgP.gSSV ⁻¹ .h ⁻¹	18,29	20,54
	P-Absorção	mgP.gSSV ⁻¹ .h ⁻¹	0,68	1,92
% DPAO		-	10,2	27,2

Observa-se maior capacidade de absorção de fosfato pelas PAO em relação às DPAO. Contudo, verifica-se que a presença do material suporte favoreceu a absorção de fosfato pela respiração anóxica, realizada pelas DPAOs, em detrimento a respiração aeróbia, realizada pelas PAOs. Os resultados demonstram que a remoção de fósforo via DPAO foi de 27,2% enquanto que a remoção via PAO foi de 10,2%.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As eficiências de remoção de DQO, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e fósforo obtidas no BRMBS-LM podem ser atribuídas a inúmeros fatores, dentre os quais destacam-se: (i) a presença da biomassa floculenta e aderida, os quais aceleram o processo de oxidação da matéria orgânica; (ii) a existência de microrganismos no reator responsáveis pela nitrificação e desnitrificação, tais como as bactérias autotróficas e heterotróficas, respectivamente e; (iii) ao processo de liberação e absorção de fosfato via organismos acumuladores de fosfato (PAO) e organismos acumuladores de fosfato desnitrificantes (DPAO) (METCALF e EDDY, 2003; BASSIN *et al.*, 2012).

Quanto à análise de ciclo apresentada na Figura 2, observou-se uma velocidade de absorção de fosfato de $10,14 \text{ mgP.gSSV}^{-1}.\text{h}^{-1}$. Tal valor está próximo ao de Yang *et al.* (2010), que observaram uma velocidade de absorção de fosfato de $14,9 \text{ mgP.gSSV}^{-1}.\text{h}^{-1}$ em um biorreator a membrana de leito móvel tratando esgoto sintético. Estes autores atribuem este valor às condições adotadas para o desenvolvimento dos organismos acumuladores de fósforo.

O bom desempenho do processo EBPR, conforme observado na Figura 3, é dependente de algumas variáveis, dentre as quais destacam-se (i) temperatura e; (ii) concentração de matéria orgânica. Em relação a temperatura, esta se manteve em 20°C durante todo o período experimental. Tal valor é reportado por Whang e Parque (2006) como recomendável, visto que temperaturas superiores a 20°C propiciam o crescimento dos organismos acumuladores de glicogênio (GAO), que diferentemente dos organismos acumuladores de fosfato (PAO) não contribuem para a remoção de fosfato, visto que em seu metabolismo não há a liberação/consumo desse nutriente. Já em termos de concentração de matéria orgânica, Bassin *et al.* (2012) reportam que a relação de P-liberação/DQO-consumida deve estar próxima a $0,5 \text{ mgP-PO}_4^{-3}.\text{mgDQO}^{-1}$, a fim de favorecer o desenvolvimento das PAOs em detrimento as GAOs. Neste estudo a relação P-liberação/DQO-consumida manteve-se próximo a $0,30 \text{ mgP-PO}_4^{-3}.\text{mgDQO}^{-1}$, variação esta que favorece o consumo de matéria orgânica pelas PAOs, portanto, não comprometendo o desempenho da remoção biológica de fósforo. Além disso, verifica-se que o consumo de DQO ocorreu em grande parte durante a fase anaeróbia. Tal condição demonstra que o consumo de matéria orgânica pelas heterotróficas aeróbias comuns foi pouco significativa no reator, condição de extrema importância para o bom desenvolvimento do processo EBPR.

Ainda em relação ao fósforo, observou-se que a absorção de fosfato via DPAO na presença do material suporte resultou em um valor de 2,5 vezes maior do que unicamente o licor misto. Esta maior absorção de fosfato sob condições anóxicas, é reportada por Kuba, Loosdrecht e Heijnen (1996) sendo vantajosa, visto que o processo simultâneo de desnitrificação e remoção de fósforo necessitam menor concentração de matéria orgânica em detrimento a processos biológicos de remoção de fósforo e nitrogênio sucedidos separadamente. Além desta vantagem, este processo propicia uma redução da aeração, visto que nesta situação o nitrato é o aceptor de elétrons, e não mais o oxigênio.

