

II-1452 - ESTUDO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO NO DESEMPENHO DE MÓDULOS DE NANOFILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRA SANITÁRIO.

Yuri Gomes Leite e Silva⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ/UFRJ). Mestrando em Processos de Separação por Membranas pelo Programa de Engenharia Química da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQ/COPPE/UFRJ). Engenheiro de Projetos da PAM Membranas Seletivas.

Igor Amorim Leite Pereira⁽²⁾

Graduando em Engenharia Química pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ/UFRJ).

Cristiano Piacsek Borges⁽³⁾

Professor do Programa de Engenharia Química da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, D.Sc. em Engenharia Química.

Dilson da Costa Maia Filho⁽⁴⁾

D.Sc. em Engenharia Química pelo Programa de Engenharia Química da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQ/COPPE/UFRJ). Gerente de Projetos da PAM Membranas Seletivas.

Endereço⁽¹⁾: Rua Formosa do Zumbí, 542 – Ilha do Governador – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21930-220 - Brasil - Tel: (21) 96844-5318 - e-mail: yuri@peq.coppe.ufrj.br

RESUMO

O tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário tem sido um grande desafio devido a sua complexidade e pela variabilidade de sua composição. As legislações cada vez mais rigorosas impulsionaram a busca por novos processos de tratamento como alternativa ou complemento aos processos convencionais já existentes. Entre esses processos, destacam-se os Processos de Separação por Membranas, mais especificamente Microfiltration, Nanofiltration e Osmose Inversa, sendo capazes de remover grande parte dos poluentes. A tecnologia NF oferece uma abordagem versátil para atender a vários objetivos de qualidade de água e efluentes, como controle de contaminantes orgânicos, inorgânicos e microbianos, além de alta taxa de rejeição de íons polivalentes e de matéria orgânica dissolvida, sendo utilizado para as mais diversas áreas de aplicação, dentre elas, o tratamento de lixiviado. Devido a alta carga de contaminantes presentes, a utilização de processos de filtração por membranas para seu tratamento é um grande desafio, levando a uma queda do fluxo de permeado ao longo da operação. Este fenômeno está relacionado a polarização da concentração e a deposição de diferentes espécies na superfície e nos poros das membranas, denominado de incrustações ou “fouling”. Estes podem limitar a competitividade do processo, aumentando os custos com energia, mão de obra adicional para manutenção e limpeza química excessiva. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo estudar os efeitos da utilização do escoamento bifásico em módulos de NF em espiral, por meio da adição de ar comprimido, no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Sendo avaliada a influência da vazão de ar aplicada e a realização de flush periódicos com e sem injeção de ar como estratégia para manutenção do fluxo de permeado ao longo do processo e potencial redução da frequência de limpeza química. Os testes realizados utilizando injeção de ar contínua durante a operação indicaram um aumento do fluxo instantâneo ao longo do processo, resultando também em um aumento médio de 13% e 15% da produtividade, com velocidades de escoamento de ar de 0,25 m/s e 0,50 m/s, respectivamente. A realização de flushes periódicos se mostrou bastante efetiva, sendo estes incrementados pelo escoamento bifásico para os casos em que a água e o lixiviado bruto foram utilizados como solução de flush, alcançando ganhos na produtividade superiores aos observados na injeção contínua de ar. O fato do flush ser realizado em baixa pressão, leva a um baixo custo de geração de ar, podendo-se utilizar dispositivos mecânicos encontrados no mercado.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento Bifásico, Nanofiltration, Lixiviado, Tratamento.

INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) vem aumentando significativamente a cada ano, estando relacionada ao aumento do consumo, avanço da urbanização e do inevitável crescimento populacional. O avanço da COVID-19 vêm intensificando ainda mais a geração de resíduos, resultado de um aumento na procura por compras online, além do “boom” de materiais de proteção individual contra a doença.

Existem diversas formas de tratamento de RSU, sendo a disposição em aterros sanitários a mais aplicada. Um dos maiores problemas decorrentes da utilização desta técnica é a geração de um subproduto líquido denominado lixiviado, resultado da umidade natural e da degradação da fração orgânica dos resíduos aterrados, além da percolação de água da chuva pelas células do aterro.

O tratamento de lixiviado tem sido um grande desafio devido a sua alta complexidade e variabilidade de sua composição. As legislações cada vez mais rigorosas impulsionaram a busca por novos processos de tratamento como alternativa ou complemento aos processos convencionais já existentes. Entre esses processos, destacam-se os Processos de Separação por Membranas, mais especificamente Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI).

