

II-203 - USO DE BIORREATOR COM MEMBRANAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIOS

Laura Hamdan de Andrade⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestranda em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos pela UFMG.

Gabriel Esteves Motta

Graduando em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Míriam Cristina Santos Amaral

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestre e Doutora em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos pela UFMG. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia, Bloco 2, sala 4544 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-1714 - e-mail: auraha@ymail.com

RESUMO

Apesar de ser uma atividade importante social e economicamente, a indústria de produção de laticínios possui elevado potencial poluidor, em especial ao que se refere aos efluentes líquidos gerados. Esses efluentes possuem elevada carga orgânica e de nutrientes, e, quando descartados de maneira incorreta, podem causar grandes problemas ambientais. Os sistemas convencionais de tratamento para esses efluentes englobam o uso de tratamento primário para remoção de sólidos, óleos e gorduras, tratamento secundário biológico para remoção de matéria orgânica e nutrientes e, em alguns casos, tratamento terciário como polimento. Entretanto diversos problemas têm sido relatados na operação de tais sistemas, fazendo com que o biorreator com membrana (BRM) apresente-se como um processo promissor para essa aplicação. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade técnica do uso de BRM para tratamento de efluentes de indústria de laticínios. Primeiramente, foi avaliada a importância do sistema de flotação como pré-tratamento, que se mostrou eficaz para aumentar a biodegradabilidade do efluente. Na etapa de operação do BRM foram avaliados dois tempos de detenção hidráulica (5,6 e 7,6 horas), tendo sido obtidas eficiências médias de remoção de COT e DQO de 99% para ambos. Apesar de o permeado do BRM apresentar excelente qualidade, um sistema de pós-tratamento teria de ser implementado para que seu reúso nos processos industriais pudesse ser viabilizado. Observou-se que a incrustação das membranas aumenta com o fluxo de permeado.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreator com membranas, Efluente de laticínios, Tempo detenção hidráulica.

INTRODUÇÃO

Apesar de ser uma atividade importante social e economicamente, a indústria de produção de laticínios possui elevado potencial poluidor, em especial ao que se refere aos efluentes líquidos gerados. Esses efluentes são produzidos em operações de lavagem e limpeza, descarga e descartes e vazamentos e derramamentos (MACHADO *et al.*, 2002). As operações de lavagem e limpeza consistem no enxágue de latões de leite, tanques diversos e tubulações, com fins de remoção de resíduos de leite e outras impurezas, e na lavagem de pisos, e podem gerar de 50 a 95% do volume total de efluentes (DAUFIN, 2001).

Os efluentes dessas indústrias possuem elevada carga orgânica e de nutrientes, e, quando descartados de maneira incorreta, podem causar grandes problemas ambientais. Os sistemas convencionais de tratamento para esses efluentes englobam o uso de tratamento primário para remoção de sólidos, óleos e gorduras, tratamento secundário biológico para remoção de matéria orgânica e nutrientes e, em alguns casos, tratamento terciário como polimento. Entretanto, diversos problemas têm sido relatados, tais como elevada produção de espuma, baixa sedimentabilidade do lodo, baixa resistência a choques de carga, dificuldades na remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e problemas na degradação de gorduras, óleos e outros tipos específicos de poluentes, como corantes (MACHADO *et al.*, 2002).

Diante desses problemas, da limitação dos recursos hídricos e da introdução de padrões de lançamentos cada vez mais restritivos, que propulsionam o desenvolvimento de alternativas para o tratamento de efluentes mais

eficientes propiciando o reúso, o biorreator com membrana (BRM) apresenta-se como um processo promissor. Os BRMs apresentam como principal diferencial a retenção completa da biomassa pela membrana, fazendo com que a qualidade do efluente tratado não dependa das características de sedimentabilidade do lodo. Além disso, os BRMs conseguem operar com maiores concentrações de sólidos suspensos e maiores idades do lodo que os sistemas convencionais como lodos ativados. As vantagens dessas condições são a menor produção de lodo, o que ocasiona uma redução dos custos com instalação, tratamento e disposição final do lodo, e a redução do volume do reator. Devido à retenção pela membrana, compostos de alta massa molar e/ou compostos recalcitrantes podem permanecer no BRM por um tempo maior que o tempo de detenção hidráulica médio, proporcionando o crescimento de microorganismos mais aclimatados a esses compostos e que possuem maior capacidade de degradá-los. Assim, os BRMs também apresentam maior eficiência de remoção de micropoluentes, poluentes orgânicos persistentes e poluentes lentamente biodegradáveis (BERNHARD *et al.*, 2006).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade técnica do uso de biorreator com membranas para tratamento de efluentes de indústria de laticínios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Efluente de indústria de laticínios

