

Influência da idade do lodo na colmatação das membranas em um biorreator à membrana tratando esgoto sanitário

Effect of solids retention time on membrane fouling in a membrane bioreactor treating municipal wastewater

Tiago José Belli^{1*} , André Aguiar Battistelli¹ , João Paulo Bassin² ,
Miriam Cristina Santos Amaral³ , Flávio Rubens Lapoli¹ 

RESUMO

O presente estudo avaliou o efeito da idade do lodo (θ_c) no potencial incrustante do licor misto em um biorreator à membrana (BRM) tratando esgoto sanitário. Tal avaliação foi conduzida em BRM construído em escala de bancada, com volume útil de 15 L, operado por 420 dias na modalidade de batelada sequencial. Durante o período experimental, foram aplicadas 3 estratégias operacionais, E-1, E-2 e E-3, em que foram testadas as idades de lodo de 80, 40 e 20 dias, respectivamente. Os resultados revelaram que a utilização da idade de lodo de 20 dias resultou em licor misto com maior potencial incrustante, apresentando, neste caso, uma velocidade de colmatação (VC) das membranas de 1,95 mbar dia⁻¹, aproximadamente 2 vezes maior do que a observada nas idades de lodo de 80 e 40 dias. A maior colmatação observada foi atribuída a maior concentração de produtos microbianos solúveis (PMSs) no licor misto e a maior relação proteínas/polissacarídeos (PN/PS) dos flocos biológicos nesse período em questão. Por outro lado, a aplicação da idade de lodo de 80 dias resultou em menor VC das membranas do BRM, com valor de 0,82 mbar dia⁻¹. Contudo, no período final dessa estratégia foi observado crescimento excessivo de bactérias filamentosas, que se refletiu em piora da filtrabilidade do licor misto e aumento da VC das membranas. De maneira geral, os resultados obtidos mostraram que a aplicação da idade de lodo de 40 dias resultou em licor misto com menor potencial incrustante.

Palavras-chave: idade do lodo; incrustação; biorreator à membrana; batelada sequencial; esgoto sanitário.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of solids retention time (SRT) on membrane fouling rate in a membrane bioreactor (MBR) treating municipal wastewater. The evaluation was conducted in a membrane bioreactor built in bench scale, with a volume of 15 L, operated for 420 days in the sequential batch regime. During this period, three experimental runs were applied, E-1, E-2 and E-3, in which the solids retention time of 80, 40 and 20 days, respectively, were tested. The results showed that use of 20-days solids retention time resulted in a higher membrane fouling rate (MFR), with value of 1,95 mbar d⁻¹, approximately two times higher than observed in the solids retention time of 80 and 40 days. The higher membrane fouling rate observed was attributed to a higher concentration of soluble microbial products (SMP) in the mixed liquor and to the higher proteins/polysaccharides ratio of the biological flocs in this period. On the other hand, the use of 80-days solids retention time resulted in a lower membrane fouling rate, with a value of 0.82 mbar d⁻¹. However, it was observed in the final period of this experimental run an excessive growth of filamentous bacteria, which was reflected in a deterioration of the mixed liquor filterability and an increase of membrane fouling rate. Overall, the results showed that the 40-days solids retention time resulted in a mixed liquor with lower fouling propensity.

Keywords: solids retention time; membrane bioreactor; fouling rate; municipal wastewater; sequencing batch.

INTRODUÇÃO

O uso de biorreatores à membrana (BRMs) no tratamento de esgoto vem aos poucos consolidando-se mundialmente, sobretudo pela elevada qualidade do efluente obtido nesses reatores (LIN *et al.*, 2014).

Harper, Bernhardt e Newfield (2006) reportam que os BRMs operam de forma semelhante ao processo de lodos ativados. Nesse processo, o decantador secundário é substituído pelo módulo de membranas, normalmente de microfiltração ou ultrafiltração. Tal alteração permite que

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - Florianópolis (SC), Brasil.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

³Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

*Autor correspondente: tiagojbelli@gmail.com

Recebido: 27/09/2016 - Aceito: 06/11/2017 - Reg. ABES: 169848

se obtenha elevada concentração de biomassa no reator biológico, o que intensifica o processo de degradação da matéria orgânica e aumenta a eficiência do tratamento (JUDD, 2006). Além disso, destaca-se ainda que a utilização do processo de filtração por membranas, em detrimento da sedimentação gravitacional, possibilita redução significativa da área de instalação, por conta da eliminação do decantador, e também garante um efluente com ausência de sólidos em suspensão e total remoção de bactérias (MELIN *et al.*, 2006).

Apesar das vantagens reportadas, a colmatação das membranas pode encarecer os custos de operação e manutenção dos BRMs, limitando, muitas vezes, a sua aplicação em escalas maiores (LE-CLECH; CHEN; FANE, 2006). Dessa forma, verifica-se grande interesse em se investigar as causas e os mecanismos envolvidos no processo de incrustação das membranas em BRMs.

Entre os fatores investigados, Drews (2010) destaca que a idade do lodo (θ_c) ou tempo de retenção de sólidos (TRS) aparece como um parâmetro com considerável influência na colmatação das membranas, uma vez que interfere diretamente nas propriedades do licor misto (mistura de efluente e lodo). Sabe-se que a θ_c modifica a atividade da biomassa em reatores biológicos (HAN *et al.*, 2005), influenciando, por exemplo, a produção de substâncias poliméricas extracelulares (SPEs) e de produtos microbianos solúveis (PMSs). Considerando que tais compostos têm sido reportados como determinantes ao processo de colmatação das membranas (DREWS; LEE; KRAUME, 2006), diversos grupos de pesquisa vêm atuando nessa temática, avaliando o efeito da θ_c na filtrabilidade do licor misto e, por consequência, no desempenho das membranas.

Grelier, Rosenberger e Tazi-Pain (2006) investigaram o efeito de diferentes idades de lodo (8, 15 e 40 dias) em BRM tratando esgoto doméstico. Os autores verificaram que a utilização da idade de lodo de 40 dias levou aos melhores resultados quanto à filtrabilidade do licor misto, sendo observadas as menores concentrações de polissacarídeos e menor taxa de colmatação das membranas. Massé, Spérandio e Cabassud (2006) observaram que o emprego de menores idades de lodo resultou em impacto negativo no desempenho da membrana, o qual esteve associado, segundo esses autores, a maior quantidade de SPE e PMS no licor em condições de θ_c reduzidas. Da mesma maneira, Van den Broeck *et al.* (2012) reportaram que a θ_c de 50 dias conduziu a melhor biofloculação da biomassa e, conseqüentemente, melhor filtrabilidade do licor misto e menor taxa de colmatação, quando comparada a tempos de retenção de sólidos de 10 e 30 dias. Por outro lado, Lee, Kang e Shin (2003) não verificaram alteração significativa na quantidade de SPE para as idades de lodo de 20, 40 e 60 dias. Já Wu, Yi e Fane (2011) observaram que a taxa de colmatação foi mais intensa em BRM operando com completa retenção de sólidos (sem descarte de lodo), em relação aos TRSs equivalentes a 10 e 30 dias. Segundo esses autores, o menor tamanho das partículas e a maior quantidade de SPE observada explicam o pior desempenho da membrana sob idades de lodo mais elevadas. Percebe-se, pelos trabalhos

apresentados, que a relação entre a θ_c e a colmatação das membranas ainda não é muito clara, sendo encontrada na literatura certa divergência acerca do tema. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo avaliar a influência da θ_c no processo de colmatação/incrustação das membranas em BRM tratando esgoto sanitário.

METODOLOGIA

Unidade experimental

A unidade experimental utilizada na presente pesquisa compreendeu um BRM em escala de bancada, com volume útil de 15 L, construído em acrílico em forma elíptica (Figura 1). No reator foram instalados dois módulos de membrana de ultrafiltração (Polymem), com tamanho de poro de 0,08 μm e área filtrante de 0,9 m^2 para cada módulo. Os módulos de membranas foram instalados de modo a permanecerem submersos no reator, posicionados acima dos difusores de ar no intuito de minimizar a deposição de sólidos e a formação de biofilme sobre a superfície das membranas.

A unidade experimental era equipada com um painel de controle para a operação automatizada de toda a unidade experimental, a qual foi constituída de: bomba centrífuga, para enchimento do reator; misturador, para manter a biomassa homogeneamente distribuída no BRM; compressor de ar, para o fornecimento de oxigênio aos micro-organismos; bombas peristálticas, para gerar a força motriz ao processo de filtração; rotâmetros para o controle da vazão de ar; e dois vacuômetros digitais, instalados junto à tubulação do permeado, para determinação dos valores da pressão transmembrana (PTM).