A NF é um processo de separação por membranas que utiliza a pressão como força motriz, considerado intermediário aos processos de UF e OI. Em comparação a estes dois processos, a NF tem como vantagem a utilização de pressões de operação menores e fluxos maiores em relação aos processos de OI, apesar da baixa retenção de íons monovalentes, e maior grau de retenção em relação aos processos de UF. Pode-se dizer que este processo consiste no limite entre a UF e a OI quanto a natureza mista da morfologia da membrana.

A tecnologia NF oferece uma abordagem versátil para atender a vários objetivos de qualidade de água e efluentes, como controle de contaminantes orgânicos, inorgânicos e microbianos, além de alta taxa de rejeição de íons polivalentes e de matéria orgânica dissolvida, sendo utilizado para as mais diversas áreas de aplicação, dentre elas, o tratamento de lixiviado.

Embora os processos de separação por membranas sejam bastante eficientes para o tratamento de lixiviado, principalmente quando associados a outras tecnologias, estes sofrem com queda de vazão e qualidade da corrente permeada, além da necessidade de procedimentos de limpeza cada vez mais frequentes. Isto ocorre devido as chamadas “incrustações”, levando a queda da eficiência do processo, aumento da frequência de limpeza, diminuição da vida útil ou até mesmo na perda total do módulo.

As alternativas utilizadas para mitigar os efeitos das incrustações, estão relacionadas ao pré-tratamento do efluente (processos de filtração para remoção de sólidos em suspensão, tratamento físico-químico, utilização de biocidas e anti incrustantes), ao melhor controle dos parâmetros operacionais (pH, temperatura, velocidade do escoamento e recuperação) e aos mecanismos de limpeza utilizados. Alternativas menos convencionais relacionadas ao desenvolvimento de novas membranas e módulos também vem ganhando destaque nos últimos anos.

Nos processos que envolvem a utilização de membranas como barreira seletiva, a utilização do escoamento bifásico durante a operação e em procedimentos de limpeza, embora ainda pouco estudada, pode se mostrar bastante eficiente no combate aos efeitos das incrustações. O fluxo bifásico gás-líquido é intencionalmente utilizado para criar instabilidades hidrodinâmicas nos canais de escoamento. Essas instabilidades geram uma perturbação na camada de polarização da concentração, promovem o arraste de material particulado e realizam a remoção de bioincrustações da superfície das membranas ou dos espaçadores da alimentação de módulos em espiral.

Apesar dos resultados promissores no campo do escoamento bifásico em processos de separação por membranas, existem poucas publicações estudando sua aplicação em processos de nanofiltração e osmose inversa, sendo a maioria dos estudos direcionados à técnicas de pré tratamento ou limpeza química em processos de MF e UF. Quando se trata do escoamento bifásico aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processos de NF e OI, os resultados são ainda mais escassos, tendo pouquíssima literatura disponível.

OBJETIVOS

O lixiviado de aterro sanitário é um efluente de alta complexidade e característica variável, dependente das condições ambientais, densidade pluviométrica, idade do aterro, qualidade e quantidade de resíduos ali depositados, dos processos biológicos e químicos ocorridos durante o descarte e da taxa de percolação de água através dos resíduos no aterro. Devido a esta complexidade e sua alta carga de contaminantes, a utilização de processos de filtração por membranas para seu tratamento é um grande desafio, levando a uma queda do fluxo de permeado ao longo do tempo de operação. Este fenômeno está relacionado a polarização da concentração e a deposição de diferentes espécies na superfície e nos poros das membranas, denominado de incrustações ou “fouling”. Estes podem limitar a competitividade do processo, aumentando os custos com energia, mão de obra adicional para manutenção e limpeza química excessiva que resulta em redução da vida útil da membrana, podendo inviabilizar o processo.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo estudar os efeitos da utilização do escoamento bifásico em módulos de Nanofiltração em espiral, por meio da adição de ar comprimido, no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Sendo avaliada a influência da vazão de ar aplicada e a realização de flush periódicos com e sem injeção de ar como estratégia para manutenção do fluxo de permeado ao longo do processo e potencial redução da frequência de limpeza química.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho foi construída uma planta em escala de bancada de Nanofiltração, conforme fluxograma representado na Figura 1.