Para realização dos experimentos, foi utilizado efluente de uma indústria de laticínios do estado de Minas Gerais, Brasil, cujos produtos fabricados são leite UHT, iogurte, queijo minas, requeijão e *petit suisse*. O sistema de tratamento do efluente da empresa, que recebe todo o efluente gerado nos processos industriais e o esgoto sanitário das instalações prediais, consiste em uma etapa preliminar de filtração, seguida por flotação com ar comprimido e tratamento biológico com lodos ativados.

Para avaliação de qual efluente (proveniente de qual etapa de tratamento) seria alimentado no biorreator com membranas testes preliminares de degradação e filtração foram realizados com os efluentes bruto (após filtração) e pós-flotação. Para realização desses testes, os efluentes foram inoculados com lodo proveniente da estação de lodos ativados da própria indústria e, após um período de 12 horas, foram determinados a eficiência de remoção de DQO e o fluxo crítico. Para determinação do fluxo crítico, foi empregada a membrana de microfiltração do biorreator com membranas e o método de *flux-step*, que consiste em fixar a pressão e monitorar o fluxo de permeado por 15 minutos. Após esse intervalo a pressão é incrementada sucessivamente com respectivo acompanhamento do fluxo de permeado até que se observe um decaimento do fluxo durante o período de monitoramento.

Aparato experimental

O biorreator com membranas e o módulo de membranas utilizados para realização dos testes foram construídos pela empresa PAM Membranas Seletivas. O BRM possuía módulo de membranas de microfiltração (poli(eterimida), abertura média dos poros de 0,5 μm , área de membrana de 0,02 m²) tipo fibra oca submerso. O permeado era coletado na extremidade superior do módulo e na extremidade oposta haviam furos para introdução de ar e promoção de aeração entre as fibras. O BRM era constituído de quatro tanques de acrílico (um tanque de armazenamento de alimentação, um tanque biológico e dois tanques para armazenamento de permeado, sendo que em um deles era realizado vácuo para promoção da filtração), uma bomba a vácuo usada na microfiltração, uma bomba diafragma usada na retrolavagem, válvulas solenóides, sensores de nível, válvulas de controle, indicadores de vazão de permeado, retrolavagem e de ar, indicador de pressão para o permeado e a retrolavagem e um skid com o painel elétrico (Figura 1).

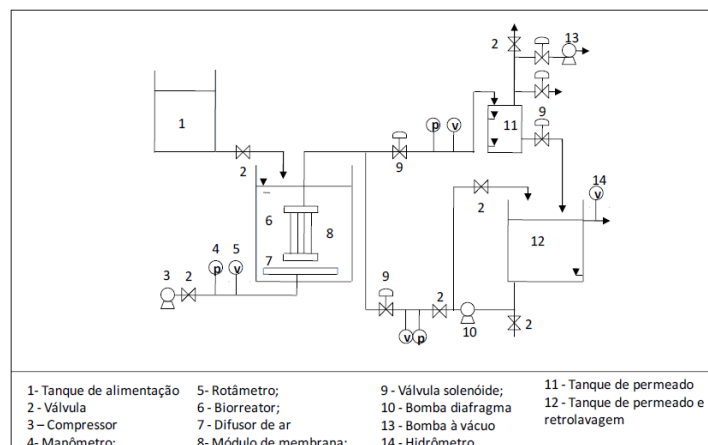


Figura 1 – Esquema do BRM utilizado.