Operação do reator e estratégias operacionais aplicadas

O BRM foi operado em regime de batelada sequencial, composto de três fases: alimentação (1 minuto), reação anóxica/anaeróbia (59 minutos), reação aeróbia e filtração (180 minutos). O tempo total de ciclo do reator foi de quatro horas, de modo que fossem realizados seis ciclos por dia. Durante a fase de alimentação e as fases de reação anóxica/anaeróbia, o sistema de aeração era desligado e o agitador mecânico acionado, garantindo, assim, a homogeneização do licor misto.

A operação do BRM foi conduzida mediante três estratégias operacionais: E-1, E-2 e E-3, nas quais foram aplicadas as θ_c de 80, 40 e 20 dias, respectivamente. O tempo destinado a cada estratégia operacional foi três vezes superior à respectiva θ_c aplicada (isto é, 240, 120 e 80 dias, respectivamente). Durante a fase de aeração/filtração (180 minutos), foi empregado o regime de filtração intermitente, em que o processo de permeação era interrompido por um minuto a cada nove minutos de permeação. Ao final de cada ciclo do reator era retirado um volume total de 3 L de permeado, com uma vazão de permeação correspondente a 0,562 L h^{-1} em cada módulo de membrana. Considerando tal

vazão, o fluxo de filtração obtido foi de 6,25 L m⁻² h⁻¹, situado abaixo do fluxo crítico, conforme reportado por Belli *et al.* (2012). O fluxo de filtração empregado permitiu que o BRM operasse com tempo de detenção hidráulica (TDH) de aproximadamente 20 horas nas 3 estratégias. O BRM foi operado a temperatura ambiente (15–26°C), enquanto o pH foi mantido próximo a 8. A Tabela 1 apresenta as condições operacionais utilizadas durante a operação do reator.

Os valores de idade de lodo adotados estão compreendidos na faixa usualmente aplicada em BRM cuja operação está voltada à avaliação da colmatação das membranas (LEE; KANG; SHIN, 2003; POLLICE *et al.*, 2008; VAN DEN BROECK *et al.*, 2012; SABIA; FERRARIS; SPAGNI, 2013). A faixa dos valores da taxa de aeração nas membranas (TAM) adotada (3,3 a 5,3 m³ m² h⁻¹) está situada próxima aos valores observados em outros trabalhos, geralmente compreendidos entre 1 e 5 m³ m² h⁻¹

(DELGADO *et al.*, 2002; LEE; KANG; SHIN, 2003; AHMED *et al.*, 2007; IVANOVIC; LEIKNES, 2008; RAHIMI *et al.*, 2011).

O controle da θ_c no BRM foi realizado manualmente, a partir do descarte diário de determinado volume de licor misto do reator (controle hidráulico da θ_c). A vazão de descarte para manutenção da θ_c pretendida em cada condição de operação foi calculada a partir da Equação 1, que considera a θ_c inversamente proporcional ao volume de lodo descartado:

$$\theta_c = \frac{V_{\text{biorreator}}}{Q_{\text{descarte}}} \tag{1}$$

Em que:

θ_c = idade do lodo (dias);

$V_{\text{biorreator}}$ = volume do biorreator (L);

Q_{descarte} = vazão de descarte do lodo (L.dia⁻¹).

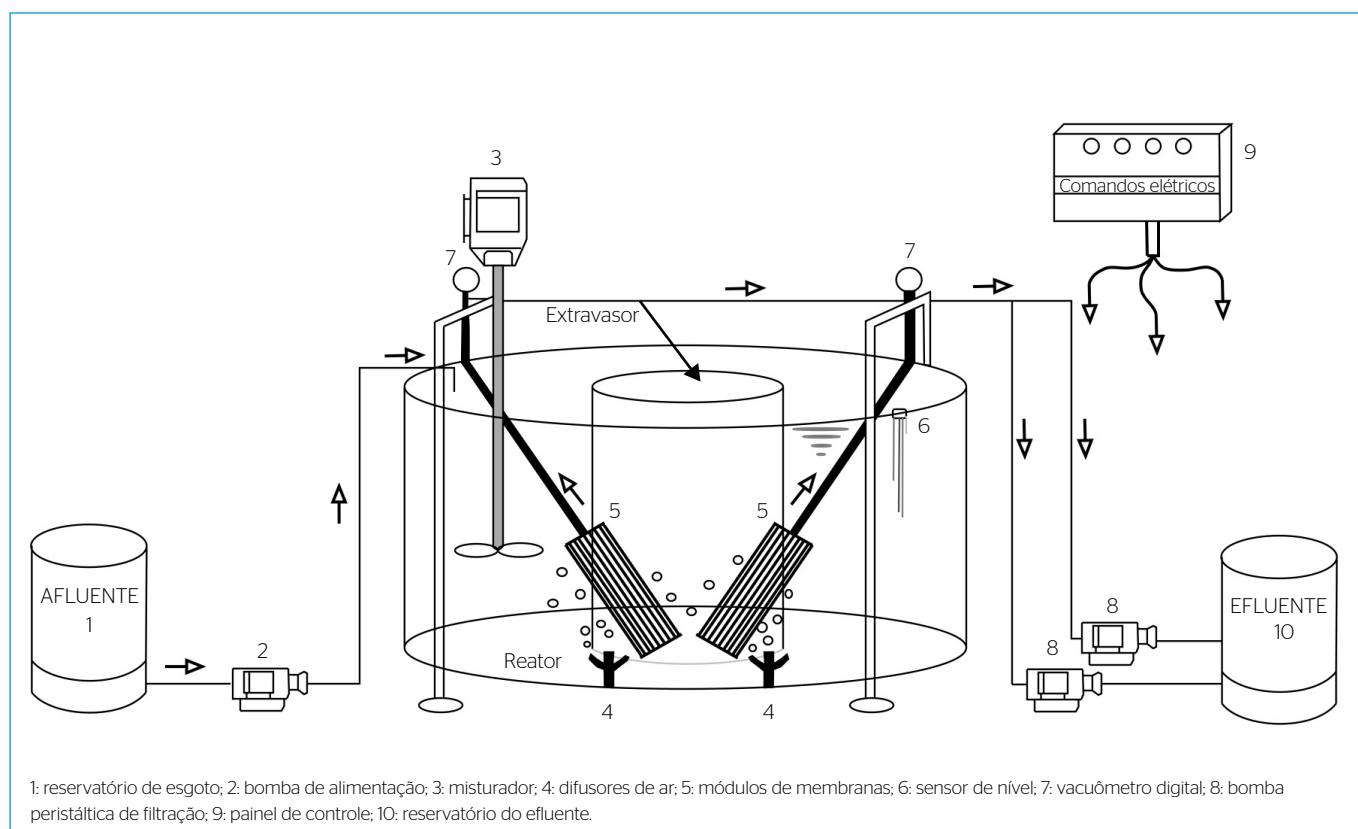


Figura 1 - Representação esquemática da unidade experimental.

Tabela 1 - Condições operacionais aplicadas ao reator em cada estratégia operacional.

	θ_c (d)	J (L.m ² .h ⁻¹)	TTV(%)	Q_{perm} (L.dia ⁻¹)	TDH (horas)	TAM (m ³ .m ² .h ⁻¹)	Tempo (d)
E-1	80	6,25	20	18	20	3,3 a 5,3	240
E-2	40	6,25	20	18	20	3,3 a 5,3	120
E-3	20	6,25	20	18	20	3,3 a 5,3	60

E-1: idade de lodo de 80 dias; E-2: idade de lodo de 40 dias; E-3: idade de lodo de 20 dias; θ_c : idade do lodo; J: fluxo de filtração; TTV: taxa de troca volumétrica; Q_{perm} : vazão de permeado; TDH: tempo de detenção hidráulica; TAM: taxa de aeração na membrana.