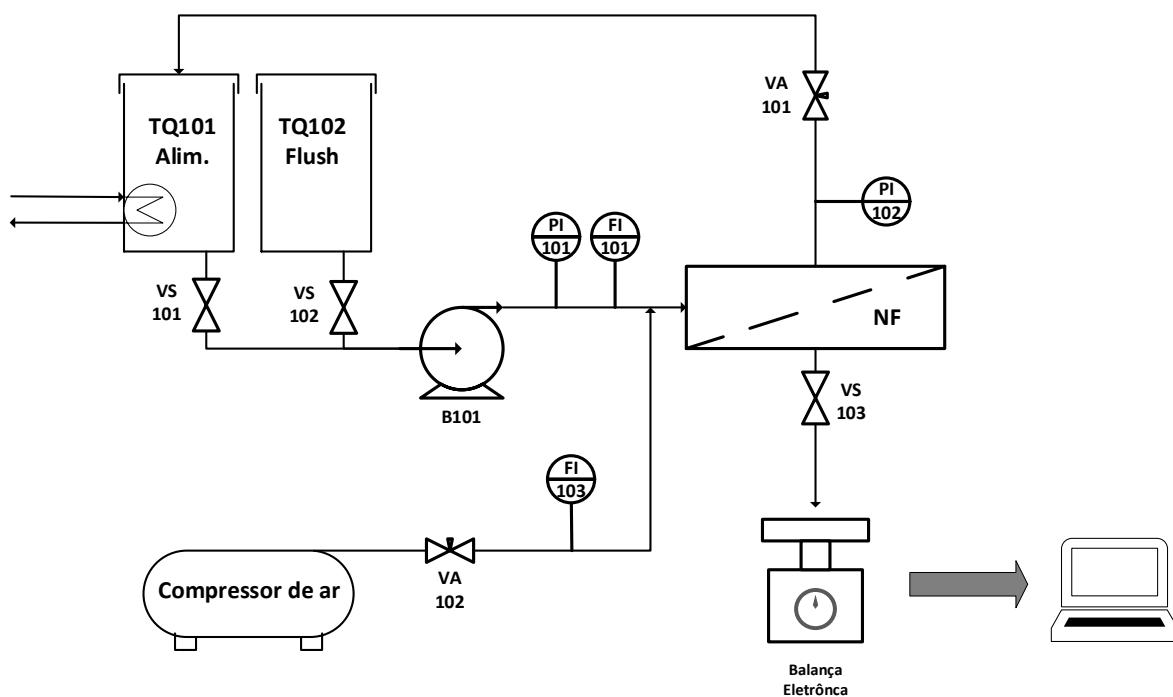


Figura 1 – Fluxograma unidade de Nanofiltração em escala de bancada.

O sistema é composto pelos seguintes itens: dois tanques, sendo o primeiro (TQ101) utilizado para alimentação do efluente bruto, equipado com um trocador de calor para manutenção da temperatura ao longo dos testes, e o segundo (TQ102) para a realização de procedimentos de flush; bomba (B101), para bombeamento do lixiviado bruto e solução de flush, equipada com inversor de frequência, a fim de se ter um controle ainda mais preciso das variáveis do processo; módulo de membranas (NF101); uma balança com transmissão de dados, conectada a um computador para coleta da variação de massa ao longo do tempo;

compressor de ar, para promoção do escoamento bifásico; válvulas e instrumentação para controle de vazão e pressão de operação das principais correntes do processo.

Durante a permeação, o lixiviado bruto é bombeado pela ação da B101 através do módulo de nanofiltração. A corrente permeada é coletada em um recipiente depositado em cima da balança, enquanto que a corrente concentrada é recirculada para o tanque de alimentação. De forma a manter a concentração de poluentes constante no tanque de alimentação, de tempos em tempos, o permeado acumulado é realimentado ao tanque TQ101. Já para o procedimento de flush, a solução é bombeada do TQ102, mantendo-se a linha de permeado fechada. A solução passa pelo módulo de membrana e, em seguida, é descartada.

As caracterizações do lixiviado foram realizadas no Laboratório de Processos de Separação com Membranas e Polímeros (PAM), vinculado ao Programa de Engenharia Química (PEQ) da Coppe/UFRJ. Foram analisados os principais parâmetros para caracterização do lixiviado bruto e das correntes de permeado e concentrado, sendo eles: turbidez, condutividade elétrica, pH e demanda química de oxigênio (DQO). As análises foram realizadas de acordo com as metodologias descritas no Standard Methods (APHA, 2017).

O módulo de Nanofiltração utilizado (Figura 2) foi desenvolvido de forma a simular as condições de escoamento em um módulo industrial em espiral de 8". O mesmo é composto por uma base inferior em polipropileno com uma cavidade para alocação de um meio poroso do mesmo material que serve como suporte para membrana, a membrana de nanofiltração, um espaçador de forma a simular o espaçamento entre os envelopes de membrana do módulo industrial, um anel de vedação e uma base superior em acrílico, para ter uma análise visual dos testes.