Condições operacionais

O BRM foi inicialmente inoculado com lodo proveniente do reator de lodos ativados da própria empresa fornecedora do efluente. Após uma etapa inicial de aclimação dos microorganismos às condições do BRM e do efluente, que teve duração de 28 dias, a idade do lodo foi fixada em 60 dias e foram avaliados os TDHs de 5,6 e 7,6 horas a fim de se determinar a condição ótima de operação. Para manutenção dos TDHs de 5,6 e 7,6 horas foram empregados vazões e fluxos de permeado de 0,55 L/h e 27,5 L/h.m² e 0,75 L/h e 37,5 L/h.m², respectivamente. A membrana utilizada possuía permeabilidade hidráulica com água média de 366 L/h.m².bar. As vazões de ar para a membrana, ar para o tanque biológico e retrolavagem foram de 3,5 Nm³/h, 0,5 Nm³/h e 2 L/h, respectivamente. A retrolavagem era acionada automaticamente por 15 segundos a cada 15 minutos de permeação.

Monitoramento do processo

Durante a operação do BRM, diariamente a pressão era registrada e alíquotas da alimentação e do permeado do BRM eram coletadas e caracterizadas em relação à concentração de DQO, COT (Analisador de TOC Shimadzu TOC-V CNP), cor (Espectrofotômetro Hach DR 2800) e turbidez (Turbidímetro Hach 2100AN). Alíquotas do lodo eram também coletadas para análise de sólidos suspensos voláteis três vezes por semana. Semanalmente, um volume maior do permeado era coletado para análise de DBO, nitrogênio amoniacal, série sólidos, cátions (Ca²⁺, Mg²⁺) e íons (Cl⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) (Cromatógrafo iônico Dionex ICS-1000). Todas essas análises foram realizadas em conformidade com as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os resultados de concentrações do permeado e eficiências de remoção do BRM de COT, DQO e cor para os dois TDHs avaliados foram comparados através do teste de Mann-Whitney para amostras não paramétricas realizado com auxílio software Statística 6.1 a um nível de significância de 0,05.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efluente de indústria de laticínios

O fluxo crítico e a eficiência de remoção de COT para os efluentes bruto e pós-flotação após 12 horas de inoculação com lodo do reator de lodos ativados da empresa fornecedora do efluente se encontram na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados dos testes de degradação e filtração para os efluentes bruto e pós-flotação após período de 12 horas de inoculação com lodo

Parâmetros	Efluente bruto	Efluente pós-flotação
Concentração de SSV (mg/L)	4.720	3.780
Eficiência de remoção de COT (%)	50	97
Fluxo crítico (L/h.m ²)	31,8	31,3

A remoção de COT do efluente pós-flotação foi bastante superior à do efluente bruto. Isso provavelmente se deve ao fato de as gorduras, presentes no efluente bruto e removidas pelo sistema de flotação, interferirem no processo, pois, além de possuírem cinética de degradação lenta, podem inibir a degradação biológica e reduzir a transferência de oxigênio para os flocos biológicos (CHIPASA e MECHZYKA, 2006). Dessa forma, a remoção desses compostos na etapa de flotação contribui para um aumento da biodegradabilidade do efluente.

O fluxo crítico foi semelhante para ambos os efluentes, pois, apesar de as gorduras serem compostos incrustantes, outros fatores como geração de produtos microbianos solúveis (SMP) e substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e hidrofobicidade do lodo podem ter tido um efeito mais significativo.

Os resultados de caracterização e o teste de degradação comprovam a importância da remoção de gorduras durante o pré-tratamento com flotação para a eficiência do processo biológico. Dessa forma, optou-se por alimentar o BRM com o efluente pós-flotação.

Operação do biorreator com membranas

A Figura 2 apresenta a concentração de biomassa no líquido reacional do BRM durante a operação com TDH de 7,6 e 5,6 horas e idade do lodo de 60 dias.

