

Biorreator osmótico anaeróbio acoplado à destilação com membranas como alternativa para a concentração e recuperação de nutrientes no tratamento de esgotos domésticos

Anaerobic osmotic membrane bioreactor coupled to membrane distillation as an alternative for concentration and recovery of nutrients from municipal wastewater treatment

Gemima Santos Arcanjo^{1*} , Carolina Rodrigues dos Santos²,
Bárbara Fernandes Cavalcante³, Gabriela de Alcântara Moura³, Bárbara Caroline Ricci³ ,
Ann Honor Mounteer⁴ , Míriam Cristina Santos Amaral² 

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estimar a precipitação de sais de fósforo em biorreator osmótico anaeróbio acoplado à destilação com membranas (AnOMBR-MD) empregado no tratamento de esgoto doméstico. $MgCl_2$ foi utilizado para compor a solução osmótica (SO) do AnOMBR-MD. Um módulo híbrido com membranas de osmose direta (OD) e destilação (MD) foi submerso em um biorreator, e os fluxos de permeado estabilizaram-se em $0,5 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. A rejeição do sal pela MD foi superior a 99,6%, e mais de 90% do carbono orgânico dissolvido foi removido. Uma fração do $N-NH_4^+$ permeou a membrana de OD, e a SO apresentou concentração média de 7 mg L^{-1} . $P-PO_4^{3-}$ não foi detectado na SO nem no destilado, com remoção global maior que 99,99% durante toda a operação, entretanto a concentração de $P-PO_4^{3-}$ no líquido reacional (LR) foi menor que a calculada pelo balanço de massa, indicando precipitação de sais com o íon. Foi utilizado o *software* Visual MINTEQ 3.1 para calcular as especiações dos íons inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ e PO_4^{3-}) e a precipitação espontânea de $P-PO_4^{3-}$. Com o aumento da concentração de Mg^{2+} no LR, o modelo termodinâmico mostrou que pode ter havido precipitação de $MgCO_3$, $CaHPO_4$ e $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, o que também justifica a redução das concentrações de $N-NH_4^+$ e $P-PO_4^{3-}$ no LR no 16º dia de operação. Os sais precipitados podem ser utilizados como fertilizante agrícola, o que mostra a sustentabilidade do processo de tratamento de esgotos em AnOMBR-MD, promovendo a integração do nexo água-alimento.

Palavras-chave: nitrogênio; fósforo; estruvita; Visual MINTEQ; solução osmótica.

ABSTRACT

The objective of this work was to estimate the precipitation of phosphorus salts in an anaerobic osmotic membrane bioreactor coupled to membrane distillation (AnOMBR-MD) treating municipal wastewater. $MgCl_2$ was used to compose the draw solution (DS) of AnOMBR-MD. A hybrid forward osmosis (FO)-membrane distillation (MD) module was submerged in the bioreactor and permeate fluxes stabilized in $0.5 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. MD salt rejection was higher than 99.6% and more than 90% of dissolved organic carbon was removed. Part of $N-NH_4^+$ permeated through the FO membrane and the DS presented an average concentration of 7 mg L^{-1} . $P-PO_4^{3-}$ was not detected in DS or distillate, with global removal higher than 99.99% during the entire operation time. However, $P-PO_4^{3-}$ concentration in the mixed liquor (ML) was below the mass balance prediction, which indicated salt precipitation. The Visual MINTEQ 3.1 software was executed to calculate inorganic ions speciation (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , and PO_4^{3-}) and spontaneous $P-PO_4^{3-}$ precipitation. With the increase in Mg^{2+} concentration in the ML, the thermodynamic model showed that magnesite ($MgCO_3$), monetite ($CaHPO_4$) and struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) may have precipitated in the bioreactor. These results justify the reduction in $N-NH_4^+$ and $P-PO_4^{3-}$ concentrations in the ML after day 16. The precipitated salts could be used as fertilizer in agriculture, demonstrating the sustainability in AnOMBR-MD treating municipal wastewater, which promotes the nexus water-food.

Keywords: nitrogen; phosphorus; struvite; draw solution.

¹Universidade Federal da Bahia - Salvador (BA), Brasil.

²Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

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

⁴Universidade Federal de Viçosa - Viçosa (MG), Brasil.