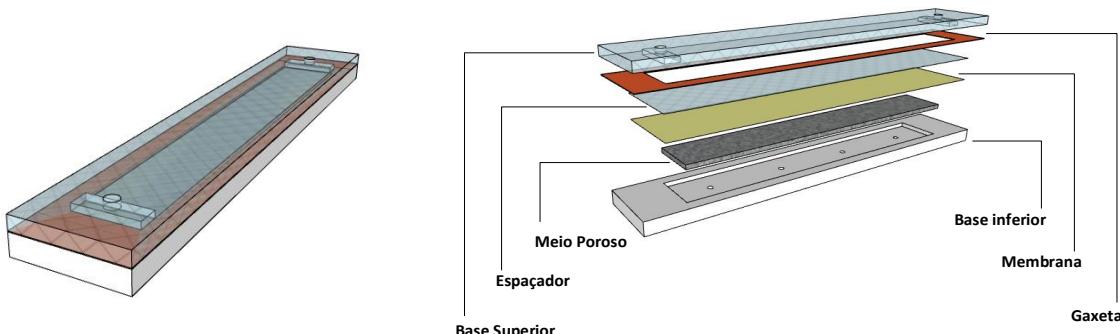


Figura 2 – Módulo de nanofiltração desenvolvido para os estudo.

Para a realização dos testes foram utilizadas membranas comerciais retiradas do módulo em espiral de 8" NANO SW da Hydranautics, com camada seletiva em poliamida, com uma área equivalente a 0,07m². Os testes de permeação foram realizados durante 3h mantendo-se uma pressão constante de 6 bar, analisando a variação do fluxo de permeado ao longo do teste. A vazão de alimentação do módulo de membranas foi mantida constante em 80L/h, valor este equivalente ao Reynolds máximo suportado pelo módulo industrial de 8". Foram realizados testes variando a vazão de ar utilizada no escoamento bifásico (80NL/h e 160NL/h, equivalentes as velocidade de escoamento de 0,25m/s e 0,50m/s), além de ensaios com flush periódicos a cada 30 minutos utilizando diferentes soluções e também avaliando a influência da injeção de ar durante o procedimento.

RESULTADOS

Inicialmente foi avaliado o comportamento do sistema mediante a injeção de ar comprimido durante a operação, de forma contínua, utilizando duas vazões de ar (80NL/h e 160NL/h) equivalentes a velocidades de escoamento de 0,25 e 0,50m/s, valores estes correspondentes a faixas de operação encontradas na literatura. Os resultados destes testes estão ilustrados na Figura 3.