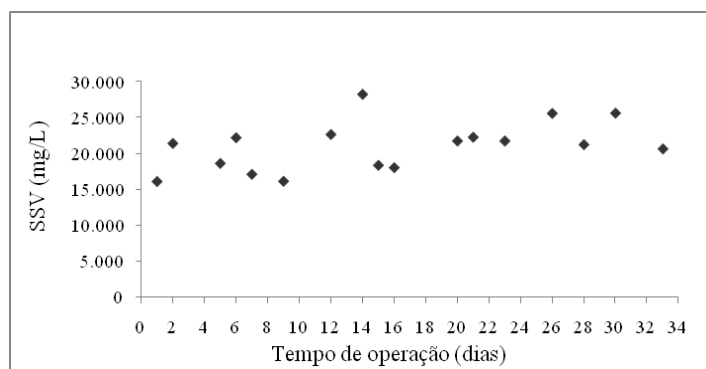


Figura 2: Concentração de SSV no lodo do BRM nas operações com TDH de 7,6 e 5,6 horas.

As concentrações médias de biomassa durante as operações com TDH de 7,6 e 5,6 horas foram, respectivamente, 18.574 mgSSV/L e 22.371 mgSSV/L. Esses valores, que podem ser considerados elevados dado que a concentração média de SSV em BRM com módulo de membranas submerso oscila entre 10.000 e 15.000 mg/L (CORNEL e KRAUSE, 2008), se justificam pelo fato de o efluente apresentar alta concentração de matéria orgânica sendo esta bastante biodegradável (JANCZUKOWICZ *et al.*, 2008). Dessa forma, havia substrato disponível para os microorganismos suficiente tanto para o catabolismo quanto para a síntese de novas células.

A Figura 3 apresenta os valores de DQO, COT e cor da alimentação e do permeado do BRM.