A inoculação do BRM foi realizada com lodo proveniente do tanque de aeração de uma estação de tratamento de esgoto da cidade de Florianópolis. A partir da inoculação, o BRM foi operado por 420 dias, sendo aplicadas nesse período as três idades de lodo mencionadas. A alimentação do reator foi realizada com esgoto sanitário, captado junto à rede coletora de esgotos da companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN). Para a captação, era utilizada uma bomba que operava submersa no poço de visita da rede coletora, posicionada internamente a um tubo de PVC, com furos de 10 mm, a fim de evitar a passagem de sólidos grosseiros. A Tabela 2 apresenta a caracterização do esgoto sanitário utilizado durante o desenvolvimento de cada estratégia operacional

O monitoramento da filtrabilidade do licor misto do reator foi realizado mediante o cálculo da velocidade de colmatação (VC) das membranas, expressa em mbar.dia⁻¹. A referida velocidade foi calculada para duas situações:

1. considerando a variação da PTM ao longo do tempo total de cada estratégia (ou seja, 240, 120 e 60 dias);
2. considerando a variação da PTM a cada 30 dias de operação do BRM, dentro do período de aplicação de cada estratégia.

O procedimento de limpeza das membranas foi realizado apenas entre as trocas de condições operacionais (E-1, E-2 e E-3), denominada de limpeza estratégica. Limpezas corretivas não foram necessárias em função da PTM do BRM não ter atingido valor limite de 0,7 bar recomendado pelo fabricante das membranas. Para a realização das limpezas estratégicas, o módulo de membranas era retirado do reator e acondicionado em um recipiente separado, no qual era submetido à filtração de solução oxidante (hipoclorito de sódio, 2%) e ácida (ácido cítrico, 20 g.L⁻¹) por 1 hora para cada solução. Após a limpeza, o módulo de membranas era retornado ao reator e sua operação retomada.

Avaliação do potencial incrustante do licor misto do biorreator à membrana

Paralelamente ao monitoramento da PTM das membranas do BRM, foi realizado também um ensaio de filtração de bancada para monitorar o potencial incrustante do licor misto do reator. Tal avaliação envolveu a aplicação do teste de filtrabilidade conhecido como índice de incrustação da membrana (*membrane fouling index* — MFI). Um valor elevado

de MFI pode indicar maior potencial de incrustação do licor misto, enquanto valores baixos sugerem uma maior facilidade em sua filtração (ZHANG *et al.*, 2008). Os ensaios para determinação dos valores de MFI foram realizados em unidade de filtração de bancada, confeccionada em acrílico, com capacidade volumétrica de 250 mL. A Figura 2 ilustra o aparato experimental utilizado.

O MFI pode ser calculado a partir da razão entre o quociente do tempo de filtração e o volume de permeado (t/V) e o volume de permeado (V) (Equação 2).

$$MFI = \frac{t}{\frac{V}{V}} \quad (2)$$

Durante o ensaio, a unidade de filtração era pressurizada a partir de um cilindro de ar sintético. A membrana (acetato celulose com diâmetro de poro de 0,2 µm) era posicionada no compartimento inferior da unidade de filtração, separando o fluido a ser filtrado do permeado. Durante o período de filtração (20 minutos), o permeado era coletado diretamente

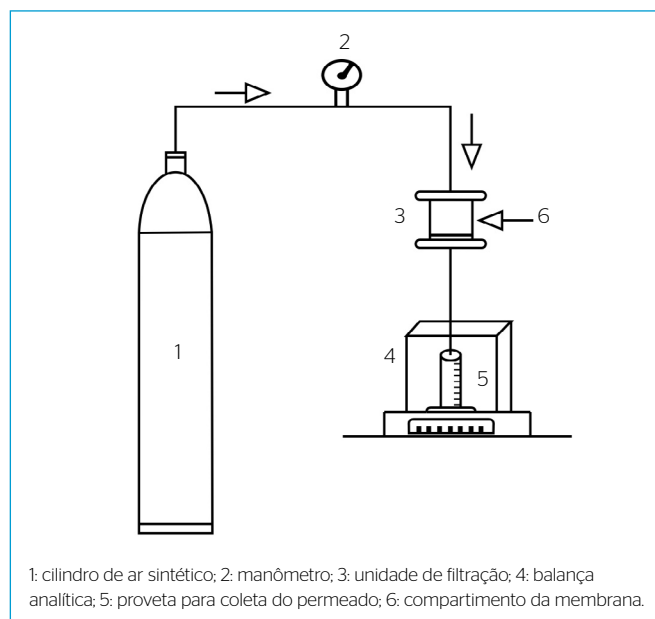


Figura 2 - Representação esquemática do aparato experimental utilizado para determinação do *membrane fouling index* e resistência específica da torta.

Tabela 2 - Características do esgoto sanitário em cada estratégia operacional (valores médios e desvio padrão).

Etapa1	DQO (mgO ₂ L ⁻¹)	Ntotal (mg L ⁻¹)	N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	Ptotal (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	pH
E-1	747 ± 153	66,7 ± 10	55,0 ± 11	7,1 ± 1,4	230 ± 114	7,2 ± 0,29
E-2	749 ± 161	64,5 ± 12	54,4 ± 8,2	6,7 ± 1,7	127 ± 38,6	7,4 ± 0,16
E-3	782 ± 128	73,9 ± 11	57,6 ± 9,3	7,9 ± 2,2	136 ± 72,5	7,3 ± 0,16

E1: idade de lodo de 80 dias; E-2: idade de lodo de 40 dias; E-3: idade de lodo de 20 dias; DQO: demanda química de oxigênio; Ntotal: nitrogênio total; N-NH₄⁺: nitrogênio amoniacal; SST: sólidos suspensos totais; pH: potencial hidrogeniônico.

e colocado sobre uma balança analítica. Os respectivos pesos acumulados eram anotados a cada 30 segundos e posteriormente convertidos a volume, para possibilitar o cálculo do fluxo de filtração durante o ensaio.

Os ensaios de filtração foram realizados em cada condição operacional com amostras do licor misto do BRM, denominadas de $MFI_{L\text{icor-misto}}$, e também com o sobrenadante do licor misto previamente centrifugado a 4.000 rpm, denominada de $MFI_{S\text{obrenadante}}$. Dessa maneira, foi possível avaliar o potencial de incrustação da fração solúvel e o potencial de incrustação dos sólidos em suspensão.

A partir do $MFI_{L\text{icor-misto}}$, calculou-se a resistência específica dos sólidos depositados sobre a membrana, também conhecida como resistência específica da torta (RET). O valor da RET (m.kg^{-1}) pode ser entendido como sendo a resistência da torta normalizada pela massa de biossólidos depositada sobre a área da membrana. A RET foi obtida a partir da Equação 3 (WANG; LI; HUANG, 2007).

$$RET = \frac{2000A^2\Delta P}{\mu C} \frac{t}{V} \quad (3)$$

Em que:

RET = resistência específica da torta;

ΔP = pressão aplicada (kPa);

A = área de filtração da membrana (m^2);

C = teor de SST (kg.m^{-3});

μ = viscosidade dinâmica do permeado (Pa.s);

t = tempo de filtração (s);

V = volume de permeado (m^3).

Métodos analíticos

Extração e determinação de proteínas e polissacarídeos

O licor misto do BRM foi caracterizado quanto à concentração de PMSs e SPEs, avaliados neste estudo sob a forma de proteínas e polissacarídeos.

Para o PMS, procedia-se inicialmente à centrifugação do licor misto (4.000 rpm por 15 minutos), com posterior filtração do sobrenadante em membrana de acetato celulose com tamanho de poro de 0,45 μm . A amostra filtrada era preservada, para posteriores análises de proteínas e polissacarídeos. Para a determinação das SPEs, por estarem aderidas aos flocos biológicos, foi necessária a realização do processo de extração para posterior filtração. Para tal, o lodo sedimentado obtido após a centrifugação para separação do PMS foi ressuspenso em solução de NaCl 0,05% e posto sob aquecimento em banho-maria por 30 minutos a 60°C. Em seguida, a suspensão obtida era filtrada em membrana de acetato celulose 0,45 μm , obtendo-se, assim, a amostra contendo as SPEs solubilizadas. As proteínas foram quantificadas conforme método descrito por Lowry *et al.* (1951), utilizando albumina de soro bovino como padrão. Para quantificação dos carboidratos, utilizou-se

o método do fenol-ácido sulfúrico descrito por Dubois *et al.* (1956), que utiliza a glicose como referência na curva padrão.