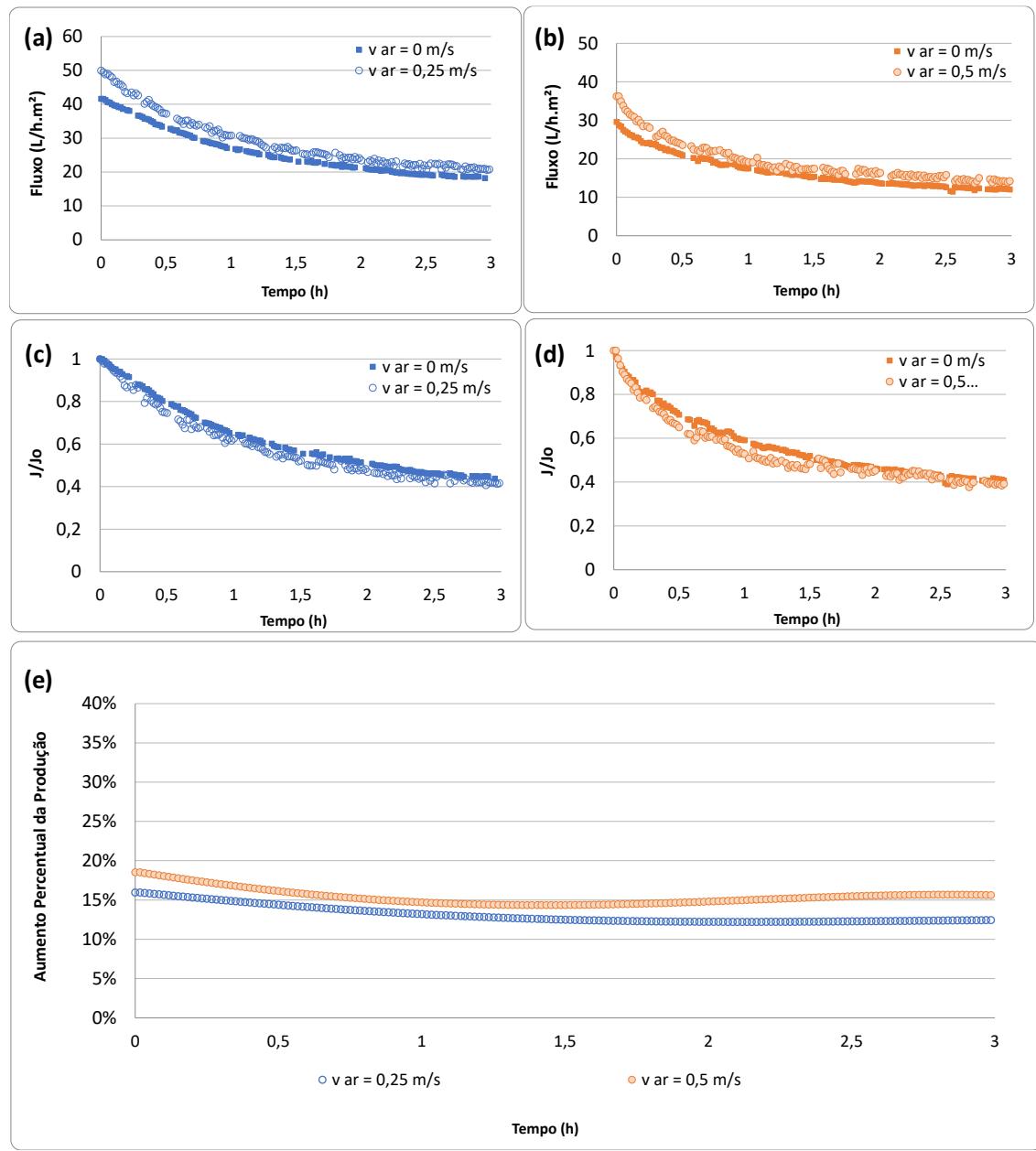


Figura 3 – Resultados experimentais dos ensaios com injeção de ar constante, onde: (a) e (b) apresentam a comparação entre o fluxo médio de permeado sem e com injeção de ar para velocidades de escoamento de ar de 0,25m/s e 0,5m/s; (c) e (d) apresentam a relação entre fluxo ao longo do teste e o fluxo inicial; (e) apresenta o ganho percentual na produção para as duas velocidades estudadas.

Na Figura 3.a e 3.b está representada a variação de fluxo médio de permeado ao longo da operação normal sem injeção de ar ($v_{ar} = 0$ m/s) e para as duas vazões de ar estudadas (correspondentes as velocidades de escoamento de ar de 0,25 e 0,50 m/s), sendo observado aumento do fluxo para os ensaios para ambas as vazões, se comparados aos testes sem injeção de ar. Além disso, a Figura 3.c e 3.d mostram como ocorre a variação do fluxo ao longo do teste, representado pela razão entre fluxo instantâneo (J) e o fluxo inicial (J_0) de cada ensaio, não apresentando variação significativa em relação a operação sem injeção de ar. Por fim, na Figura 3.e é possível observar o aumento efetivo na produção proporcionado pelo escoamento bifásico no módulo de membranas estudado.

Após a realização dos testes com injeção de ar constante, foi avaliado o comportamento do sistema mediante a realização de procedimentos de flush periódicos realizados a cada 30min, nos quais uma solução foi bombeada

através do canal de alimentação, mantendo-se o permeado fechado pelo tempo de 1min, utilizando a mesma vazão utilizada durante a permeação. Este procedimento foi testado utilizando três soluções de água, lixiviado bruto e um detergente alcalino (pH 10), além da injeção de ar apenas durante o período de flush. Os resultados referentes ao comportamento do fluxo de permeado e ao aumento da produtividade devido à realização desses procedimentos estão apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

