

II-391 - AVALIAÇÃO EM ESCALA PILOTO DE BIORREATOR COM MEMBRANAS CONJUGADO COM NANOFILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

Wagner Guadagnin Moravia⁽¹⁾

Engenheiro Civil, Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Míriam Cristina Santos Amaral⁽²⁾

Engenheira Química, Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Profª. Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Liséte Celina Lange⁽³⁾

Química, Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Londres - Inglaterra, Profª. Associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Túlio Luís dos Santos⁽⁴⁾

Graduando em Química Tecnológica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG), Bolsista de Iniciação Científica no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Nátalie Cristine Magalhães⁽⁵⁾

Engenharia Química, Mestranda no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Av. Antônio Carlos, 6627 / 4º andar / Sala 4402 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31.270-901 - Brasil - Tel: (31)3409-1714 - e-mail: moravia@desa.ufmg.br

RESUMO

O tratamento de lixiviado de aterro sanitário apresenta-se como desafio, principalmente, devido a elevada concentração de matéria orgânica refratária, amônia, compostos poluentes/tóxicos orgânicos e inorgânicos, além de elevados valores de pH e cor, somado ainda, à alta variação do volume gerado. Os sistemas de tratamento usuais para este efluente, quando aplicados de forma isolada, têm se mostrado insuficientes para atender a legislação pertinente. Os biorreatores com membranas (BRM) têm sido considerados um dos métodos mais promissores para o tratamento de lixiviados de aterro sanitário, sendo que quando conjugados com o processo de nanofiltração como polimento do efluente do BRM, permite uma maior eficiência na remoção de poluentes. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar, em escala de piloto, o processo de biorreator com membranas conjugado com nanofiltração no tratamento de lixiviado de aterro sanitário visando o enquadramento do efluente segundo a legislação e o reúso da água. Os resultados mostraram uma eficiência de 17, 40, 47 e 33% para o BRM, aumentada para 99, 67, 66 e 73% quando conjugado com a NF, respectivamente para cor real, DQO total, N-NH₃ e ST.

PALAVRAS-CHAVE: Biorreator com membranas, Nanofiltração, Lixiviado de aterro sanitário.

INTRODUÇÃO

O tratamento de lixiviado de aterro sanitário apresenta-se como desafio, principalmente, devido a elevada concentração de matéria orgânica refratária, amônia, compostos poluentes/tóxicos orgânicos e inorgânicos, além de elevados valores de pH e cor, somado ainda, à alta variação do volume gerado. Os sistemas mais usuais empregados no tratamento deste efluente, principalmente em função do baixo custo e simplicidade operacional, são os fundamentados em processos biológicos. Entretanto, quando aplicados de forma isolada, estas técnicas convencionais têm se mostrado insuficientes para o enquadramento do efluente segundo a legislação pertinente (KURNIAWAN *et al.*, 2010). Desta forma, tem se levado em conta a opção por tratamentos conjugados a fim de aumentar a tratabilidade do lixiviado (RENOU *et al.*, 2008).

Os biorreatores com membranas (BRM), que consistem da associação de reatores biológicos com os processos de separação por membranas (micro ou ultrafiltração), têm sido considerados um dos métodos mais promissores para o tratamento de lixiviados de aterro sanitário. São sistemas compactos e modulares que podem operar com elevada concentração de biomassa e idade do lodo, uma vez que a membrana proporciona a retenção total das células microbianas no biorreator, resultando em um sistema de degradação biológica mais eficaz. A conjugação da nanofiltração como polimento de efluente do BRM permite uma maior eficiência na remoção de poluentes. Estudos mostram que a NF é um sistema eficaz para o tratamento secundário ou terciário de efluentes visando à geração de água para reúso industrial, agrícola e/ou potável indireto (SHU *et al.*, 2005; ACERO *et al.*, 2010; JACOB *et al.*, 2010).

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar, em escala piloto, o processo de biorreator com membranas conjugado com nanofiltração no tratamento de lixiviado de aterro sanitário visando o enquadramento do efluente segundo a legislação e o reúso da água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem e caracterização físico-química do lixiviado bruto e pós-tratado

As amostras de caracterização do lixiviado bruto e pós-tratado são provenientes da unidade piloto implantada na Central de Tratamento de Resíduos Macaúbas (CTR-Macaúbas) na cidade de Sabará / MG – Brasil. Está implantada numa área rural de 83,5 ha, tem capacidade operacional diária de 2.400 t de resíduos, gera em média 20 m³/h de lixiviado e atende os municípios de Belo Horizonte, Sabará, Caeté, Nova Lima, Pedro Leopoldo, Moeda, Ibitité, Capim Branco, Matozinhos e Confins. Os parâmetros físico-químicos contemplados neste estudo são: cor real e aparente, DBO₅, DQO total, COT, pH, alcalinidade, série sólidos, nitrogênio total e amoniacal, fósforo total e cloretos. As análises foram realizadas em conformidade com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Unidade experimental em escala piloto