Hibridização fluorescente in situ

A análise de hibridização fluorescente *in situ* (FISH) foi realizada conforme descrito por Amann *et al.* (1990). A técnica em questão foi utilizada com vistas ao monitoramento da presença de bactérias filamentosas no licor misto nas diferentes estratégias operacionais. Para tal, amostras de biomassa foram coletadas ao final de cada estratégia operacional e fixadas em paraformaldeído, para posterior hibridização com 4,6-diamidino-2-fenilindole (DAPI). Em sequência, as amostras foram visualizadas em microscópio Olympus Bx41.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento da pressão transmembrana

O comportamento da PTM observado ao longo da operação do BRM é apresentado na Figura 3. Nota-se que os valores da PTM permaneceram abaixo do limite de 0,7 bar para as três idades de lodo aplicadas, não sendo, portanto, necessária a realização do procedimento de limpeza corretiva durante o período operacional de cada estratégia (apenas as limpezas nas trocas de estratégia). Observa-se também que o perfil de crescimento da PTM foi semelhante durante o período operacional sob a θ_c de 80 e 40 dias, apresentando nesses casos uma evolução inicial estável e, em seguida, um crescimento mais acentuado. Por outro lado, o perfil de crescimento da PTM sob a θ_c de 20 dias é claramente mais acentuado durante todo o período em questão, o que conduziu, neste caso, a uma VC média de 1,95 mbar dia^{-1} , enquanto sob a θ_c de 40 e 80 dias as VCs observadas foram de 0,86 mbar dia^{-1} e 0,82 mbar dia^{-1} , respectivamente.

O perfil da PTM apresentado sob as idades de lodo de 80 e 40 dias se enquadra no comportamento usualmente observado em BRM operado em condições de fluxo subcrítico, também conhecido como padrão de dois estágios. Nesse cenário, um baixo aumento inicial da PTM ocorre, seguido então de um rápido crescimento após um determinado período de operação (POLLICE *et al.*, 2005).

Judd (2006) reporta que o rápido crescimento da PTM é precedido pelas fases de colmatação condicional e colmatação lenta, nas quais ocorre a ação e interação de diversos fatores, destacando-se o processo de adsorção de PMS na membrana, que por sua vez favorece o crescimento de biofilme, formação de torta, e bloqueio parcial ou total dos poros. Após esses fenômenos, a evolução da PTM é afetada — um rápido crescimento é observado.

A Figura 4 apresenta a evolução da VC para cada idade de lodo aplicada.

Verifica-se que as velocidades de colmatação sob a idade de lodo de 80 e 40 dias situam-se inicialmente em um patamar mais baixo e aumentam gradualmente até atingir o valor máximo, próximo a 1,4 mbar dia^{-1} para ambas as estratégias. Por outro lado, sob a idade de lodo de 20 dias,

a VC já se encontrava próxima a 2 mbar dia⁻¹ em apenas 30 dias de operação (do dia 360 ao 391). Diante dos resultados obtidos, fica evidente que as fases de colmatção condicional e colmatção lenta acontecem muito mais rapidamente na condição da θ_c de 20 dias, de modo que o crescimento rápido da PTM já é observado nos primeiros dias de operação do BRM.

O aumento da VC das membranas com a utilização de idades de lodo mais baixas também foi reportado em outros trabalhos (GRELIER; ROSENBERGER; TAZI-PAIN, 2006; OUYANG; LIU, 2009; VAN DEN BROECK *et al.*, 2012). A redução da θ_c pode alterar características importantes do reator biológico, tais como a relação alimento/microrganismo (A/M) e coeficiente de crescimento celular

(Y). Em decorrência das alterações causadas pela redução da idade do lodo, a atividade microbiológica é alterada, afetando o metabolismo e a produção de determinados subprodutos celulares, tais como proteínas, polissacarídeos, lipídeos, DNA, RNA, substâncias húmicas, entre outros. Esses produtos têm sido apontados como determinantes no processo de colmatção das membranas (DREWS; LEE; KRAUME, 2006), e os polissacarídeos e as proteínas, por serem mais abundantes, têm recebido maior atenção. Dessa maneira, a variação da θ_c pode afetar a produção desses compostos, influenciando, por sua vez, a filtrabilidade do licor misto e o comportamento da PTM. Assim, o monitoramento de proteínas e polissacarídeos, sejam dissolvidos no licor misto na forma de PMS ou aderidos aos flocos biológicos na forma de SPE,

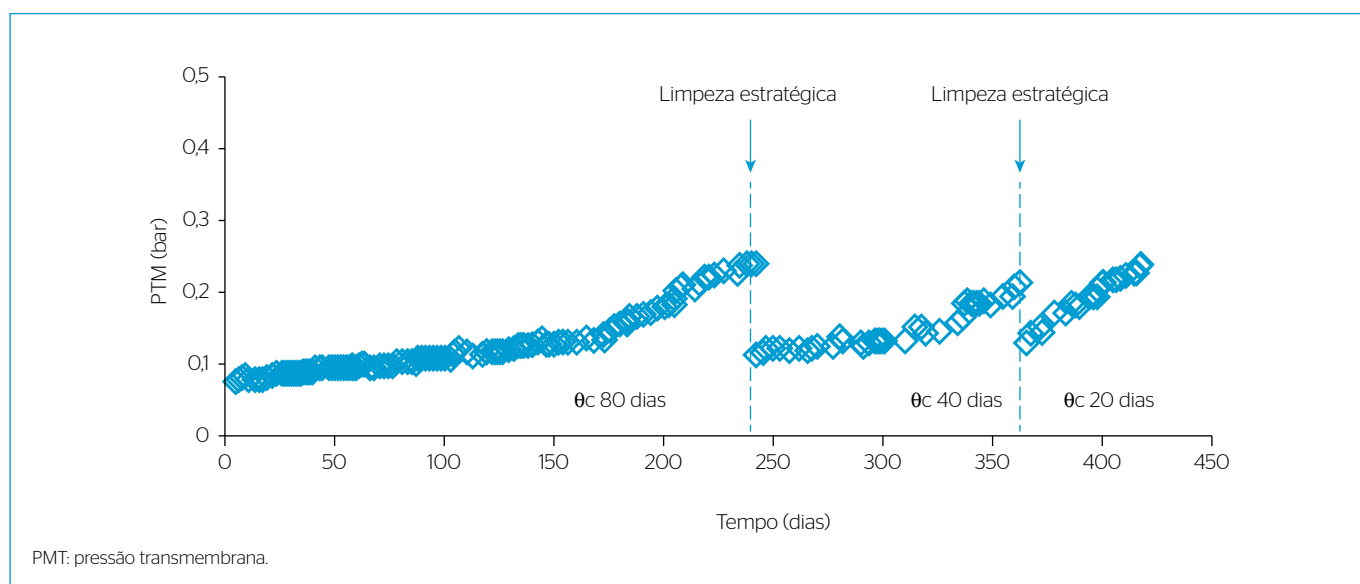


Figura 3 - Evolução dos valores da pressão transmembrana.

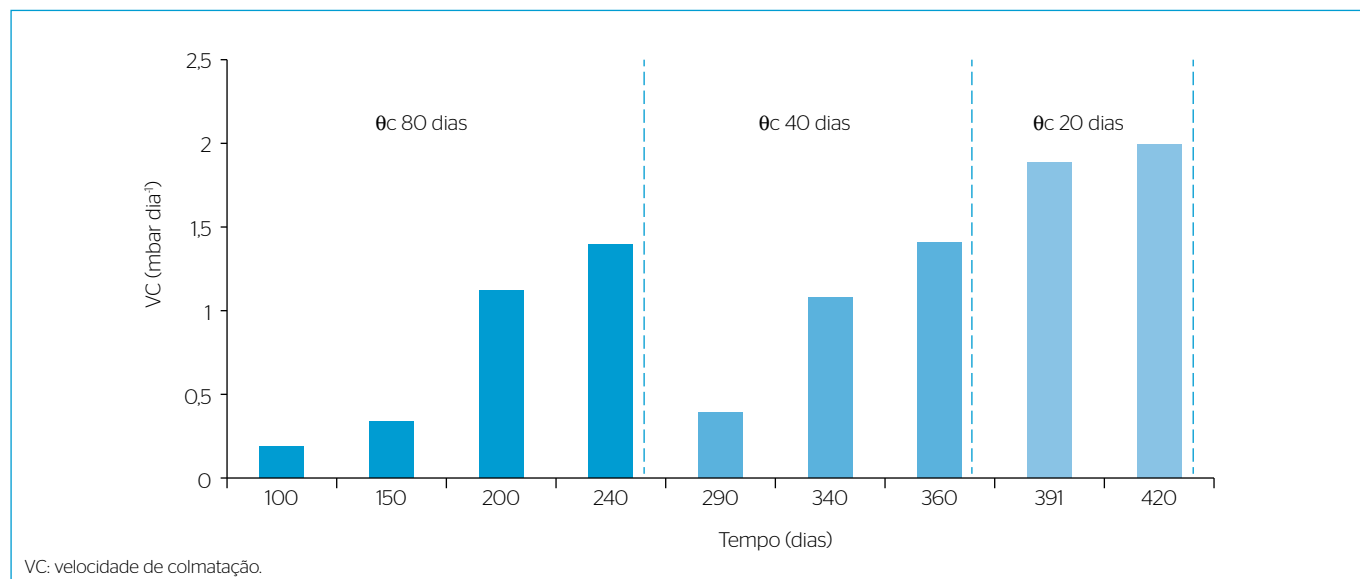


Figura 4 - Evolução da velocidade de colmatção.

torna-se bastante relevante para o melhor entendimento do processo de colmatação das membranas.