CONCLUSÃO

Com base nos dados observados durante a operação e monitoramento do biorreator a membrana em batelada sequencial de leito móvel (BRMBS-LM), conclui-se que:

- O BRMBS-LM apresentou uma excelente capacidade na remoção de matéria orgânica, com eficiência média de remoção de DQO de 96,9 %.
- Em relação ao nitrogênio total, observou-se uma remoção média de 72,3 %. Tal eficiência pode ser atribuída à realização dos processos de nitrificação e desnitrificação no licor misto e sob o material suporte, além da assimilação por bactérias via síntese celular.
- Para o fósforo, observou-se uma remoção média de 82,1%, com concentração média no permeado de $1,1 \pm 0,4 \text{ mg.L}^{-1}$. Tal eficiência vale ser destacada, tendo em vista que a remoção de fósforo via processo biológico é muitas vezes insatisfatória.
- Ainda em relação ao fósforo, observou-se através dos ensaios de bancada que a presença do material suporte resultou um maior valor de absorção de fosfato via respiração anóxica.

Em geral, o biorreator a membrana em batelada sequencial de leito móvel apresentou excelentes resultados na remoção de matéria orgânica e nutrientes, produzindo um efluente capaz de atender aos padrões estabelecidos para lançamento. As elevadas eficiências observadas neste estudo condicionam os biorreatores à membrana de leito móvel como um sistema propenso quando objetivado a remoção simultânea de matéria orgânica e nutrientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BASSIN, J.; KLEEREBEZEM, R; DEZOTTI, M; VAN LOOSDRECHT, M.C.M. Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures. *Water research* 46 (2012) 3805-3816.
2. BERNAL, R; VON GATTBERG, A; MACK, B. Using Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment in Small Communities. *Water & Process Technologies* (2012), p. 1-7.
3. CAGATAYHAN, B. E. Comparison of recirculation configurations for biological nutrient removal in a membrane bioreactor. *Water Research, New York*, v.42, p.1651 – 1663, 2008.
4. COSTA, R.E. Remoção de nitrogênio e fósforo de esgoto sanitário em biorreator a membrana de leito móvel operado na modalidade de batelada sequencial. *Qualificação (Doutorado em Engenharia Ambiental)*. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2015.
5. CYBIS, L. F. A; SANTOS, A. V; GEHLING, G. R. Eficiência do reator sequencial em batelada (RSB) na remoção de nitrogênio no tratamento de esgoto doméstico com DQO baixa. *Eng. Sanit. Ambient.* vol. 9, n.3, p. 260-264, 2004.
6. KAEWSUK, J; THORASAMPAN, W; THANUTTAMAVONG, M; SEO, G.T. Kinetic development and evaluation of membrane sequencing batch reactor (MSBR) with mixed cultures photosynthetic bacteria for dairy wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 5, p. 1161-1168, 2010.
7. KELNNER, R.L. Biorreator à membrana de leito móvel em bateladas sequenciais para a remoção de nutrientes e matéria orgânica de efluentes sanitários. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2014.
8. KUBA, T, LOOSDRECHT, V; HEIJNEN, J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system. *Water Res.* 30 (1996),1702–1710.
9. MCADAM, J; MOSQUERA-LOSADA, M.R; PAPANASTASIS, V; PARDINI, A; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. Silvopastoral systems: analyses of an alternative to open swards. In: O'Mara FP, Wilkins RJ, Mannetje, L; LOVETT, D.K; ROGERS, P.A.M; Boland TM (eds) *XX international grassland congress: offered pappers*, Academic, Wageningen, The Netherlands, 2005. p.758-759.
10. METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering - Treatment and reuse*. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
11. MINO, T., VAN LOOSDRECHT, M.C.M., HEIJNEN, J.J., 1998. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Water Research* 32 (11), 3193–3207.
12. WACHTMEISTER, A; KUBA, T; VAN LOOSDRECHT, V; HEIJNEN, J.J. A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge. *Water Res.* 31(1997), p.471–478.
13. WHANG, L. M.; PARK, J.K. Competition between polyphosphate- and glycogen- accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems: effect of temperature and sludge age. *Water Environ Res*, v. 74, p. 4-11, 2006.
14. YANG, S; YANG, F; FU, Z; WANG, T; LEI, R. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by a novel sequencing batch moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment. *China: Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering*, 2010.
15. ZHANG, B.; YAMAMOTO, K.; OHGAKI, S.; KAMIKO, N. Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated mixed liquor processes for small-scale treatment/remediation. *Water Science Technology, Oxford*, v.35, n.6, p.37 – 44, 1997.
16. ZHANG, B; SUN, M; JI, H; LIU, X. Quantification and comparison of ammonia-oxidizing bacterial communities in MBRs treating various types of wastewater. *Bioresour. Technol.* 101 (2010) 3054–3059.