A unidade experimental em escala piloto de BRM/MF-NF é constituída de reator de arraste de amônia (*air stripping*) por aeração (bolhas grossas), reator biológico aeróbio por insuflação de ar (bolhas finas), tanque de membranas externo com módulos de membrana tipo fibra oca de MF (membrana de poli(éter-imida) com diâmetro de corte da membrana na faixa de 0,1 - 0,4 µm e área efetiva de filtração igual a 14 m²), pontos de coleta de permeado, unidade de controle do processo de MF com suporte a retrolavagem, bombas de circulação e permeação, manômetros, rotâmetros (alimentação e permeado), tanque de acúmulo de permeado da MF, unidade de controle de NF, módulos de membrana tipo espiral de NF (retenção de 90% de sais estabilizados e área efetiva de filtração igual a 2,6 m²). A capacidade máxima de tratamento da estação é de 3 m³/h, os reatores e tanque de acúmulo possuem volume máximo de 10 m³, sendo que o TDH do tanque de arraste e do BRM podem variar entre 24 a 48 h. A Figura 1 apresenta o protocolo esquemático do sistema.

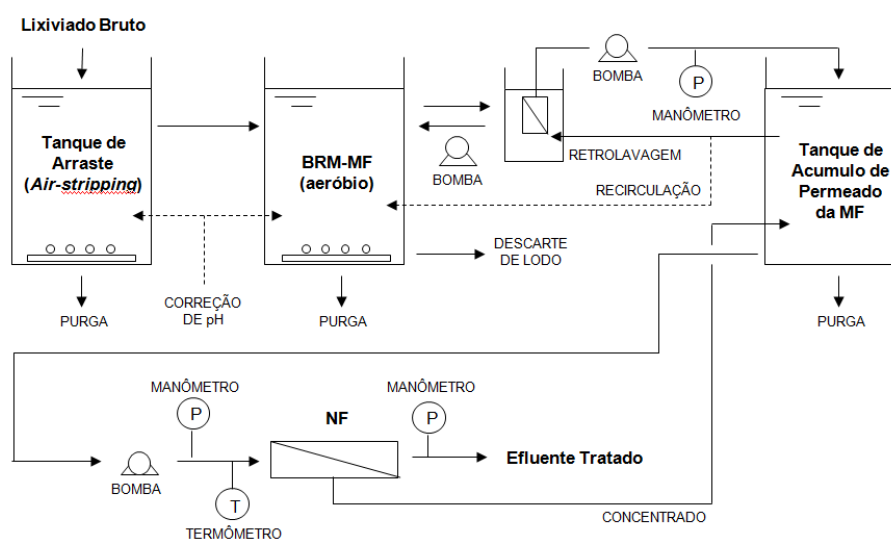


Figura 1: Protocolo esquemático do sistema.

Operação da unidade piloto

a) Partida do BRM/MF

A partida do sistema foi avaliada em função da estabilização, após inoculação, da concentração de biomassa considerada ativa no reator biológico do BRM/MF e respectiva eficiência de remoção de DQO. A inoculação foi realizada com lodo de reatores de lodos ativados da ETE Arrudas/COPASA – Belo Horizonte/MG. A periodicidade das amostragens ocorreu a cada 2 dias.

b) Parâmetros operacionais do BRM/MF-NF

A pressão de operação foi avaliada através da determinação da pressão crítica pelo método de *Flux-Step* (Bacchin *et al.* 2006). O TDH adotado do BRM/MF foi o necessário para uma remoção de DQO > 40%. A velocidade de escoamento, quando pertinente (processo de NF), foi adotada como a máxima obedecendo às limitações da unidade experimental. Os ensaios foram realizados com o efluente em temperatura ambiente. Após a incrustação da membrana, indicada quando a pressão negativa de operação (vácuo) alcançava valores próximos à 0,8 bar os módulos de membranas eram submetidos aos processos de limpeza de recuperação.