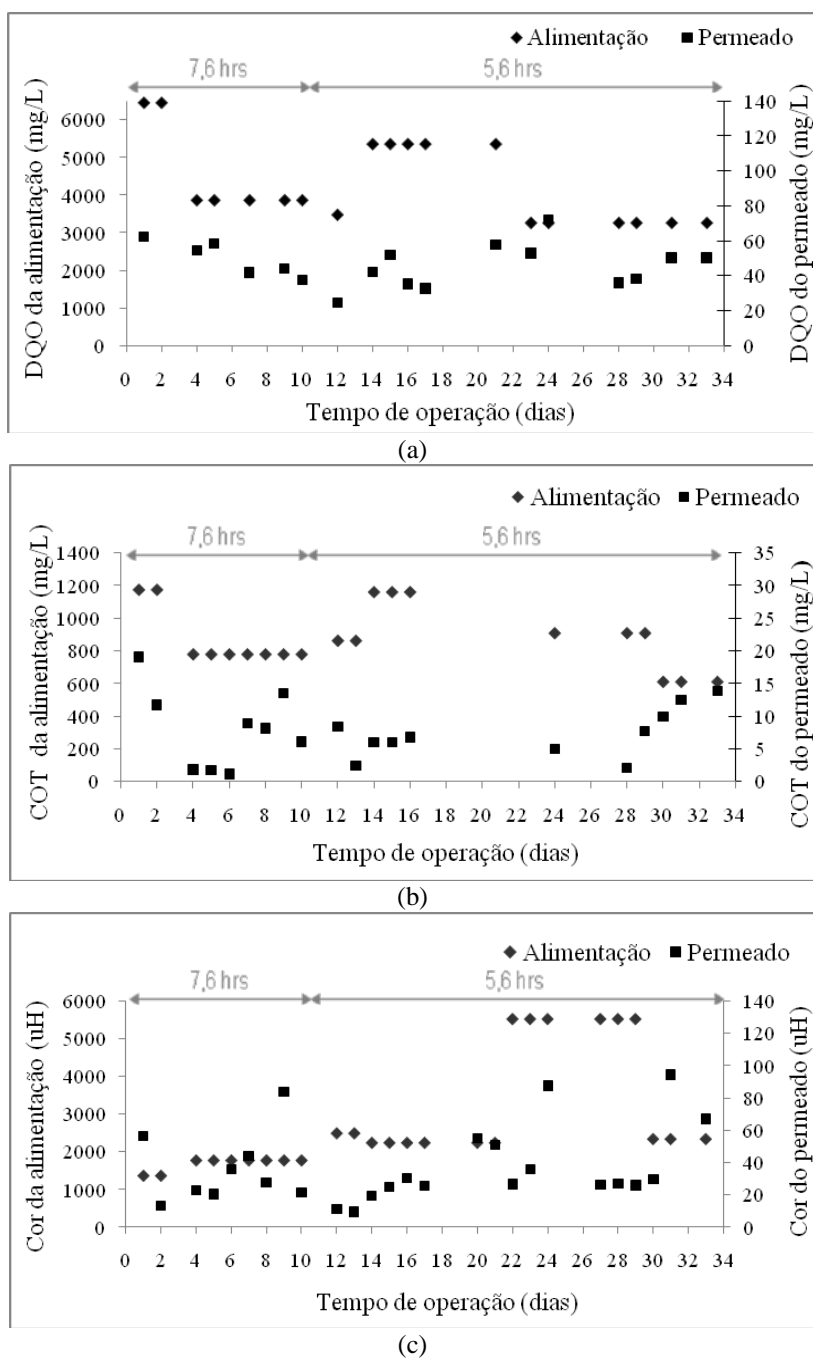


Figura 3: Concentrações de (a) DQO, (b) COT e (c) cor da alimentação e do permeado do BRM nas operações com TDH de 7,6 e 5,6 horas.

O BRM apresentou elevada capacidade de remoção de matéria orgânica e cor, o que pode ser justificado pela elevada biodegradabilidade do efluente e pela alta concentração de biomassa. A estabilidade proporcionada pelos BRMs também pode ser vislumbrada ao se observar que, apesar das grandes oscilações na concentração de matéria orgânica e na cor da alimentação, não ocorreram em nenhum momento acentuadas alterações na qualidade do permeado.

As eficiências de remoção médias para cada condição são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2: Eficiências de remoção médias de DQO, COT e cor do BRM nas operações com TDH de 7,6 e 5,6 horas.

Parâmetro	Eficiência de remoção	
	TDH = 7,6 hrs	TDH = 5,6 hrs
DQO	98,8 ± 0,2 %	98,8 ± 0,5 %
COT	99,1 ± 0,6 %	99,0 ± 0,7 %
Cor	97,8 ± 1,4 %	98,7 ± 1,0 %

Apesar das pequenas variações entre as remoções obtidas em cada condição de operação, de acordo com os resultados do teste estatístico de Mann-Whitney, as concentrações de DQO e COT e a cor do permeado e as eficiências de remoção de DQO e COT obtidas nas operações com os dois TDHs testados não podem ser consideradas diferentes a um nível de significância de 0,05. Foi possível rejeitar a hipótese de que as amostras analisadas não apresentavam diferença significativa apenas para o parâmetro eficiência de remoção de cor, e neste caso a operação com TDH de 5,6 horas se mostrou mais eficiente que a operação com TDH de 7,6 horas.

Com base nos resultados obtidos, defini-se 5,6 horas como o TDH ótimo para o sistema. Uma vez que as eficiências de remoção de poluentes pelo BRM em ambas as condições avaliadas se mostraram semelhantes, a operação com TDH de 5,6 pode ser selecionada como a mais adequada já que menores tempos de detenção hidráulica permitem o uso de reatores de menor volume, o que ocasiona em um menor requisito de área.

Na Figura 4 são apresentados o fluxo e a pressão aplicados no BRM. As linhas pontilhadas marcam os dias em que foi realizada limpeza química da membrana com solução de 0,5 g/L de percarbonato de sódio por 20 minutos com ultrasonificação.