*Endereço para correspondência: Universidade Federal da Bahia, Rua Professor Aristides Novis, 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador (BA), Brasil. E-mail: gemima.arcanjo@ufba.br

INTRODUÇÃO

Biorreatores com membranas (BRM) adotados para o tratamento de efluentes apresentam grandes benefícios para o tratamento biológico, pois permitem maior concentração de sólidos no reator e maior tempo de residência celular, o que melhora a qualidade do efluente produzido, se comparados aos tratamentos biológicos convencionais (MAENG *et al.*, 2013). O uso de membranas de osmose direta (OD) em BRM ganhou muita atenção nos últimos anos, por sua elevada rejeição de compostos dissolvidos, nutrientes, metais pesados e micropoluentes, já que essas membranas são não porosas (OBEROI *et al.*, 2022; YAO *et al.*, 2020). Além disso, o processo não necessita de pressão hidráulica, uma vez que a força motriz é a diferença de concentração entre a alimentação e a solução osmótica (SO) (VINARDELL *et al.*, 2022).

Um dos principais problemas de biorreatores osmóticos é a necessidade de pós-tratamento da SO, para recuperação de água. A destilação assistida por membranas (MD) utiliza uma membrana hidrofóbica que permite apenas a passagem de compostos voláteis, com elevada rejeição de compostos não voláteis e sais. Portanto, pode ser usada na recuperação de água da SO, proveniente da OD (WANG; CHUNG, 2015). Dessa forma, um biorreator osmótico anaeróbio acoplado à destilação com membranas (AnOMBR-MD) permite elevada eficiência de remoção de poluentes e na acumulação de nutrientes no tratamento de esgotos domésticos.

A proposta de um biorreator osmótico anaeróbio acoplado à destilação por membranas (AnOMBR-MD), com um mesmo módulo submerso para a OD e a MD, apresenta todas as vantagens dos processos biológico e de separação por membranas e pode superar a maior parte das desvantagens desses processos, entre elas a eficiência de remoção de compostos orgânicos, uma vez que permite elevado tempo de residência celular (θ_c) (QIU *et al.*, 2016). Ricci *et al.* (2019) avaliaram a *performance* de um AnOMBR-MD cuja SO foi NaCl e observaram aumento muito expressivo da salinidade no reator, o que pode ter favorecido a redução do fluxo, em função do aumento da pressão osmótica da alimentação da OD. Além disso, eficiências de remoção de micropoluentes no AnOMBR

maiores que 93% foram reportadas (KIM; GWAK; HONG, 2017; RICCI *et al.*, 2019).

Os processos biológicos anaeróbios apresentam baixa remoção de nutrientes. De fato, nitrogênio orgânico é transformado em nitrogênio amoniacal ($N-NH_4^+$) e, juntamente com o fosfato (PO_4^{3-}), permanece no esgoto tratado (ANARI *et al.*, 2023). Como as membranas de OD apresentam boa rejeição desses nutrientes, entre 70 e 80% para $N-NH_4^+$ e quase 100% para PO_4^{3-} , eles são acumulados no AnOMBR (GU *et al.*, 2015). No caso do $N-NH_4^+$, caso não haja um mecanismo para remover o que é acumulado no reator, pode ocorrer aumento significativo de sua concentração no permeado, ainda maior que a concentração afluente (GU *et al.*, 2015). Além disso, o acúmulo de amônia no biorreator pode ser tóxico para a microbiota e causar o declínio de bactérias acetogênicas e archeas metanogênicas, reduzindo a biodegradação dos compostos orgânicos (MOIDEEN *et al.*, 2023). A recuperação simultânea de nutrientes em biorreator com membranas osmótico (OMBR) anaeróbios pode ser uma excelente alternativa, principalmente na forma de estruvita ($NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$), que tem sido amplamente estudada (ZHANG *et al.*, 2014; LOU *et al.*, 2018), uma vez que no próprio reator existem elevadas concentrações de $N-NH_4^+$ e $P-PO_4^{3-}$, bem como de Mg^{2+} , garantindo melhor qualidade do permeado (QIU; TING, 2014; GU *et al.*, 2015).