Avaliação do protocolo de limpeza da membrana MF

Para a avaliação de cada protocolo de limpeza, as membranas incrustadas eram submetidas à limpeza de recuperação com diferentes conjugações de agentes químicos, concentrações e tempo de limpeza. Os resultados foram quantificados em função do percentual de recuperação da permeabilidade hidráulica da membrana recuperada comparada com a da membrana nova. O ensaio de permeabilidade hidráulica consistiu, após a compactação das membranas, da aplicação de pressão decrescente nas membranas operadas com água microfiltrada. Os valores obtidos para o fluxo de permeado foram representados em função da pressão aplicada, onde o coeficiente angular da reta ajustada aos pontos experimentais corresponde à permeabilidade hidráulica (L/h.m².bar). Os agentes de limpeza avaliados foram: percarbonato de sódio (2Na₂CO₃.3H₂O₂) - 500 mg.L⁻¹, hipoclorito de sódio (NaClO - solução 10%) - 500 mg.L⁻¹, ácido cítrico - pH 3.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Operação da unidade piloto

a) Partida do BRM/MF

A Figura 2 apresenta a evolução da concentração de sólidos suspensos dentro do reator biológico do BRM (lodo) a partida da unidade piloto e a respectiva eficiência de DQO do BRM. A concentração de SSV pode ser associada à biomassa responsável pela degradação de compostos orgânicos. Este resultado é o principal parâmetro indicativo de sucesso da partida e estabilização do sistema, pois a estabilização da concentração de SSV sugere que os microrganismos superaram a aclimação e se encontram em equilíbrio dentro do BRM.

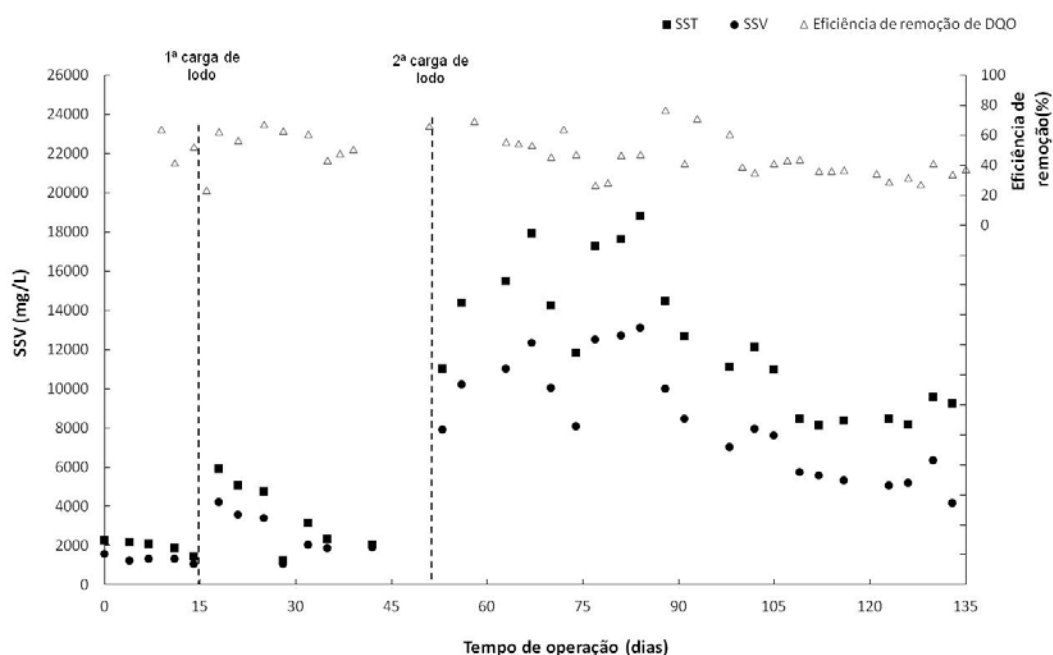


Figura 2: Concentração de biomassa no BRM versus eficiência de remoção de DQO total.

Observa-se na Figura 2 uma concentração estabilizada de SSV na faixa de 5.000 e 7.000 mg/L respectivamente após a 2ª carga de lodo (50 dias de operação). Para biorreatores com membranas aplicados no tratamento de efluentes municipais, a concentração de SST em referência situa-se na faixa entre 7.000 a 10.000 mg/L (ISA, 2003). A queda na concentração de SSV no início dos aportes de lodo está relacionada com a mortandade destes microrganismos durante a aclimação no novo meio.

b) Operação do BRM/MF-NF

A Figura 2 e 3 apresenta as condições operacionais, respectivamente, para os processos de MF e NF.