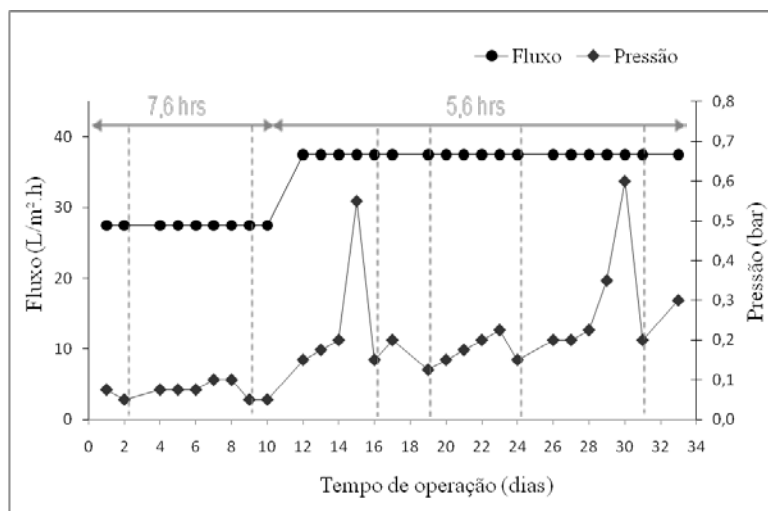


Figura 4: Fluxo e pressão de operação do BRM

O BRM operou com fluxo constante e pressão variável. Durante as operações com os TDHs de 7,6 e 5,6 horas, os fluxos de operação foram de 27,5 e 37,5 L/h.m², respectivamente. Valores máximos de fluxos em BRM com módulos de membranas submerso para tratamento de esgoto domésticos se situam entre 25 e 30 L/h.m², entretanto para efluentes industriais esses valores são substancialmente menores, estando frequentemente entre 5 e 15 L/h.m² (CORNEL e KRAUSE, 2008). Apesar de 27,5 L/h.m² poder ser considerado, portanto, um valor bastante alto para fluxo em BRM submerso, nessa etapa o sistema operou de maneira estável, sem que aumentos acentuados na pressão de operação fossem necessário. Isso se deve à aplicação de aeração entre as fibras do módulo, comprovando que esse é um procedimento efetivo para o controle da incrustação e obtenção de uma operação mais sustentável. Por outro lado, quando o fluxo foi elevado para 37,5 L/h.m², a pressão de operação e a taxa de aumento da pressão tiveram aumentos relevantes. Isso corrobora constatações anteriores de que quanto maior o fluxo de operação, maior a incrustação das membranas (SIEMBIDA *et al.*, 2010).

Observa-se que as limpezas realizadas foram eficientes, uma vez que após a limpeza a pressão necessária para mantimento do fluxo retornava para o mesmo patamar (0,05 bar para a operação com fluxo de 27,5 L/h.m² e 0,15 bar para a operação com fluxo de 37,5 L/h.m²).

A Figura 5 traz os valores de permeabilidade da membrana durante a operação do BRM. As linhas pontilhadas mais uma vez indicam a realização de limpeza química da membrana.

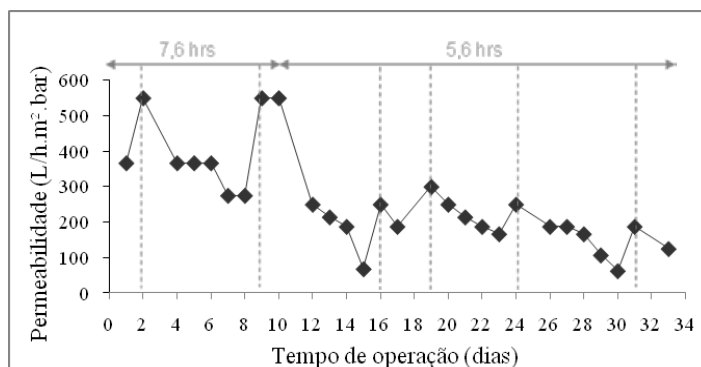


Figura 5: Permeabilidade da membrana durante operação do BRM

Observa-se que o aumento do fluxo de operação ocasionou em redução da permeabilidade, devido a uma maior incrustação das membranas. Com o aumento do fluxo de permeado de 27,5 para 37,5 L/h.m² (redução do TDH de 7,6 para 5,6 horas), houve uma diminuição da permeabilidade média de 407 ± 113 para 187 ± 63 L/h.m².bar, correspondendo a uma queda de 54%.

Reúso do permeado

Para avaliar a possibilidade de reúso industrial do permeado do BRM, as concentrações médias de poluentes do mesmo foram comparadas com valores de qualidade de água de resfriamento encontrados na literatura (HESPAÑOL e GONÇALVES). A comparação entre os valores se encontra na Tabela 3.

Tabela 3: Padrões de qualidade de água para resfriamento e valores médios correspondentes do permeado.