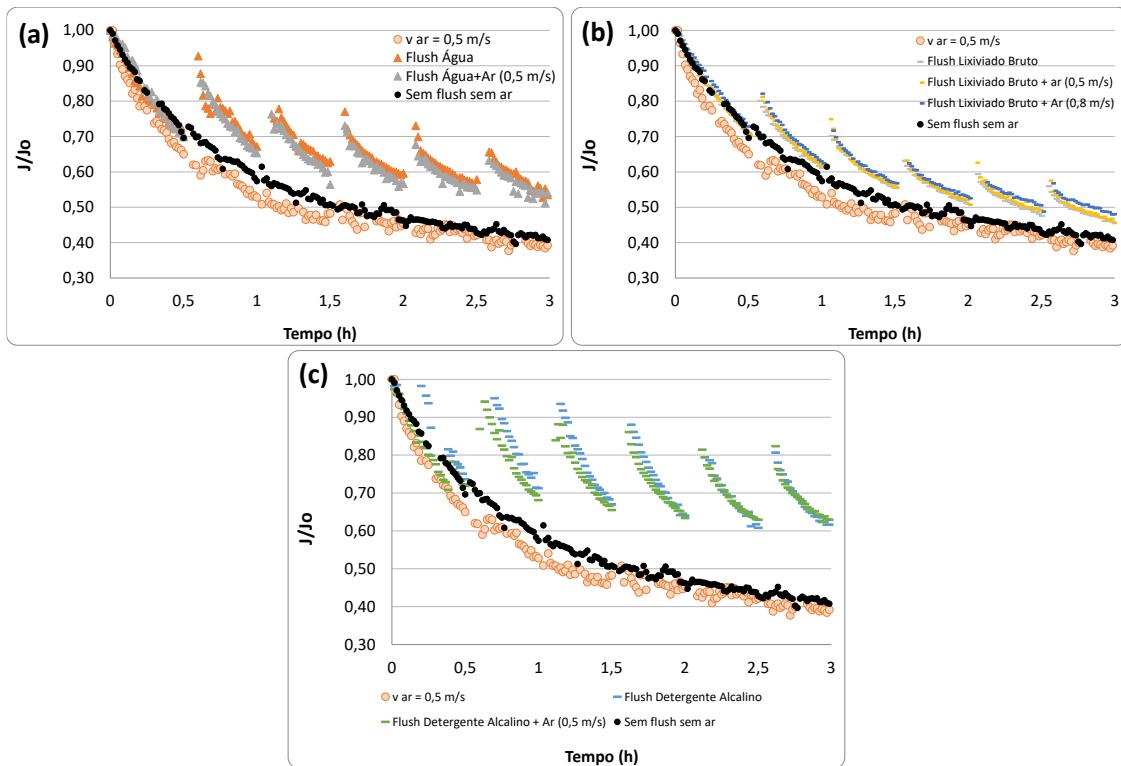


Figura 4 – Comparativo da razão J/J_0 para os ensaios realizados com a utilização de flushes periódicos (30 min), com e sem injeção de ar, utilizando como fluido água (a), lixiviado bruto (b) e (c) Detergente alcalino (pH 10).