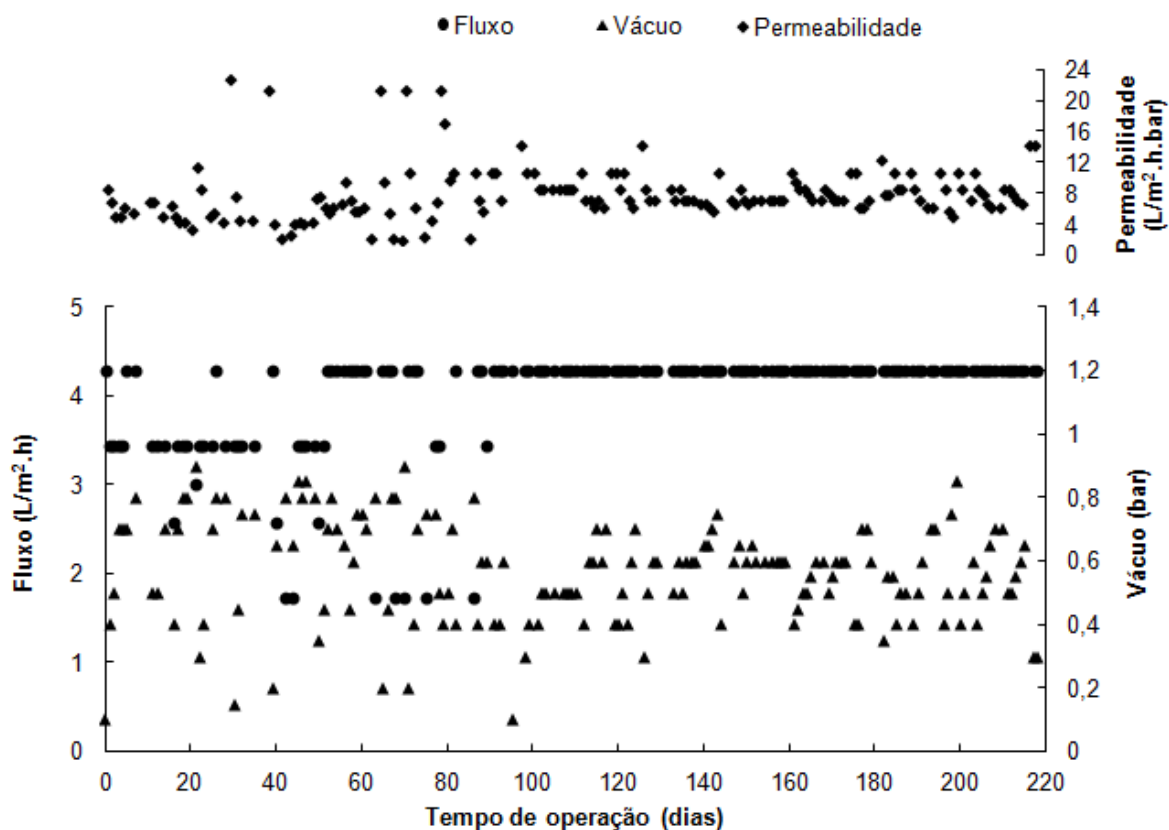


Figura 3: Condições operacionais da etapa de MF.

Em relação à unidade de BRM/MF, a pressão negativa (vácuo) de operação apresentou variação entre 0,2 a 0,8 bar. Este processo apresentou valores de permeabilidade operacional entre de 4 a 10 L/m².h.bar. Observou-se a necessidade semanal de limpeza de manutenção das membranas de MF e de recuperação com frequência bimestral. Em relação à unidade de NF, a pressão de operação apresentou variação entre 7,5 a 11,0 bar. Este processo apresentou valores de permeabilidade operacional entre de 0,6 a 0,9 L/m².h.bar. A frequência de limpeza de manutenção da membrana de NF foi de 14 dias. Não foi observada a necessidade de limpeza de recuperação da membrana de NF durante o período de operação da unidade piloto. Esses dados mostram que o processo de NF possui cerca de 10% da produtividade processo de MF do BRM para esta aplicação, parâmetro este que deve ser levado em conta no dimensionamento da área de membranas quando envolvido a conjugação destas etapas em aplicações similares.