Efeito da idade do lodo na concentração de produtos microbianos solúveis e substâncias poliméricas extracelulares

A Figura 5A apresenta a concentração média de PMS, avaliada em termos de polissacarídeos e proteínas no licor misto do reator para cada idade de lodo aplicada.

Nota-se que a maior concentração de PMS ocorreu durante a operação do BRM com θ_c de 20 dias, condição para a qual foram obtidos valores médios de polissacarídeos e proteínas de 10,5 e 36,3 mg L⁻¹, respectivamente. Os resultados mostram, também, clara tendência de aumento na concentração de proteínas conforme a idade de lodo é reduzida. Por outro lado, para os polissacarídeos, esse comportamento só foi observado a partir da redução da θ_c de 40 para 20 dias, tendo em vista que a redução da θ_c de 80 para 40 dias resultou em ligeira redução na concentração de polissacarídeos (7,2 para 6,1 mg L⁻¹). Lin *et al.* (2014) reportaram que o aumento da relação alimento/microrganismo (A/M) pode induzir a uma maior produção de PMS, sendo essa proporcional à quantidade de substrato utilizado. De fato, o aumento na concentração de PMS foi acompanhado pelo aumento da relação A/M, conforme se pode visualizar na Figura 6.

Da mesma maneira que para os PMSs, as maiores concentrações de SPE também foram observadas na condição da θ_c de 20 dias (Figura 5B). Os resultados mostram que a concentração de proteínas na biomassa foi superior à de polissacarídeos para todas as idades de lodo aplicadas, resultado possivelmente associado a menor biodegradabilidade das proteínas diante os polissacarídeos (LIN *et al.*, 2014).

Além disso, a exemplo do observado para PMS, é possível perceber clara tendência de aumento na concentração de proteínas com a redução da θ_c , enquanto para os polissacarídeos esse aumento só ocorreu a partir da redução da θ_c de 40 para 20 dias. Em decorrência, a relação PN/PS aumentou com a redução da idade de lodo, apresentando os valores de 3,1, 4,1 e 4,8 para as θ_c de 80, 40 e 20 dias, respectivamente.

De acordo com Sponza *et al.* (2003), o aumento da relação PN/PS pode induzir a um aumento da hidrofobicidade dos flocos biológicos. Lee, Kang e Shin (2003) verificaram correlação positiva entre a resistência à filtração devido aos sólidos suspensos e o aumento da relação PN/PS. Massé, Spérandio e Cabassud (2006) indicam que a relação PN/PS pode ser utilizada como um indicador de propensão à colmatação das membranas por conta da presença de sólidos em suspensão. De fato, o período em que o reator apresentou a maior relação PN/PS (θ_c 20 dias) também apresentou colmatação mais severa das membranas. Assim, a maior colmatação da membrana sob a θ_c 20 dias pode estar associada a dois fatores:

1. maior concentração de PMS e SPE no licor misto;
2. maior relação PN/PS dos flocos biológicos.

Comportamento do membrane fouling index

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de filtração de bancada MFI, referente à filtração do licor misto ($MFI_{\text{Licor-misto}}$) e do sobrenadante do licor misto ($MFI_{\text{Sobrenadante}}$), obtido mediante prévia centrifugação.

Os resultados mostram tendência de aumento nos valores do $MFI_{\text{Licor-misto}}$ durante o período com θ_c de 80 dias, indicando possível deterioração da filtrabilidade do licor misto nessa estratégia operacional. Posteriormente, sob a θ_c de 40 dias, observaram-se queda e estabilização nos valores do $MFI_{\text{Licor-misto}}$, sugerindo melhora da sua filtrabilidade. Por fim, sob a θ_c de 20 dias, foi observado aumento

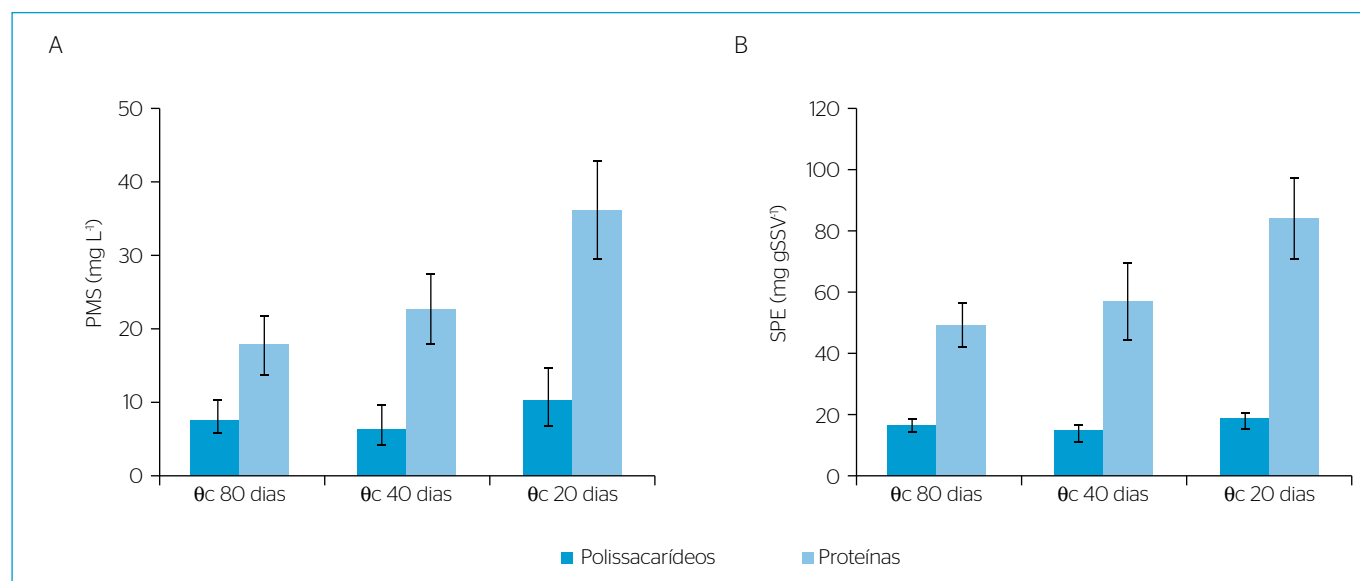


Figura 5 - Concentrações médias de produto microbiano solúvel (A) e substância polimérica extracelular (B) no biorreator à membrana, em termos de polissacarídeos e proteínas, para cada idade de lodo aplicada.

acentuado nos valores do $MFI_{Lícor-misto}$, indicando que a filtrabilidade foi novamente prejudicada.

Diversos fatores podem afetar as condições da filtrabilidade do licor misto. No presente estudo, os fatores que podem ser considerados são aqueles diretamente relacionados à variação da θ_c , como o teor de sólidos suspensos totais (SST), ou aqueles indiretamente vinculados a esse parâmetro, como a produção de PMS e SPE, teor de matéria orgânica dissolvida, excesso de bactérias

filamentosas, viscosidade, entre outros. Além desses, fatores externos também devem ser considerados, como características do afluente e temperatura.

Imagens obtidas a partir da técnica de FISH revelaram a presença excessiva de bactérias filamentosas no licor misto quando a θ_c aplicada foi de 80 dias, sobretudo a partir do dia 140 de operação. Entretanto, sob a θ_c de 40 e 20 dias, tal comportamento não foi observado, conforme pode-se observar na Figura 8.