Em AnOMBR-MD, a SO pode interferir na recuperação de nutrientes. Isso porque os íons da SO podem difundir-se pela membrana de OD e chegar ao líquido reacional, fenômeno chamado de fluxo inverso de sal (J_s). Qiu e Ting (2014) avaliaram o tratamento de esgoto sintético e encontraram melhor *performance* do OMBR aeróbio quando foi utilizado $MgCl_2$ na SO, comparado ao uso de NaCl. Os autores reportaram que no início da operação NaCl promoveu maior fluxo, mas, com o maior J_s , houve maior aumento da salinidade do líquido reacional, resultando em maior redução do fluxo de permeado. Além disso, o acúmulo de $MgCl_2$ aumentou a recuperação de $P-PO_4^{3-}$ no OMBR aeróbio (QIU; TING, 2014). Chang *et al.* (2017) também utilizaram $MgCl_2$ como soluto de uma SO, em um OMBR aeróbio combinado com microfiltração para tratar efluente sintético. $P-PO_4^{3-}$ foi recuperado de forma

efetiva do permeado da microfiltração (MF), na forma de estruvita, reduzindo a condutividade elétrica do líquido reacional. Por outro lado, a recuperação de nutrientes em OMBR anaeróbio mediante $MgCl_2$ como soluto da SO ainda não foi estudada.

Assim, este trabalho teve como objetivos avaliar a remoção de poluentes e estimar a precipitação de sais em AnOMBR-MD.

METODOLOGIA

Aparato experimental

O AnOMBR-MD (Figura 1) foi operado com esgoto sintético na alimentação (Alim), e o lodo anaeróbio, inoculado à concentração de 10 g L^{-1} de sólidos suspensos voláteis (SSV). O módulo híbrido OD-MD foi submerso no tanque de 4,5 L, e dois tanques, com a SO e o destilado,

foram colocados em duas balanças, para medir as massas e, então, calcular os fluxos de permeado. A SO foi composta de $MgCl_2$ ($2,1 \text{ mol L}^{-1}$), por apresentar menor fluxo inverso de sal (J_s) (ARCANJO *et al.*, 2020). A membrana de OD foi fornecida pela HTI, e a de MD, pela Sterlitech Corporation.

As amostras foram caracterizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), com a medição de pH, condutividade, carbono orgânico dissolvido (COD), alcalinidade, $P-PO_4^{3-}$, $N-NH_4^+$, Cl^- e Mg^{2+} .

Especiação e precipitação de sais

A especiação dos íons inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ e PO_4^{3-}) e a precipitação espontânea do $P-PO_4^{3-}$ no AnOMBR-MD foram calculadas com o programa Visual MINTEQ 3.1, um modelo para avaliar o equilíbrio químico das espécies