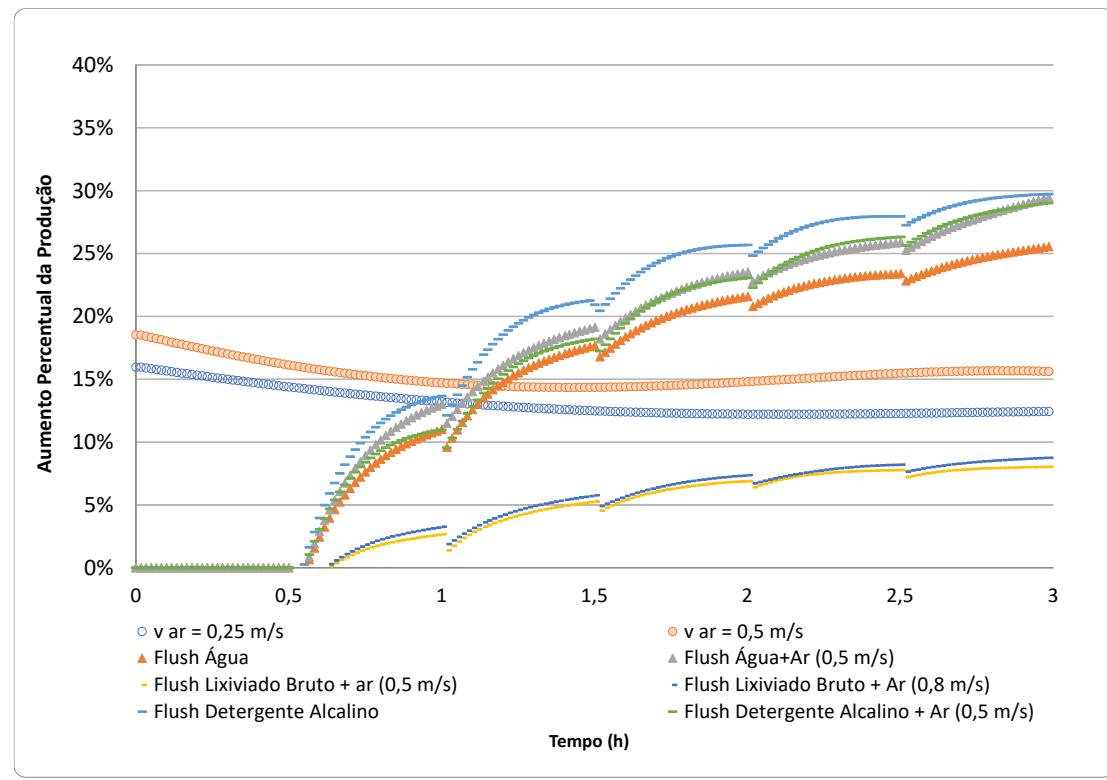


Figura 5 – Comparativo geral da produtividade dos experimentos com injeção de ar contínua e flushs periódicos com as diferentes soluções.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os testes realizados utilizando injeção de ar contínua durante a operação indicaram que a mesma resulta em um aumento do fluxo instantâneo ao longo do processo (Figura 3.a e 3.b), resultando também em um aumento médio de 13% e 15% da produtividade, com velocidades de escoamento de ar de 0,25 m/s e 0,50 m/s, respectivamente. Este aumento do fluxo pode ser resultado do aumento do cisalhamento na superfície da membrana, causado pelas bolhas de ar geradas durante o escoamento, resultando na diminuição da camada polarizada, o que leva a uma redução da resistência à transferência de massa.

Apesar disso, foi observado que a injeção de ar não alterou o decaimento do fluxo em relação ao fluxo inicial (J/J_0), como observado nas Figuras 3.c e 3.d, o que pode ser um indicativo de que a injeção de ar não afeta a adsorção de moléculas na membrana.

Os testes realizados com flushs periódicos durante o processo mostraram que há uma recuperação parcial do fluxo após cada procedimento, em todas as condições testadas. Inicialmente foram utilizados água e lixiviado bruto como soluções para realização do flush, tendo a água alcançado resultados bem superiores aos do lixiviado bruto (Figuras 4.a e 4.b). Isto pode indicar que, além de remover boa parte das moléculas depositadas na superfície da membrana, como ocorre com a utilização do lixiviado bruto, ocorre também a solubilização/dessorção espécies aderidas. Assim como nos testes com injeção de ar contínua, não houve variação significativa no decaimento do fluxo ao longo teste, apesar de gerar um aumento gradativo no volume de permeado produzido (Figura 4.c). Posteriormente foram realizados testes com uma solução de detergente alcalino pH 10, esperando-se que os efeitos do tensoativo incrementassem o efeito da injeção de ar. Os testes realizados com o detergente apresentaram uma maior recuperação do fluxo após as etapas de flush, porém, não variando de forma significante o volume produzido, sendo este ligeiramente menor, comportamento aquém do esperado.

CONCLUSÕES

A utilização do escoamento bifásico de forma contínua no processo de tratamento de lixiviado de aterro sanitário, apesar de ter resultado em um aumento de até 15% na produção da planta, teve resultados inferiores à realização de flushs periódicos durante o processo, indicando que esta talvez não seja a melhor alternativa. Inclusive, a injeção de ar contínua pode aumentar consideravelmente os custos operacionais da planta, devido a necessidade de pressurização do ar.

A realização de flushs periódicos se mostrou bastante efetiva, sendo estes incrementados pelo escoamento bifásico para os casos em que a água e o lixiviado bruto foram utilizados como solução de flush. O fato do flush ser realizado em baixa pressão, leva a um baixo custo de geração de ar, podendo-se utilizar dispositivos mecânicos encontrados no mercado.

A utilização da solução de detergente alcalino pH 10 para a realização do flush foi a que apresentou os melhores resultados, porém o alto consumo do agente químico também pode aumentar os custos operacionais, devendo-se realizar uma análise criteriosa do OPEX da planta. Para este caso, a utilização do escoamento bifásico não se mostrou efetiva.

Apesar dos resultados inferiores observados para a utilização de lixiviado bruto na realização do flush, este pode ser uma alternativa promissora visto que não há gasto de energia para geração de ar, e nem perda de água ou gastos excessivos com produtos químicos para a realização do procedimento.