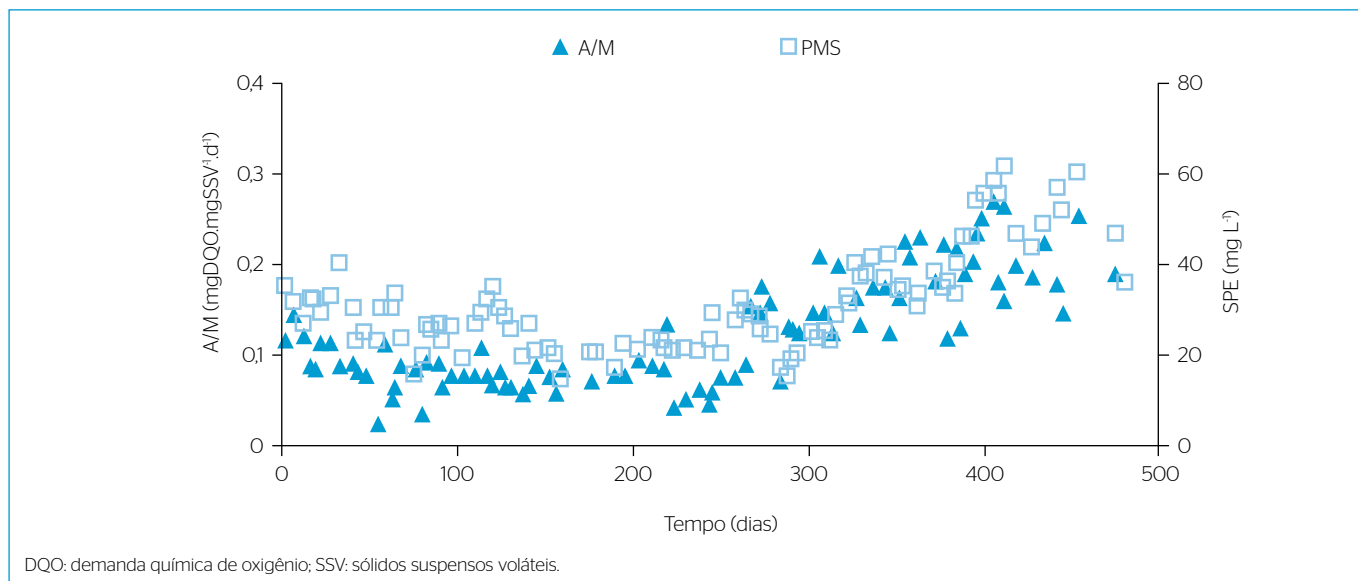


Figura 6 - Evolução das concentrações de produto microbiano solúvel e sua relação com a razão alimento/microrganismo ao longo dos dias operacionais do biorreator à membrana.

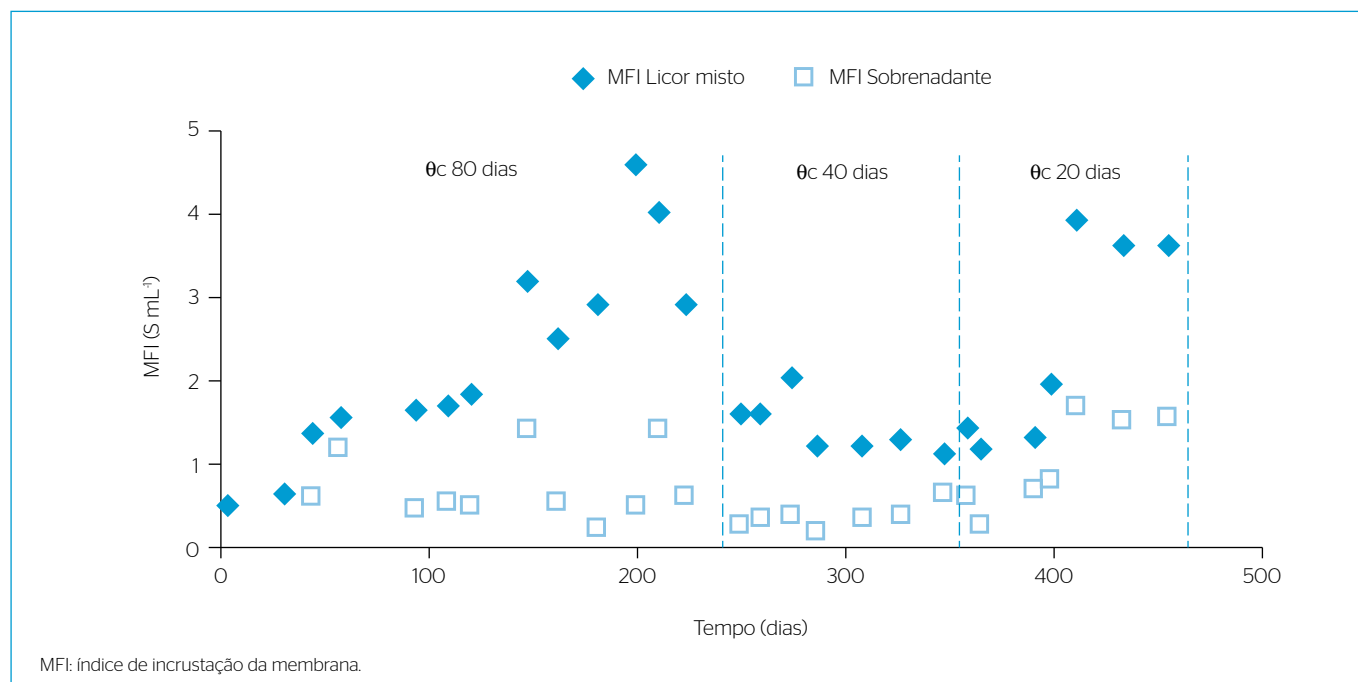


Figura 7 - Distribuição temporal dos valores do $MFI_{Sobrenadante}$ e $MFI_{Lícor-misto}$

Meng *et al.* (2006) reportam que o crescimento excessivo de bactérias filamentosas, também conhecido como *bulking* filamentosos, pode diminuir a filtrabilidade do licor misto, prejudicando, assim, o desempenho da membrana em BRM. Dessa maneira, os maiores valores do $MFI_{\text{Licor-misto}}$ ao final do período com θ_c de 80 dias podem ser decorrentes do excesso de bactérias filamentosas nessa ocasião. Liu e Liu (2006) reportam que o crescimento de bactérias filamentosas pode ser estimulado em sistemas de lodos ativados operados com elevada θ_c , tendo em vista a baixa taxa de crescimento específica dessas bactérias. Além disso,

a utilização de elevadas idades de lodo resulta em maior concentração de biomassa no reator, dificultando a difusão de oxigênio no licor misto. Lin *et al.* (2014) comentam que tal condição pode também estimular o crescimento das filamentosas, gerando problemas de colmatação mais severos. Assim, a junção de tais fatores pode ter contribuído para a presença mais significativa das filamentosas sob a θ_c de 80 dias.

A redução significativa na quantidade de bactérias filamentosas no período com θ_c de 40 dias (Figura 8E) pode explicar os menores valores do $MFI_{\text{Licor-misto}}$ e, por consequência, a melhor filtrabilidade obtida nessas