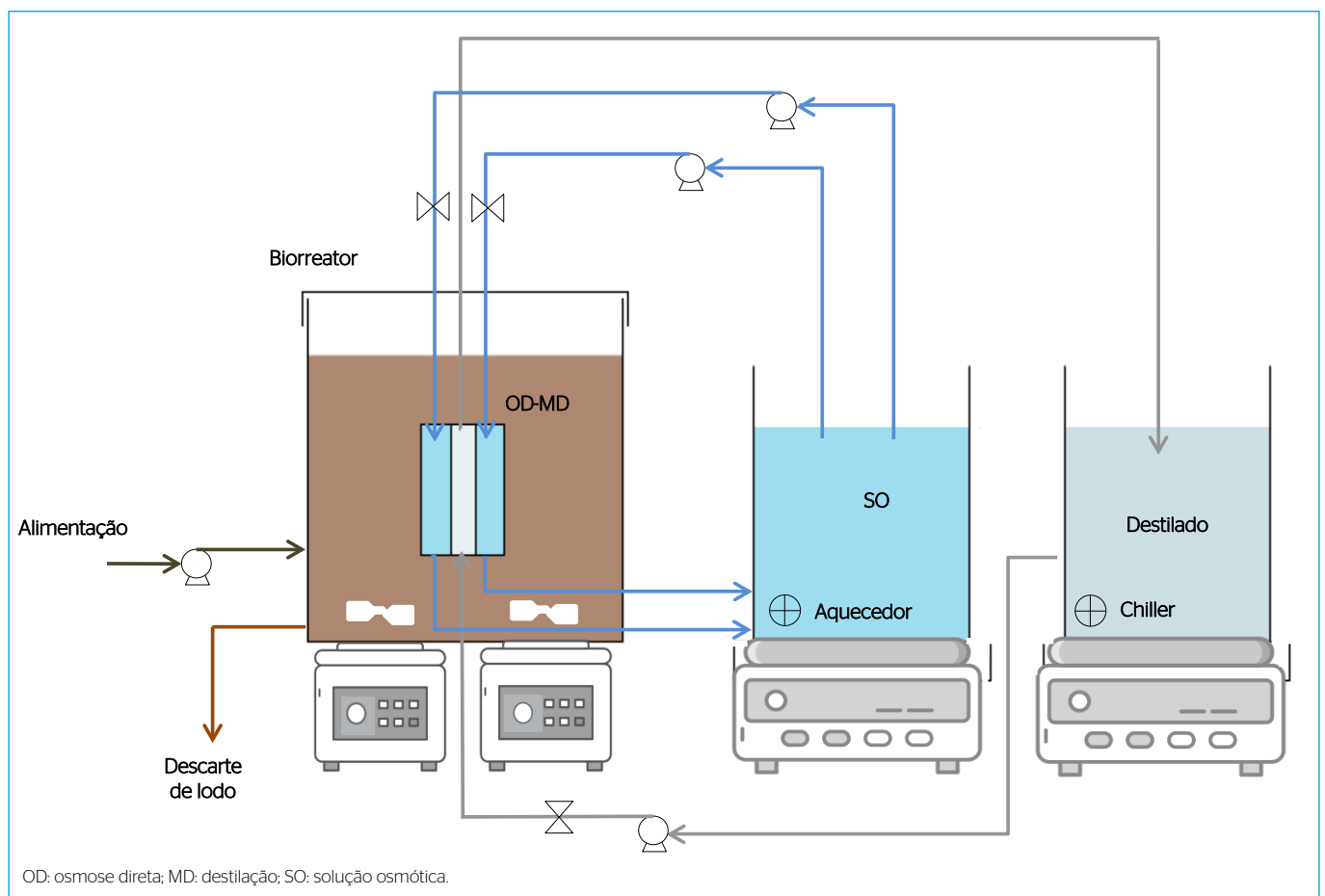


Figura 1 – Sistema biorreator osmótico anaeróbio acoplado à destilação com membranas para o tratamento de esgoto.

minerais (CRUTCHIK; SÁNCHEZ; GARRIDO, 2013). As concentrações teóricas de $P-PO_4^{3-}$, Mg^{2+} , Ca^{2+} e Cl^- foram estimadas pelo balanço de massa, considerando a concentração da alimentação, o Js e o descarte de lodo diário.

De acordo com o modelo proposto por Jia *et al.* (2017), sete minerais foram escolhidos como possíveis espécies precipitadas: brucita ($Mg(OH)_2$); brushita ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$); magnesita ($MgCO_3$); monetita ($CaHPO_4$); nesquehonita ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$); newberyta ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$); e estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$). Por causa do pH e das taxas de cristalização de alguns minerais, foi excluída a possibilidade de precipitação de hidroxiapatita ($Ca_5(PO_4)_3OH$) e de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$).

O *software* foi utilizado para cinco dias de operação do biorreator (0, 7, 14, 21, e 28), com os dados de entrada de pH, temperatura, alcalinidade, COD, $P-PO_4^{3-}$, Mg^{2+} , Ca^{2+} e Cl^- medidos no biorreator. A concentração teórica de cada íon também foi calculada, considerando a entrada no biorreator pela alimentação e a saída pelo descarte de lodo. Para Mg^{2+} e Cl^- também foi levado em conta o fluxo inverso de sal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fluxos de permeado na OD e na DM foram estabilizados após 30 dias de operação, em $0,5 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, resultado das polarizações das concentrações interna e externa e das incrustações causadas pela biomassa do reator e pelo $MgCl_2$. Apesar disso, $MgCl_2$ mostrou ser um soluto com baixo fluxo inverso de soluto. Menor foi o aumento da salinidade no reator, com conseqüente redução dos impactos causados aos microrganismos, em comparação à operação com NaCl na SO (CAROLINE RICCI *et al.*, 2021). A membrana de MD apresentou rejeições de $MgCl_2$ maiores que 99,6%, mantendo a condutividade elétrica no destilado menor que $100 \mu\text{S cm}^{-1}$.