Parâmetros	Água de resfriamento	Permeado
DQO (mg/L)	75	53,6
DBO (mg/L)	25	10
SDT (mg/L)	500	2370
SST (mg/L)	100	n.d.
Turbidez (NTU)	50	<1
Cloreto (mg/L)	500	180
Sulfato (mg/L)	200	190
Fosfatos (mg/L)	4	148
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1	3
Cálcio (mg/L)	50	43
Magnésio (mg/L)	0,5	n.d.

Nota-se que alguns parâmetros, tais como DQO, DBO, SST e Turbidez estão abaixo do padrão de qualidade requerido para uso como água de resfriamento, entretanto, para que o reúso possa de fato ser viabilizado, há a necessidade de remoção de SDT, fosfatos e nitrogênio amoniacal. Para isso, como se tratam de íons e pequenas moléculas, poderiam ser utilizados sistemas de pós-tratamento tais como nanofiltração, osmose inversa, troca iônica ou eletrodialise.

CONCLUSÕES

O BRM se mostrou uma tecnologia viável para o tratamento de efluente de indústria de laticínios, obtendo eficiências médias de remoção de COT e DQO de 99%. Observou-se que não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos com tempos de detenção hidráulica de 5,6 e 7,6 horas. Dessa forma, o primeiro pode ser selecionado como o TDH ótimo, uma vez que requer menor área e volume de reator. Foi possível operar o sistema de maneira estável mesmo com fluxos de permeado tão altos quanto 27,5 L/h.m², o que se deve à eficácia da aeração entre as fibras como método de controle de incrustação. Entretanto, quando o fluxo foi aumentado para 37,5 L/h.m², houve maior incrustação das membranas e redução de 54% na permeabilidade. Em relação à possibilidade de reúso do permeado, apesar de alguns parâmetros encontrarem-se dentro dos padrões, outros ainda terão que sofrer enquadramento. Para isso, sugere-se o uso de pós-tratamento com membranas de nanofiltração, osmose inversa, troca iônica ou equivalente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa concedida e à PAM Membranas Seletivas pelo fornecimento do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21. ed.. Washington: APHA, 2005.
2. BERNHARD, M.; MÜLLER, J.; KNEPPER, T. P. Biodegradation of persistent polar pollutants in wastewater: Comparison of an optimised lab-scale membrane bioreactor and activated sludge treatment. *Water research*, v. 40, p. 3419-3428, 2006.
3. CHIPASA, K. B.; MECHZYKA, K. Behavior of lipids in biological wastewater treatment processes. *Industrial Microbiology Biotechnology*, v. 33, p. 635-645, 2006.
4. CORNEL, P.; KRAUSE, S. Membrane bioreactors for wastewater treatment. In: LI, N. N.; FANE, A. .G; HO, W. S. W.; MATSUURA, T. (coord.) Advanced membrane technology and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008, cap. 9, p. 217-239.
5. DAUFIN, G.; ESCUDIER, J. P.; CARRERE, H.; BEROT, S.; FILLAUDEAU, L.; DECLoux, M. Recent and emerging applications of membrane processes in the food and dairy industry. *Food and Bioproducts Processing*, v. 79, n. 2, p. 89-102, 2001.
6. HESPANHOL, I.; GONÇALVES, O. M. (coord.) *Conservação e reúso de água: Manual de orientações para o setor industrial*. Vol.1. São Paulo: FIESP/CIESP, 92 p.
7. JANCZUKOWICZ, W.; ZIELIŃSKI, M.; DĘBOWSKI, M. Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 4199-4205, 2008.
8. MACHADO, R. M. G.; FREIRE, V. H.; SILVA, P. C.; FIGUERÊDO, D. V.; FERREIRA, P. E. *Controle ambiental nas pequenas e médias indústrias de laticínios*. 1 ed. Belo Horizonte: Segrac, 2002, 223 p.
9. SIEMBIDA, B.; CORNEL, P.; KRAUSE, S.; ZIMMERMANN, B. Effect of mechanical cleaning with granular material on the permeability of submerged membranes in the MBR process. *Water Research*, v. 44, p. 4037 – 4046, 2010.