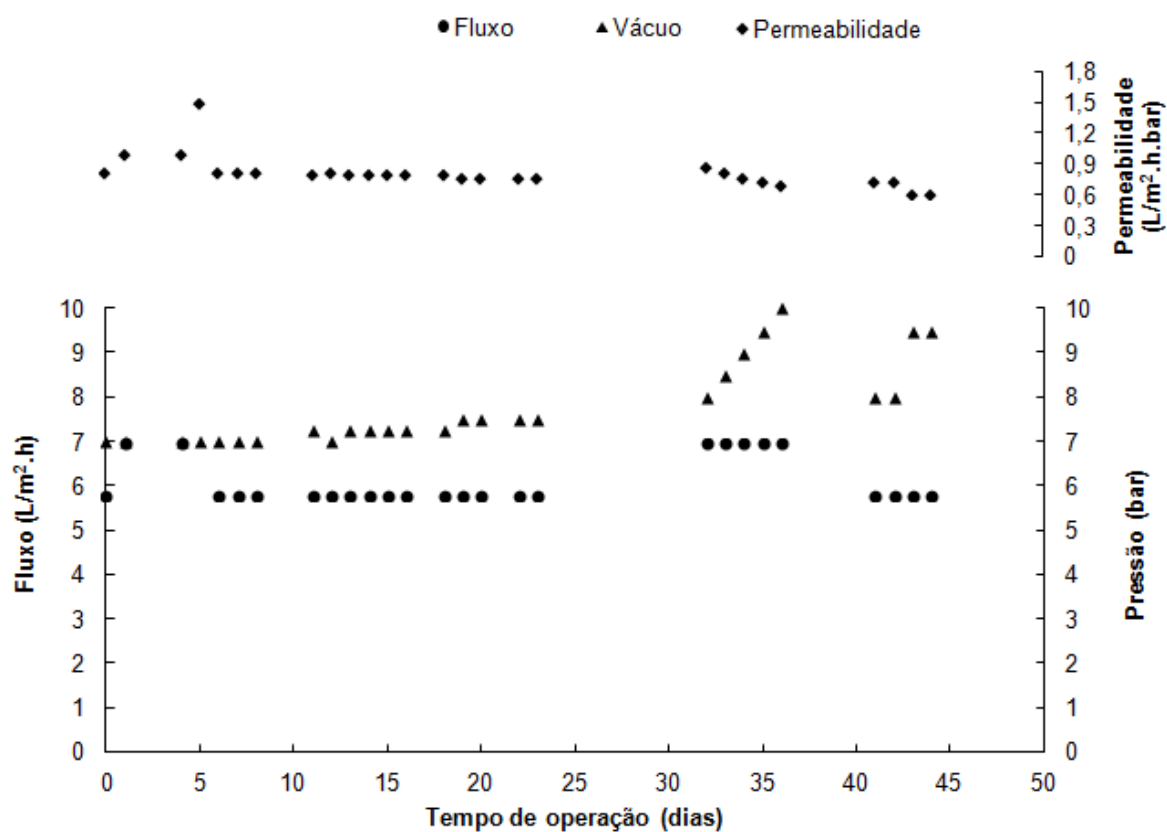


Figura 4: Condições operacionais da etapa de NF.

Avaliação do protocolo de limpeza de manutenção da MF

a) Membranas de MF

A Figura 5 apresenta a avaliação dos agentes de limpeza de recuperação da membrana de MF.