A remoção de COD no AnOMBR, considerando a remoção biológica e a rejeição pela membrana de OD, foi maior que 75,5% (Figura 2). A remoção biológica de COD foi maior que 60%, e não foi observado seu acúmulo no biorreator, mesmo com o aumento da salinidade e a elevada rejeição da membrana de OD. Isso demonstra que o maior tempo de retenção de matéria orgânica

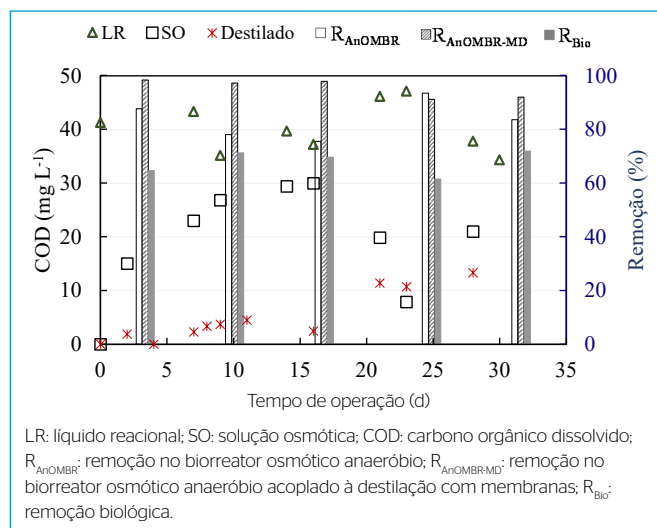


Figura 2 - Concentração e eficiência de remoção de COD no AnOMBR-MD (Alimentação: $122,6 \text{ mg L}^{-1} \text{ COD}$).

favorece a degradação biológica, como já reportado na literatura (QIU *et al.*, 2016; CAROLINE RICCI *et al.*, 2021). Com a MD, a remoção global do AnOMBR-MD aumentou para 96,3%. No destilado, a concentração de COD chegou a aumentar para 13 mg L^{-1} ao final da operação, o que pode ser justificado pelo molhamento dos poros da membrana, que passa a permitir a passagem de compostos dissolvidos, e também pela passagem de compostos orgânicos voláteis produzidos no processo anaeróbico. Algumas estratégias para minimização da incrustação e do molhamento precisam ser adotadas para manutenção do alto desempenho do biorreator. As características da membrana de MD, as condições operacionais, como temperatura, fluxo e velocidade de circulação, podem influenciar o tipo e a composição da incrustação, que, por sua vez, pode reduzir o fluxo de permeado, bem como sua qualidade, além de favorecer o molhamento e aumentar os custos energéticos e com limpeza (COSTA *et al.*, 2022).

Em razão do processo anaeróbico, com a conversão de nitrogênio orgânico a $N-NH_4^+$ e a elevada rejeição de íons pela membrana de OD (58 a 69%), houve significativo aumento da concentração de $N-NH_4^+$ no líquido reacional (LR) (Figura 3). Além disso, $N-NH_4^+$ foi gradualmente transferida do LR para a SO. De acordo com a temperatura e o pH da SO, 97% do $N-NH_4^+$ encontrava-se na forma

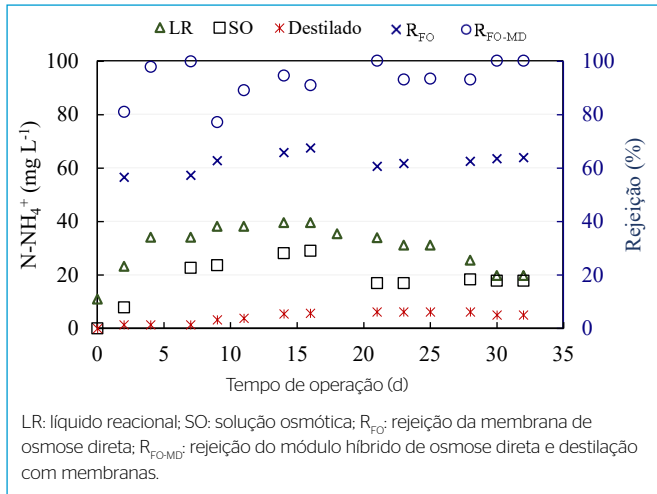


Figura 3 - Concentrações e rejeições de N-NH₄⁺ (Alimentação: 6,4 mg L⁻¹ N-NH₄⁺).