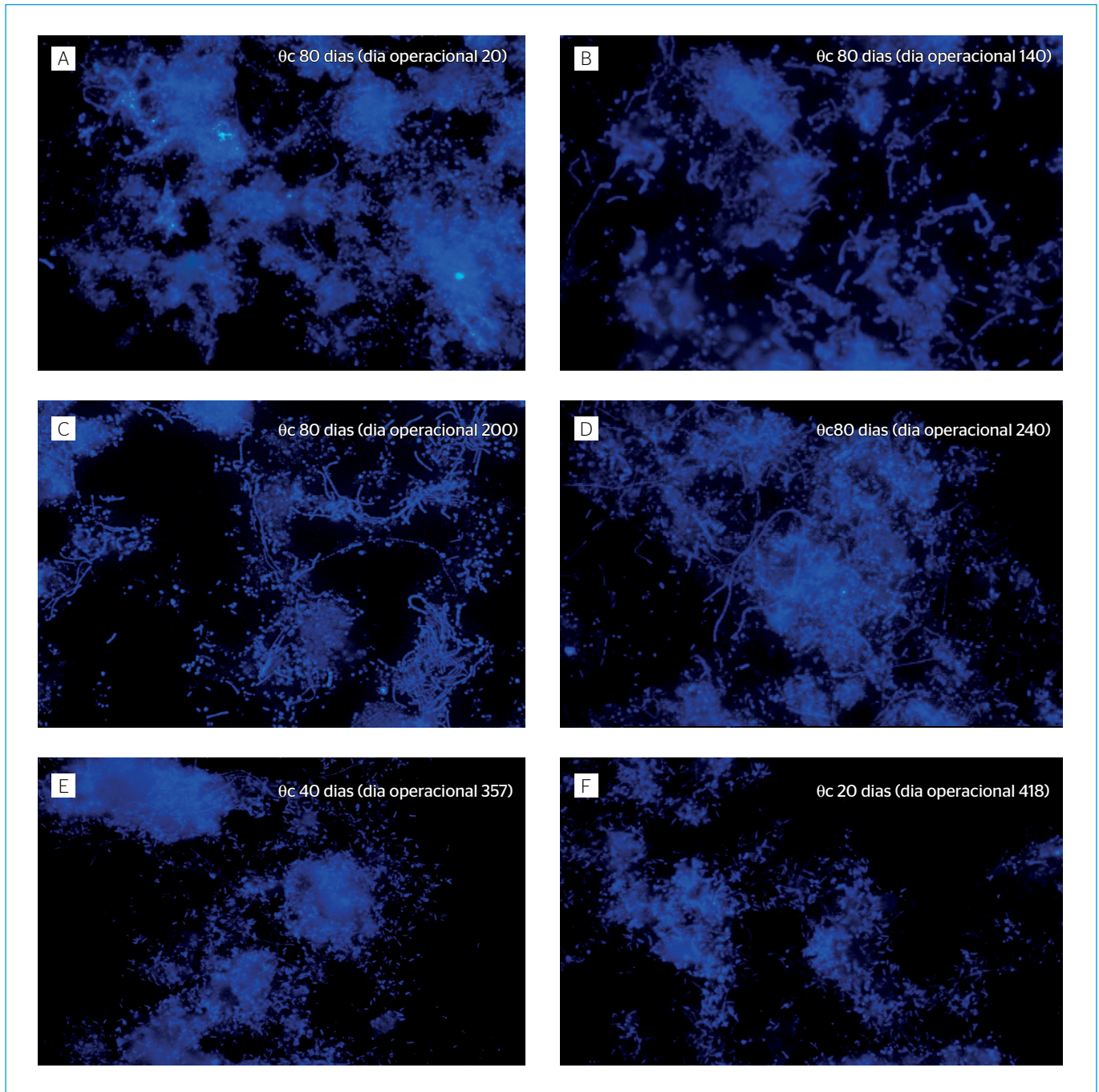


Figura 8 - Imagens da hibridização da biomassa do reator com 4,6-diamidino-2-fenilindole para diferentes idades de lodo.

condições. Por outro lado, durante aplicação da θ_c de 20 dias, observa-se que os valores do MFI passam a aumentar novamente, mesmo não sendo detectadas bactérias filamentosas nesse período (Figura 8F). Entende-se que, neste caso, o referido aumento possa ser atribuído a maior concentração da matéria orgânica solúvel do licor misto, hipótese reforçada pelos maiores valores do $MFI_{\text{Sobrenadante}}$ no período final dessa estratégia. Além disso, o maior valor da relação PN/PS verificado pode ter contribuído para elevar a resistência à filtração devido aos sólidos em suspensão.

O comportamento da resistência específica da torta (RET), que leva em consideração apenas a resistência à filtração devido ao teor de sólidos em suspensão ($MFI_{\text{Licor-misto}}$ menos $MFI_{\text{Sobrenadante}}$), não se mostrou dependente dos valores de SST, conforme pode-se visualizar na Figura 9.

Observa-se que a RET apresenta uma tendência de crescimento durante o período cuja θ_c aplicada foi de 80 dias, mesmo com os valores de SST relativamente estáveis em torno de 9.000 mg L^{-1} . Além disso, a contínua redução no teor de SST sob a idade de lodo de 40 dias não afetou, aparentemente, o comportamento da RET. Por fim, sob a idade de lodo de 20 dias, verifica-se aumento substancial da RET, mesmo com teores de SST duas vezes menor do que os observados sob θ_c de 80 dias. Fica evidente, portanto, que o teor de SST não teve influência sobre a filtrabilidade do licor misto, remetendo a outros fatores maior influência sobre a mesma, como PMS, demanda química de oxigênio (DQO) solúvel do licor misto e presença de bactérias filamentosas.

Por fim, entende-se que a filtrabilidade do licor misto foi influenciada pela redução da θ_c , decorrente, sobretudo, dos parâmetros indiretos

associados à sua variação. De maneira geral, os ensaios de bancada apontaram melhor filtrabilidade do licor misto sob a idade de lodo de 40 dias, seja considerando os sólidos em suspensão ($MFI_{\text{Licor-misto}}$) ou apenas o sobrenadante ($MFI_{\text{Sobrenadante}}$). O resultado obtido está de acordo com a hipótese levantada por Meng *et al.* (2009), os quais sugerem, a partir da revisão de trabalhos publicados na literatura, que o valor ótimo da θ_c para uma menor colmatação em BRM está provavelmente situado entre 20 e 50 dias.

CONCLUSÕES

A utilização da θ_c de 20 dias resultou em maior colmatação das membranas do BRM. Nessa condição, a VC foi de $1,95 \text{ mbar dia}^{-1}$, aproximadamente duas vezes maior do que a observada nas θ_c de 80 e 40 dias. A maior colmatação observada no período em questão foi atribuída a maior concentração de PMS e SPE no licor misto e a maior relação PN/PS dos flocos biológicos.

Apesar de se verificar uma baixa VC durante o período em que o reator foi submetido à idade de lodo de 80 dias, observou-se crescimento mais acentuado da PTM no período final dessa estratégia operacional. O emprego de FISH revelou crescimento excessivo de bactérias filamentosas sob a θ_c de 80 dias, que foi entendido como sendo a causa do aumento da VC mencionada. Os ensaios de filtração de bancada revelaram o mesmo comportamento, apontando para deterioração da filtrabilidade do licor misto no período final dessa estratégia

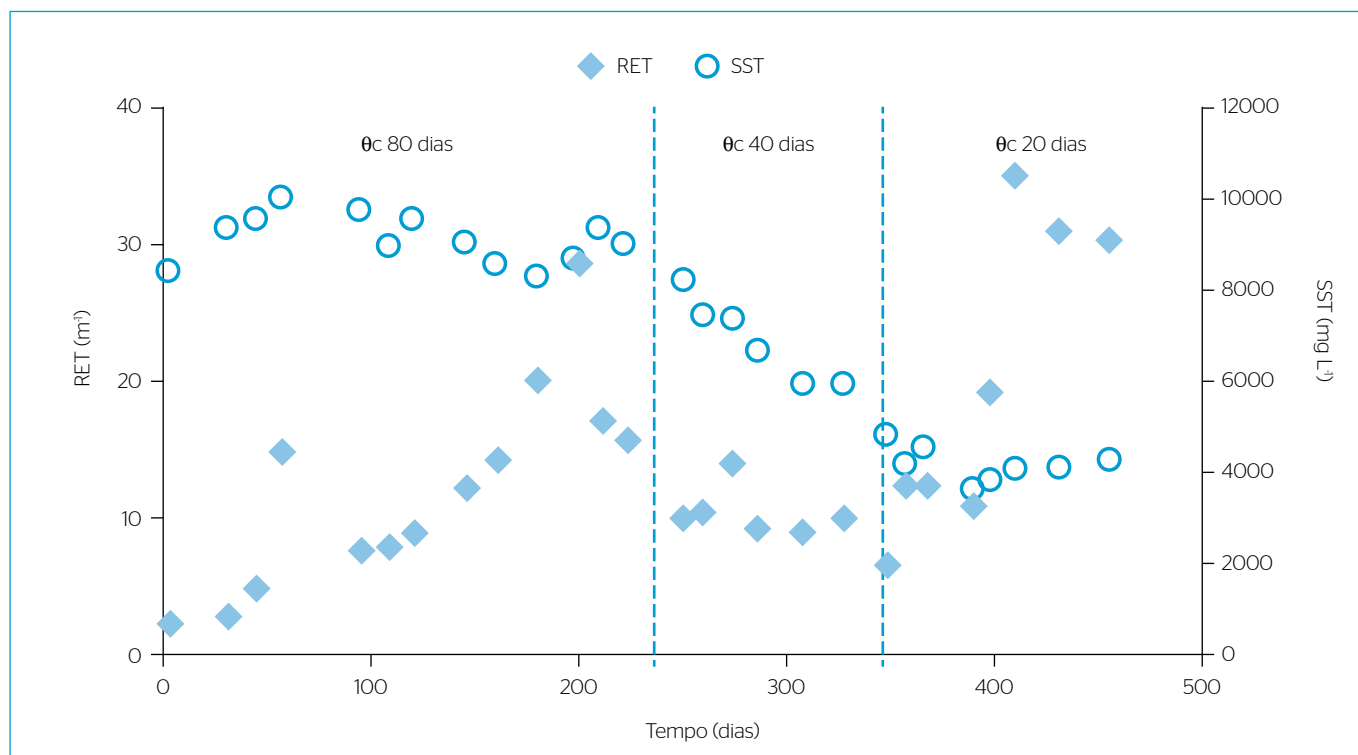


Figura 9 - Distribuição temporal dos valores da resistência específica da torta e respectivos teores de sólidos suspensos totais no licor misto do reator.