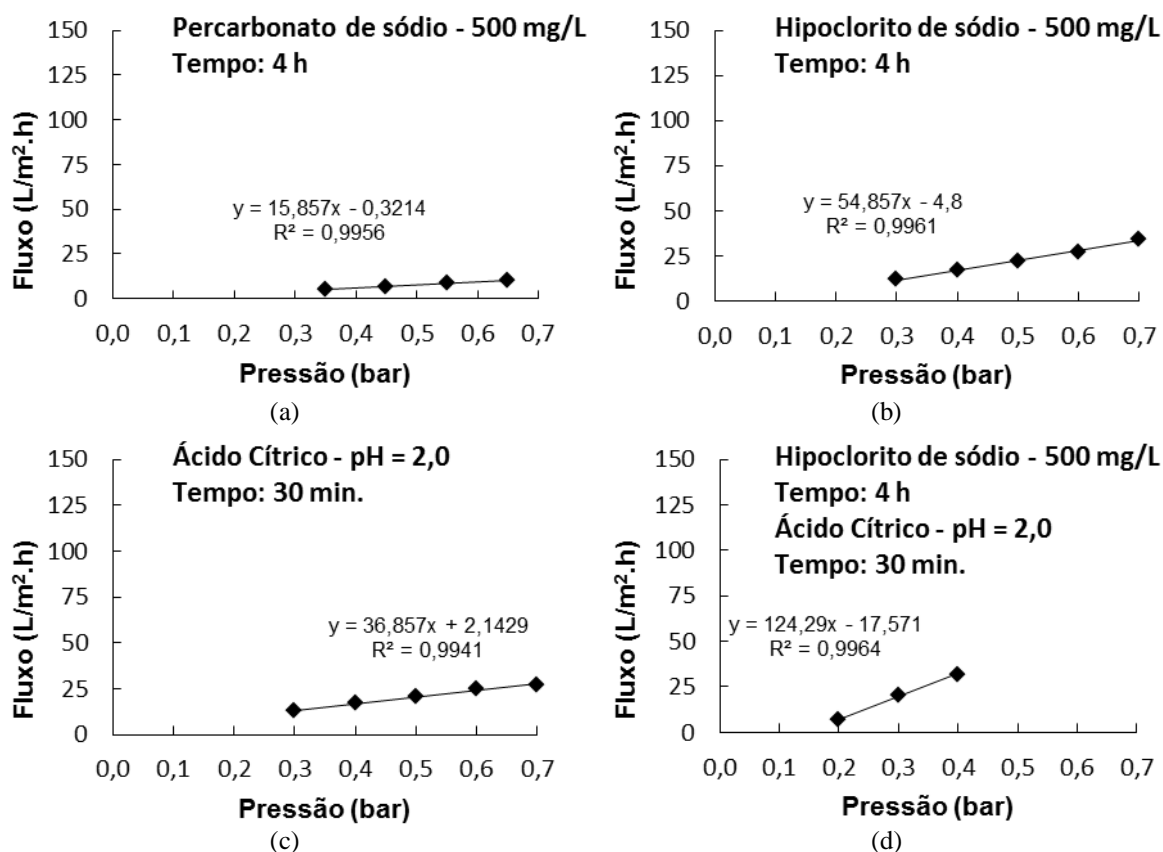


Figura 5: Avaliação do protocolo de limpeza de recuperação das membranas de MF.

Os testes de limpeza da membrana de MF foram realizados com 4 módulos de membrana de MF com área total de membranas de 14,0 m². Como valor de referência, o valor obtido da permeabilidade hidráulica das membranas de MF novas foi cerca de 150 L/m².h.bar. Os resultados mostraram que o percarbonato de sódio, na concentração de 500 mg/L aplicado durante 4 h, não foi muito eficiente na limpeza de recuperação das membranas de MF. O emprego do hipoclorito de sódio nas mesmas condições permitiu valores de permeabilidade acima dos 50 L/m².h.bar. Diante destes resultados foi avaliado a conjugação do hipoclorito de sódio (500 mg/L / 4 h) com o ácido cítrico (pH = 2,0 / 30 min.). Esta conjugação permitiu uma recuperação da permeabilidade hidráulica em torno de 80% (120 L/m².h.bar).

b) Membranas de NF

A Figura 6 apresenta a avaliação dos agentes de limpeza de recuperação da membrana de NF.

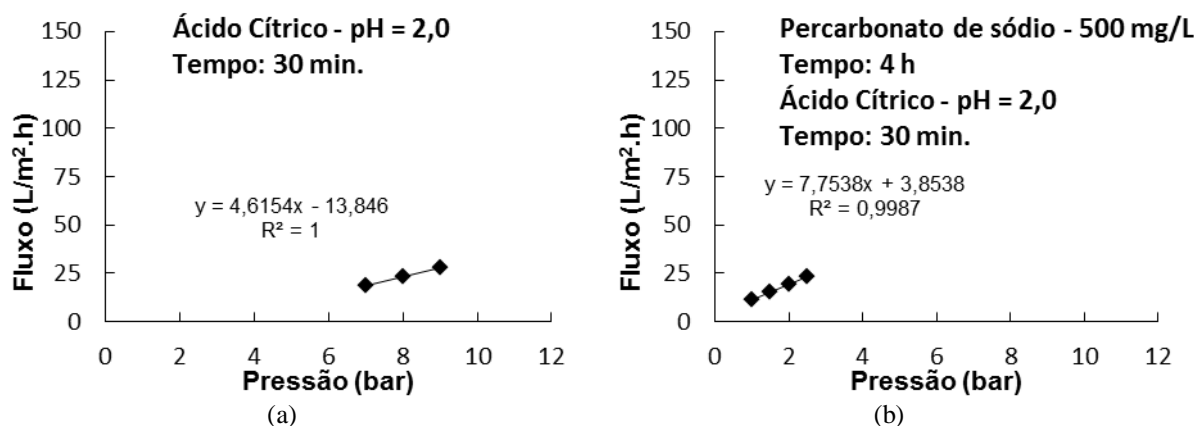


Figura 6: Avaliação do protocolo de limpeza de recuperação das membranas de NF.