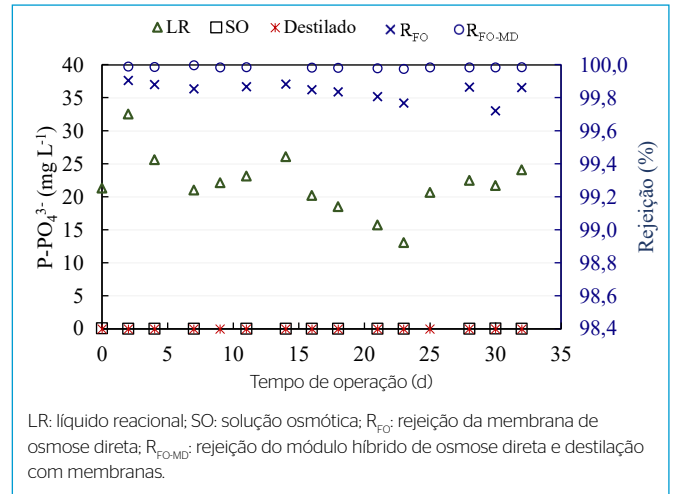


Figura 4 - Concentrações e rejeições de P-PO₄³⁻ (Alimentação: 29,9 mg L⁻¹ P-PO₄³⁻).

do íon amônio (NH₄⁺) e 3% na forma de amônia livre (NH₃), que, por ser volátil, também chegou ao destilado (< 6,2 mg L⁻¹). Em 15 dias, a concentração no LR começou a reduzir, possivelmente pela precipitação de N-NH₄⁺. O módulo OD-MD apresentou rejeição de N-NH₄⁺ maior que 93% após o 20º dia de operação, o que indica que a incrustação pode ter funcionado como uma barreira adicional nas membranas de OD e de MD.

O sistema apresentou elevada rejeição de P-PO₄³⁻, com as concentrações na SO e no destilado abaixo do limite de detecção (0,003 mg L⁻¹) em todas as amostras coletadas (Figura 4). O módulo OD-MD apresentou rejeições de P-PO₄³⁻ maiores que 99,99%. No LR, a concentração de P-PO₄³⁻ sempre esteve menor que a concentração na alimentação, indicando remoção biológica ou precipitação de sais de fósforo. Além disso, no 15º dia, notou-se maior redução da concentração P-PO₄³⁻, que se manteve até o 25º dia. Dessa forma, a avaliação da precipitação de sais foi realizada com o modelo do Visual MINTEQ 3.1.

De acordo com o balanço de massa (Tabela 1) e o modelo do Visual MINTEQ 3.1, os minerais magnesita, monetita e estruvita podem ter precipitado no biorreator, justificando a redução das concentrações de P-PO₄³⁻. Após o 16º dia, a precipitação de estruvita favoreceu a redução das concentrações de N-NH₄⁺ no LR. Gu *et al.* (2015) reportaram a precipitação de sais de Ca²⁺, P-PO₄³⁻ e outros íons quando a membrana de OD foi usada em

Tabela 1 - Concentração de íons no líquido reacional e formação de espécies precipitadas.

Parâmetro	Tempo de operação (d)				
	0	7	14	21	28
pH	6,9	7,5	7,8	8,2	8,1
Temperatura (°C)	39,5	37,9	36,6	37,7	38,0
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	5,8	69,1	78,9	98,7	115,9
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹) calculado	0,0	324,4	472,2	552,8	603,7
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	13,8	42,1	47,9	35,4	27,4
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	20,3	20,3	36,6	16,3	36,6
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹) calculado	20,3	122,3	153,9	176,0	175,3
Cl (mg L ⁻¹)	177,3	780,6	911,0	1034,2	1009,5
Cl (mg/L) calculado	0,0	1963,6	2580,6	2792,4	2886,8
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	66,7	65,8	81,6	49,3	70,4
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹) calculado	66,7	207,0	256,3	283,3	306,7
Fase sólida					
Magnesita (MgCO ₃) (mg L ⁻¹)	0	171,7	878,4	694,7	1140,6
Monetita (CaHPO ₄) (mg L ⁻¹)	0	85,7	159,9	119,1	182,1
Estruvita (MgNH ₄ PO ₄ ·6H ₂ O) (mg L ⁻¹)	0	0	0	74,3	24,5

um biorreator com membranas aeróbio em que a SO era composta de NaCl. Outros autores já avaliaram a recuperação de P-PO₄³⁻ em OMBR, no tratamento de esgoto doméstico (QIU; TING, 2014; QIU *et al.*, 2015; LUO *et al.*, 2016). Entretanto, no presente trabalho, MgCl₂ foi utilizado como soluto na SO e, por causa do J_s, o aumento de Mg²⁺ no LR facilitou a precipitação dos minerais compostos pelo

cátion (magnesita e estruvita), ao contrário do observado nos outros estudos.