em questão. Por outro lado, tais ensaios mostraram melhoria da filtrabilidade do licor misto sob a aplicação da θ_c de 40 dias. Por fim, observou-se para o período com θ_c de 20 dias nova deterioração da filtrabilidade, reforçando, assim, os resultados observados no BRM quanto à VC das membranas.

De maneira geral, os resultados obtidos sugerem que a aplicação da θ_c de 40 dias resultou em licor misto com menor potencial

incrustante, seja considerando os sólidos em suspensão ou o seu sobrenadante.

FONTE DE FINANCIAMENTO

Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- AHMED, Z.; CHO, J.; LIM, B-R.; SONG, K-G.; AHN, K.-H. (2007) Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, v. 287, n. 2, p. 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.10.036>
- AMANN, R.I.; KRUMHOLZ, L.; STAHL, D.A. (1990) Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology. *Journal of Bacteriology*, v. 172, n. 2, p. 762-770. <http://dx.doi.org/10.1128/jb.172.2.762-770.1990>
- BELLI, T.J.; AMARAL, P.A.P.; RECIO, M.A.L.; VIDAL, C.M.S.; LAPOLLI, F.R. (2012) Biorreator à membrana em batelada sequencial aplicado ao tratamento de esgoto visando à remoção de nutrientes. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 143-154. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000200003>
- DELGADO, F.; DÍAZ, R.; VILLARROEL, L.; VERA, R.; DÍAZ, S.E.; ELMALEH, S. (2002) Nitrification in a hollow-fibre membrane bioreactor. *Desalination*, v. 146, n. 1-3, p. 445-449. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00540-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00540-4)
- DREWS, A. (2010) Membrane fouling in membrane bioreactors - Characterization, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, v. 363, n. 1-2, p. 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.06.046>
- DREWS, A.; LEE, C.H.; KRAUME, M. (2006) Membrane fouling - a review on the role of EPS. *Desalination*, v. 200, n. 1-3, p. 186-188. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.290>
- DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, P. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, v. 28, n. 3, p. 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- GRELIER, P.; ROSENBERGER, S.; TAZI-PAIN, A. (2006) Influence of sludge retention time on membrane bioreactor hydraulic performance. *Desalination*, v. 192, n. 1-3, p. 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.131>
- HAN, S.S.; BAE, T.H.; JANG, G.G.; TAK, T.M. (2005) Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system. *Process Biochemistry*, v. 40, n. 7, p. 2393-2400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2004.09.017>
- HARPER, W.F.; BERNHARDT, M.; NEWFIELD, C. (2006) Membrane bioreactor biomass characteristics and microbial yield at very low mean cell residence time. *Water SA*, v. 32, n. 2, p. 193-198. <http://dx.doi.org/10.4314/wsav32i2.5259>
- IVANOVIC, I.; LEIKNES, T. (2008) Impact of aeration rates on particle colloidal fraction in the biofilm membrane bioreactor (BF-MBR). *Desalination*, v. 231, p. 182-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.11.046>
- JUDD, S. (2006) *The MBR Book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Oxford: Elsevier.
- LE-CLECH, P.; CHEN, V.; FANE, A.G.T. (2006) Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, v. 284, n. 1-2, p. 17-53. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.08.019>
- LEE, W.; KANG, S.; SHIN, H. (2003) Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, v. 216, n. 1-2, p. 217-227. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00073-5)
- LIN, H.; ZHANG, M.; WANG, F.; MENG, 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*, v. 460, p. 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.034>
- LIU, Y.; LIU, Q.S. (2006) Causes and control of filamentous growth in aerobic granular sludge sequencing batch reactors. *Biotechnology Advances*, v. 24, n. 1, p. 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.08.001>
- LOWRY, O.H.; ROSENBOUGH, N.J.; FARR, R.L.; RANDAL, R.J. (1951) Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, v. 193, n. 1, p. 265-275.
- MASSÉ, A.; SPÉRANDIO, M.; CABASSUD, C. (2006) Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time. *Water Research*, v. 40, n. 12, p. 2405-2415. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.04.015>

- MELIN, T.; JEFFERSON, B.; BIXIO, D.; THOEYE, C.; DE WILDE, W.; DE KONING, J.; VAN DER GRAAF, J.; WINTGENS, T. (2006) Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, v. 187, n. 1-3, p. 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*, v. 43, n. 6, p. 1489-1512. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- MENG, F.; ZHANG, H.; YANG, F.; LI, Y.; XIAO, J.; ZHANG, X. (2006) Effect of filamentous bacteria on membrane fouling in submerged membrane reactor. *Journal of Membrane Science*, v. 272, n. 1, p. 161-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2005.07.041>
- OUYANG, K.; LIU, J. (2009) Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor. *Journal of Environmental Sciences*, v. 21, n. 10, p. 1329-1335. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62422-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62422-5)
- POLLICE, A.; BROOKES, A.; JEFFERSON, B.; JUDD, S. (2005) Sub-critical flux fouling in membrane bioreactors - a review of recent literature. *Desalination*, v. 174, n. 3, p. 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.09.012>
- POLLICE, A.; LAERA G.; SATURNO, D.; GIORDANO, C. (2008) Effects of sludge retention time on the performance of a membrane bioreactor treating municipal sewage. *Journal of Membrane Science*, v. 317, n. 1-2, p. 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.08.051>
- RAHIMI, Y.; TORABIAN, A.; MEHRDADI, N.; HABIBI-REZAIE, M.; PEZESHK, H.; NABI-BIDHENDI, G.R. (2011) Optimizing aeration rates for minimizing membrane fouling and its effect on sludge characteristics in a moving bed membrane bioreactor. *Journal of Hazardous Materials*, v. 186, n. 2-3, p. 1097-1102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.117>
- SABIA, G.; FERRARIS, M.; SPAGNI, A. (2013) Effect of solid retention time on sludge filterability and biomass activity: Long-term experiment on a pilot-scale membrane bioreactor treating municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, v. 221, p. 176-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.094>
- SPONZA, D.T. (2003) Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 32, n. 3-4, p. 375-385. [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0229\(02\)00309-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0229(02)00309-5)
- VAN DEN BROECK, R.; VAN DIERDONCK, J.; NIJSKENS, P.; DOTREMONT, C.; KRZEMINSKI, P.; VAN DER GRAAF, J.H.J.M.; VAN LIER, J.; VAN IMPE, J.F.M.; SMETS, I. (2012) The influence of solids retention time on activated sludge bioflocculation and membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR). *Journal of Membrane Science*, v. 401-402, p. 48-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.01.028>
- WANG, X.M.; LI, X.Y.; HUANG, X. (2007) Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (SMBR): Characterisation of the sludge cake and its high filtration resistance. *Sep. Purif. Technol.*, v. 52, n. 3, p. 439-445. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.05.025>
- WU, B.; YI, S.; FANE, A.G. (2011) Microbial behaviors involved in cake fouling in membrane bioreactors under different solids retention times. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 3, p. 2511-2516. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.045>
- ZHANG, H.F.; SUN, B.S.; ZHAO, X.H.; GAO, Z.H. (2008) Effect of ferric chloride on fouling in membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*, v. 63, n. 2, p. 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.05.024>