Os testes de limpeza da membrana de NF foram realizados, de forma análoga ao processo de MF, porém com um único módulo de membrana de NF com respectiva área de membranas de 2,6 m². O resultado obtido do teste de permeabilidade hidráulica da membrana de NF nova foi de 7,9 L/m².h.bar. Os resultados mostraram que tanto o percarbonato de sódio (3,1 L/m².h.bar) quando o hipoclorito de sódio (3,2 L/m².h.bar), na concentração de 500 mg/L, aplicado durante 4 h, não foram eficientes na limpeza de recuperação da membrana, sugerindo que a incrustação inorgânica seja a principal contribuinte pela incrustação da membrana. Observa-se que o hipoclorito de sódio é agressivo ao tipo de material constituinte da membrana de NF (poliamida) e foi avaliado para efeito comparativo. Diante disto, foi avaliado o ácido cítrico (pH = 2,0 / 30 min.) empregado de forma isolada e a conjugação do percarbonato de sódio (500 mg/L / 4 h) com o ácido cítrico. Os resultados da conjugação destes agentes de limpeza foram satisfatórios, onde o valor do teste de permeabilidade hidráulica foi acima de 7,7 L/m².h.bar (99% de recuperação).

Avaliação do tratamento em ciclo completo

A Figura 7 ilustra o aspecto das amostras do lixiviado bruto e efluentes para cada etapa do tratamento.

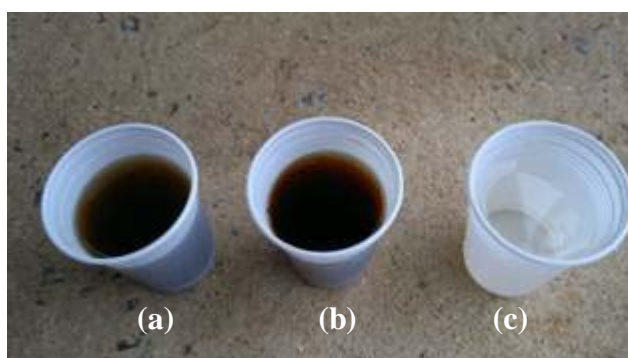


Figura 7: Aspecto das amostras para cada etapa do tratamento: (a) Lixiviado bruto; (b) Permeado pós-BRM/MF; (c) Permeado pós-NF (Efluente tratado).

A amostra de lixiviado bruto apresentou aspecto opaco, de cor parda escura e odor intenso, sugerindo altas concentrações de substâncias húmicas, orgânicos solúveis e nitrogênio amoniacal. O efluente pós-BRM apresentou aspecto inodoro e cristalino, porém ainda com cor intensa. A ausência de odor dessa amostra indica a elevada eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal por parte do reator de arraste. Ressalta-se que apesar da alta eficiência de remoção de amônia (> 90%), as concentrações no efluente tratado ainda não estão de acordo com a legislação (20,0 mg/L). Este parâmetro pode ser enquadrado com a implementação a correção de pH no processo de *air stripping*. A NF foi eficaz na remoção de cor e polimento do efluente tratado com foco no reuso da água. Na Tabela 1 são apresentados os resultados médios e respectivos desvios dos parâmetros físico-químicos para cada amostra respectiva a cada etapa do tratamento em ciclo completo

Tabela 1: Caracterização das amostras de lixiviado bruto, pós-air stripping, pós-BRM/MF e pós-NF.

Parâmetros Físico-Químicos	Unidade	Lixiviado bruto		Pós-air stripping		Pós-BRM/MF		Pós-NF		Padrão*
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	
Cor real	uH	1.506	848	873	290	729	327	6	6	-
Cor aparente	uH	2.086	1.655	1.423	577	729	327	6	6	-
DQO total	mg/L	3.942	1.018	4.214	903	2.527	977	484	237	180 / 55%
DBO ₅	mg/L	243	158	-	-	227	162	75	37	60 / 60%
DBO/DQO	mg/L	0,06	0,06	-	-	0,13	0,11	0,15	0,07	-
COT	mg/L	873	453	-	-	709	236	19	9	-
pH	-	8,46	0,30	7,79	1,29	7,35	1,22	7,73	1,56	6,0 - 9,0
Nitrogênio Total	mg/L	2.163	495	-	-	1131	567	736	255	-
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	1.529	270	578	350	282	184	137	39	20,0
Condutividade	mg/L	25	2	16	3	13	4	6	2	-
Alcalinidade	mg/L	8.032	1.296	-	-	1.110	1.577	192	219	-
Cloretos	mg/L	2.749	233	-	-	1.930	711	524	242	-
Fósforo	mg/L	32,8	7,7	-	-	18,2	5,2	2,4	1,8	-
ST	g/L	10,3	0,5	-	-	6,9	1,6	2,8	1,1	-
STF	g/L	7,7	0,3	-	-	5,1	1,2	2,5	1,1	-
STV	g/L	2,6	0,3	-	-	1,8	0,5	0,3	0,2	-
SST	mg/L	62,2	48,5	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
SSF	mg/L	31,2	42,9	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-
SSV	mg/L	34,9	28,1	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-

* Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N^o. 1, de 05 de Maio de 2008.