Com esse tipo de biorreator, é possível enriquecer a concentração de nutrientes no sobrenadante do LR, tornando viável a recuperação de N e P, de forma simultânea, como fertilizantes de alta qualidade e valor agregado. Essa alternativa é bastante atrativa, principalmente quando se tem a presença de Mg^{2+} , proveniente do próprio esgoto e da SO. A recuperação contínua de $N-NH_4^+$ e $P-PO_4^{3-}$ e a consequente redução da concentração no LR contribuem para a diminuição na formação de incrustação inorgânica nas membranas, e menor concentração de nutrientes chega à SO e ao destilado, melhorando a qualidade do produto final do AnOMBR-MD. Ademais, o uso de membranas de MF e a ultrafiltração para extração do sobrenadante do LR,

além de reduzir a salinidade e o impacto aos microrganismos, podem otimizar a retirada de nutrientes e favorecer também a redução da salinidade no biorreator.

CONCLUSÕES

Elevadas remoções de COD e $P-PO_4^{3-}$ foram obtidas pelo AnOMBR-MD. Para $N-NH_4^+$, em razão da sua formação no tratamento anaeróbico e da passagem pelas membranas de OD e MD, os resultados não foram satisfatórios para esse parâmetro, entretanto o modelo termodinâmico mostrou que os minerais magnesita, monetita e estruvita precipitaram no biorreator, mostrando o potencial de recuperação de nutrientes provenientes do esgoto e a sustentabilidade do processo de AnOMBR acoplado à destilação com membranas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Nova York: APHA, AWWA, WPCF, 2017.
- ANARI, Z.; MORRISSEY, K.; KÉKEDY-NAGY, L.; DANESHPOUR, R.; ABOLHASSANI, M.; MOORE, J.; THOMA, G.; GREENLEE, L. Pressure-driven membrane nutrient preconcentration for down-stream electrochemical struvite recovery. *Separation and Purification Technology*, v. 309, 122907, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122907>
- ARCANJO, G.S.; COSTA, F.C.R.; RICCI, B.C.; MOUNTEER, A.H.; MELO, E.N.M.L.; CAVALCANTE, B.F.; ARAÚJO, A.V.; FARIA, C.V.; AMARAL, M.C.S. Draw solution solute selection for a hybrid forward osmosis-membrane distillation module: Effects on trace organic compound rejection, water flux and polarization. *Chemical Engineering Journal*, v. 400, 125857, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125857>
- CAROLINE RICCI, B.; ARCANJO, G.S.; MOREIRA, V.R.; LEBRON, Y.A.R.; KOCH, K.; COSTA, F.C.R.; FERREIRA, B.P.; LISBOA, F.L.C.; DINIZ MIRANDA, L.; FARIA, C.V.; LANGE, L.C.; AMARAL, M.C.S. A novel submerged anaerobic osmotic membrane bioreactor coupled to membrane distillation for water reclamation from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, v. 414, 128645, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128645>
- CHANG, H.-M.; CHEN, S.-S.; NGUYEN, N.C.; CHANG, W.-S.; SINHA RAY, S. Osmosis membrane bioreactor-microfiltration with magnesium-based draw solute for salinity reduction and phosphorus recovery. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 124, p. 169-175, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.05.022>
- COSTA, F.C.R.; FORTES, A.R.; BRAGA, C.D.; ARCANJO, G.S.; GROSSI, L.; MOUNTEER, A.M.; MORAVIA, W.G.; KOCK, K.; DREWES, J.E.; RICCI, B.C.; AMARAL, M.C.S. Assessment of a hybrid UV-LED-membrane distillation process: Focus on fouling mitigation. *Separation and Purification Technology*, v. 292, 121003, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121003>
- CRUTCHIK, D.; SÁNCHEZ, A.; GARRIDO, J. M. Simulation and experimental validation of multiple phosphate precipitates in a saline industrial wastewater. *Separation and Purification Technology*, v. 118, p. 81-88, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.06.041>
- GU, Y.; CHEN, L.; NG, J.-W.; LEE, C.; CHANG, V.W.-C.; TANG, C.Y. Development of anaerobic osmotic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment at mesophilic condition. *Journal of Membrane Science*, v. 490, p. 197-208, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.04.032>
- JIA, G.; ZHANG, H.; KRAMPE, J.; MUSTER, T.; GAO, B.; ZHU, N.; JIN, B. Applying a chemical equilibrium model for optimizing struvite precipitation for ammonium recovery from anaerobic digester effluent. *Journal of Cleaner Production*, v. 147, p. 297-305, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.116>