Além do aumento da produtividade da planta, espera-se também que os procedimentos avaliados neste trabalho reduzam de forma significativa a frequência de limpeza química.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALSALHY, Q. F., ALBYATI, T. M., ZABLOUK, M. A. "A study of the effect of operating conditions on reverse osmosis membrane performance with and without air sparging technique", *Chemical Engineering Communications*, v. 200, n. 1, p. 1–19, 2013. DOI: 10.1080/00986445.2012.685529. .
2. ASEFI, H., ALIGHARDASHI, A., FAZELI, M., et al. "CFD modeling and simulation of concentration polarization reduction by gas sparging cross-flow nanofiltration", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, n. 5, p. 5–11, 2019. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103275. .
3. BAKER, R. W. *Membrane Technology and Applications*. [S.l: s.n.], 2012.
4. CHESTERS, S. P.; ARMSTRONG M. W. & FAZEL, M. (2014): *Microbubble RO membrane cleaning reduces fouling on WWRO plant*, *Desalination and Water Treatment*, DOI: 10.1080/19443994.2014.940225.
5. CUI, Z. F., CHANG, S., FANE, A. G. "The use of gas bubbling to enhance membrane processes", *Journal of Membrane Science*, v. 221, n. 1–2, p. 1–35, 2003. DOI: 10.1016/S0376-7388(03)00246-1. .
6. DREWS, A., PRIESKE, H., MEYER, E. L., et al. "Advantageous and detrimental effects of air sparging in membrane filtration: Bubble movement, exerted shear and particle classification", *Desalination*, v. 250, n. 3, p. 1083–1086, 2010. DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.113. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.113>.
7. DUCOM, G., CABASSUD, C. "Possible effects of air sparging for nanofiltration of salted solutions", *Desalination*, v. 156, n. 1–3, p. 267–274, 2003. DOI: 10.1016/S0011-9164(03)00349-7. .
8. DUCOM, G., PUECH, F. P., CABASSUD, C. "Air sparging with flat sheet nanofiltration: A link between wall shear stresses and flux enhancement", *Desalination*, v. 145, n. 1–3, p. 97–102, 2002. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00392-2. .
9. ESSEMIANI, K., DUCOM, G., CABASSUD, C., et al. "Spherical cap bubbles in a "at sheet nanofiltration module: experiments and numerical simulation", *Chemical Engineering Science*, v. 56, 2001. Disponível em: <http://www.revistacoopercitrus.com.br/?pag=materia&codigo=5921>.
10. FRANÇA NETA, L. "Análise de técnicas de caracterização da transferência de massa em módulos de microfiltração." XIX, 138 p.: il. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Química, 2009.
11. GUERRERO, V. "Effects of dissolved CO₂ on cleaning of RO membranes" (2018). *All Theses*. 2940. Disponível em: https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2940.

12. HABERT, A. C., PIACSEK, C., NOBREGA, R. Processos de Separação por Membranas. [S.l: s.n.]. Rio de Janeiro, 2006.
13. HUPSEL, A. "Combinação de Processos de Separação com Membranas e Adsorção em Carvão Ativado para o Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário". XVI, 153 p.: il.Tese (mestrado) UFRJ/COPPE, 2021.
14. JIANG, B.; HU, B.; YANG, N.; ZHANG, L.; SUN, Y.; XIAO, X. "Study of Turbulence Promoters in Prolonging Membrane Life". *Membranes* 2021, 11, 268. <https://doi.org/10.3390/membranes11040268>
15. MAQSOOD FAZEL & S. CHESTERS (2015) *RO membrane cleaning using microbubbles at 6,800 m3/d wastewater RO plant in UAE, Desalination and Water Treatment*, 55:12, 3358-3366, DOI: 10.1080/19443994.2014.940216
16. MOHAMMADI, T., MOGHADAM, M. K., MADAENI, S. S. "Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during reverse osmosis of seawater", *Desalination*, v. 151, n. 3, p. 239–245, 2003. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)01016-0. .
17. OLIVERA, D. "Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando a microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas" VIII, 119 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Química, 2007).
18. VOUTCHKOV, N. "Diagnostics of Membrane Fouling and Scaling", *Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination*, p. 43–64, 2017. DOI: 10.1016/b978-0-12-809953-7.00003-6. .
19. WIBISONO, Y. et al. Hydrogel-coated feed spacers in two-phase flow cleaning in spiral wound membrane elements: a novel platform for eco-friendly biofouling mitigation. *Water research*, v. 71, p. 171–186, 2015.
20. WIBISONO, Y., CORNELISSEN, E. R., KEMPERMAN, A. J. B., et al. "Two-phase flow in membrane processes: A technology with a future", *Journal of Membrane Science*, v. 453, p. 566–602, 2014. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.10.072.
21. WILMARTH, T.; ISHII, M. Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels. *International journal of heat and mass transfer*, v. 37, n. 12, p. 1749–1758, 1994.
22. YAMANOI, I.; KAGEYAMA, K. Evaluation of bubble flow properties between flat sheet membranes in membrane bioreactor. *Journal of membrane science*, v. 360, n. 1–2, p. 102–108, 2010.