ST-Sólidos Totais, STF-Sólidos Totais Fixos, STV-Sólidos Totais Voláteis, SST-Sólidos Suspensos Totais, SSF-Sólidos Suspensos Fixos, SSV-Sólidos Suspensos Voláteis

Notou-se uma eficiência de remoção de cor real próxima a 17% na etapa do BRM, mostrando a ação conjunta do tanque biológico (atua em sólidos solúveis) e das membranas de MF (atua em sólidos suspensos presentes no lixiviado bruto e o lodo propriamente dito). A etapa de NF foi eficaz na remoção deste parâmetro, com eficiência média relativa acima de 99%.

O BRM apresentou eficiência média de remoção de DQO solúvel em torno de 40% durante a sua operação. O processo de NF se mostrou bastante eficaz, com eficiência média em torno de 67%, capaz de enquadrar o efluente tratado neste parâmetro. Embora a eficiência de remoção de DQO no BRM seja relativamente baixa ao emprego do mesmo é extremamente importante para viabilizar o processo uma vez que o BRM atua como pré-tratamento da NF, proporcionando maior eficiência de remoção de matéria orgânica e menor incrustação. De acordo com os resultados, na forma em que foi operado, ou seja, sem a correção de pH na etapa de air-stripping, o sistema foi capaz de remover cerca de 90% de nitrogênio amoniacal. A eficiência é atribuída principalmente à etapa de air-stripping (75%) e complementada pela NF. A contribuição do BRM para este parâmetro está relacionada com o processo de nitrificação (conversão de N-NH₃ em nitritos e nitratos). O efluente tratado ainda apresenta um concentração de N-NH₃ próximas de 140 mg/L, o que dista significativamente do padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela legislação vigente para este parâmetro, que é de 20 mg/L.

A remoção de ST foi mais intensa na etapa de NF, se obteve uma eficiência de 33% para o BRM, aumentada para 73% quando conjugado com a etapa de NF, respectivamente.

CONCLUSÕES

A íntegra das etapas propostas foi suficiente para enquadrar, com exceção do nitrogênio, todos os parâmetros avaliados segundo a legislação vigente (Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n^o 1, de 05 de maio de 2008). Apesar das concentrações de nitrogênio estarem acima dos limites (20 mg/L), a remoção deste poluente foi bastante expressiva (~ 93%). Ressalta-se que estes ensaios não contemplaram o efeito da correção

de pH nas etapa de remoção de nitrogênio amoniacal (*air-stripping*) e no BRM/MF, sendo realizados com o pH *in natura* do lixiviado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fapemig (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais), ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro e ao DESA-UFMG pelo incentivo e apoio ao projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACERO, J. L.; BENITEZ, F. L.; LEAL, A. I.; REAL, F. J.; TEVA F. Membrane filtration technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 390-398, 2010.
2. APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition. American Public Health Association, Washington, DC, 2005.
3. BACCHIN P., AIMAR P. AND FIELD R. W. Critical and sustainable fluxes: theory, experiments and applications. *Journal of Membrane Science*, 15, 42-69, 2006.
4. ISA Institute of Environmental Engineering of the RWTH - Aachen University. Membrane Technology for Waste Water Treatment. German Edition. ISBN 3-939377-01-5/ ISBN 978-3-939377-01-6, 346 p., 2003.
5. JACOB, M.; GUIGUI, C.; CABASSUD, C.; DARRAS, H.; LAVISON, G.; MOULIN, L. Performances of RO and NF processes for wastewater reuse: Tertiary treatment after a conventional activated sludge or a membrane bioreactor. *Desalination*, 250, 833-839, 2010.
6. KURNIAWAN, T. A.; LO, W.; CHAN, G.; SILLANPAA, M. E. T. Biological process for treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 2032-2047, 2010.
7. Renou, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 468-493, 2008.
8. SHU, L.; WAITE, P. J.; BLISS, T. D.; FANE, A; JEGATHEESAN V. Nanofiltration for the possible reuse of water and recovery of sodium chloride salt from textile effluent. *Desalination*, 172, 235-243, 2005.