- KIM, B.; GWAK, G.; HONG, S. Review on methodology for determining forward osmosis (FO) membrane characteristics: Water permeability (A), solute permeability (B), and structural parameter (S). *Desalination*, v. 422, p. 5-16, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.006>
- LOU, Y.; YE, Z.-L.; CHEN, S.; WEI, Q.; ZHANG, J.; YE, X. Influences of dissolved organic matters on tetracyclines transport in the process of struvite recovery from swine wastewater. *Water Research*, v. 134, p. 311-326, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.010>
- LUO, W.; HAI, F.I.; PRICE, W.E.; GUO, W.; NGO, H.H.; YAMAMOTO, K.; NGHIEM, L.D. Phosphorus and water recovery by a novel osmotic membrane bioreactor-reverse osmosis system. *Bioresource Technology*, v. 200, p. 297-304, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.029>
- MAENG, S.K.; CHOI, B.G.; LEE, K.T.; SONG, K.G. Influences of solid retention time, nitrification and microbial activity on the attenuation of pharmaceuticals and estrogens in membrane bioreactors. *Water Research*, v. 47, n. 9, p. 3151-3162, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.014>
- MOIDEEN, S.N.F.; KRISHNAN, S.; LI, Y.-Y.; HASSIM, M.H.; KAMYAB, H.; NASRULLAH, M.; DIN, M.F.M.; HALIM, K.A.; CHAIRPRAPAT, S. Performance evaluation and energy potential analysis of anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) in the treatment of simulated milk wastewater. *Chemosphere*, v. 317, 137923, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137923>
- OBEROI, A.S.; SURENDRA, K.C.; WU, D.; LU, H.; WONG, J.W.C.; KUMAR KHANAL, S. Anaerobic membrane bioreactors for pharmaceutical-laden wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, v. 361, 127667, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127667>
- QIU, G.; LAW, Y.-M.; DAS, S.; TING, Y.-P. Direct and complete phosphorus recovery from municipal wastewater using a hybrid microfiltration-forward osmosis membrane bioreactor process with seawater brine as draw solution. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 10, p. 6156-6163, 2015. <https://doi.org/10.1021/es504554f>
- QIU, G.; TING, Y.-P. Direct phosphorus recovery from municipal wastewater via osmotic membrane bioreactor (OMBR) for wastewater treatment. *Bioresource Technology*, v. 170, p. 221-229, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.103>
- QIU, G.; ZHANG, S.; SRINIVASA RAGHAVAN, D.S.; DAS, S.; TING, Y.-P. The potential of hybrid forward osmosis membrane bioreactor (FOMBR) processes in achieving high throughput treatment of municipal wastewater with enhanced phosphorus recovery. *Water Research*, v. 105, p. 370-382, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.017>
- RICCI, B.C.; SKIBINSKI, B.; KOCH, K.; MANCIEL, C.; CELESTINO, C.Q.; CUNHA, I.L.C.; SILVA, M.R.; ALVIM, C.B.; FARIA, C.V.; ANDRADE, L.H.; LANGE, L.C.; AMARAL, M.C.S. Critical performance assessment of a submerged hybrid forward osmosis - membrane distillation system. *Desalination*, v. 468, 114082, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114082>
- VINARDELL, S.; BLANDIN, G.; FERRARI, F.; LESAGE, G.; MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ASTALS, S. Techno-economic analysis of forward osmosis pre-concentration before an anaerobic membrane bioreactor: Impact of draw solute and membrane material. *Journal of Cleaner Production*, v. 356, 131776, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131776>
- WANG, P.; CHUNG, T.-S. Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. *Journal of Membrane Science*, v. 474, p. 39-56, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.09.016>
- YAO, M.; DUAN, L.; WEI, J.; QIAN, F.; HERMANOWICZ, S.W. Carbamazepine removal from wastewater and the degradation mechanism in a submerged forward osmotic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, v. 314, 123732, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123732>
- ZHANG, H.; GAO, Z.; ZHANG, L.; SONG, L. Performance enhancement and fouling mitigation by organic flocculant addition in membrane bioreactor at high salt shock. *Bioresource Technology*, v. 164, p. 34-40, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.053>