



OSMOSE DIRETA PARA A CONCENTRAÇÃO DE MICROALGAS: COMPARAÇÃO DE FLUXOS DE PERMEADO EM DIFERENTES SOLUÇÕES DE CULTIVO

Katerine Botero Ñañez⁽¹⁾

Doutoranda e Mestre em Geoquímica, Petróleo e Meio Ambiente pela Universidade Federal da Bahia (UFBA);
Graduada em Química pela Universidade da Amazonia (UDLA).

Ingrid Almeida Santiago⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Cindy Brito Santos⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Ícaro Thiago Andrade Moreira⁽⁴⁾

Biólogo, Mestre e Doutor em Geoquímica, Petróleo e Meio Ambiente pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Professor Adjunto no Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.

Gemima Arcanjo Santos⁽⁵⁾

Engenheira Ambiental, Mestre e Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Professora Adjunta no Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.

Endereço⁽¹⁾: Rua Professor Aristides Novis, Número 02, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Federação - Salvador - Bahia - Brasil - CEP: 40210-613 - País - Tel: +55 (71) 3283-9452 - e-mail: gemima.arcanjo@ufba.br.

RESUMO

Este estudo aborda o efeito do fluxo de permeado através da pressão osmótica de uma solução de cloreto de sódio para concentrar biomassa microalgal com alto valor agregado no processo da osmose direta. Tecnologias físico-químicas para a separação de biomassa, como filtração, floculação e centrifugação, são energeticamente custosas, além de poder afetar a qualidade da biomassa e ter baixo índice de recuperação, apresentando desafios nas etapas de pesquisa e conseqüentemente para a indústria. Assim, o estudo investiga a osmose direta (OD) como alternativa, demonstrando sua eficiência no tratamento de efluentes, especialmente na concentração de biomassa microalgal. A metodologia envolveu quatro testes com diferentes soluções de alimentação, incluindo água destilada, microalgas cultivadas em meio de cultivos: sintético (Conway), microalgas cultivadas em esgoto doméstico e só esgoto doméstico (sem microalgas). A membrana de OD foi usada para avaliar o fluxo de permeado em cada teste ao longo de 24 horas. Os resultados mostraram uma redução no fluxo de permeado quando a solução de alimentação não foi água destilada, atribuída à presença de microalgas na solução e à composição do esgoto, como a presença de sólidos totais dissolvidos que afeta a pressão osmótica desta solução. No entanto, o teste com microalgas cultivadas em esgoto apresentou uma redução menos significativa no fluxo de permeado, sugerindo que as microalgas podem mitigar os efeitos negativos do esgoto na membrana de OD.

PALAVRAS-CHAVE: Processos de separação por membranas, tratamento de esgoto, recuperação de biomassa, pressão osmótica, fluxo de permeado.

INTRODUÇÃO

As microalgas têm o potencial de viabilizar processos mais sustentáveis no tratamento de águas residuárias, pois esses microrganismos são de fácil adaptação às condições ambientais, não demandam o uso de água potável para seu crescimento, são capazes de crescer em diferentes efluentes (domésticos, agrícolas e industriais), utilizam o CO₂ presente na atmosfera ou até o carbono orgânico dissolvidos nas águas para seu processo fotossintético e na síntese de biomassa, contribuindo também para a diminuição dos gases de efeito estufa e proporcionando ainda a geração de produtos de alto valor agregado a partir dos elementos que compõe a biomassa (Oliveira et al., 2019). O crescimento da biomassa de microalgas em esgotos de forma suspensa é o mais usado por apresentar maior taxa de transferência de massa. Entretanto, a recuperação da biomassa, para

umentar a concentração de sólidos até 150 g/L, após o tratamento eleva os custos do processo (Mkpuma et al., 2022). As tecnologias tradicionais para o tratamento de separação de biomassa incluem filtração, flotação, coagulação, combinados ou não, sedimentação e centrifugação (Yazdanabad et al., 2021). Entretanto, são processos de alto consumo energético ou que requerem uso de aditivos químicos, o que pode exercer influência negativa na qualidade da biomassa e tendo menores rendimentos dela.

O processo de osmose direta (OD) vem sendo investigado para o tratamento de diversos tipos de efluentes pois supera as principais desvantagens dos PSM convencionais. A OD é o transporte de água de uma solução com baixa pressão osmótica (alimentação) para uma solução com alta pressão osmótica (solução osmótica - SO) por uma membrana semipermeável (Cath et al., 2006; Wang et al., 2016). A força motriz do processo é a diferença de pressão osmótica entre a alimentação e a SO, sem a necessidade de pressão hidráulica, o que reduz o consumo de energia e a tendência à incrustação (Zhao et al., 2012). Para a concentração de biomassa de microalgas, como resultado do gradiente osmótico ($\Delta\pi$), a água passa pela membrana de OD e as células de microalga ficam concentradas do lado da alimentação até que o balanço osmótico seja atingido. Além disso, como a OD apresenta elevada rejeição de compostos dissolvidos, por utilizar uma membrana não-porosa, torna-se uma relevante alternativa para o tratamento de esgotos, visando à recuperação de água e remoção de compostos dissolvidos, além da possibilidade de concentrar biomassa de microalgas com alto valor agregado.

OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é comparar o desempenho da osmose direta para a concentração de biomassa microalgal com alto valor agregado, em meio sintético e em esgoto doméstico.

METODOLOGIA

Foram realizados quatro testes com soluções de alimentação diferentes, dois meios sem microalgas (esgoto e água destilada) e dois meios de cultivos com microalgas (sintético e esgoto). Os testes foram denominados: FS1 – água destilada; FS2 - microalga cultivada em meio Conway; FS3 - microalga cultivada em esgoto doméstico; FS4 - esgoto doméstico. A microalga utilizada nos testes foi *Chlorella vulgaris*, obtido do laboratório GBLAB-UFBA, o meio Conway com composição de nutrientes totais no meio é: EDTA 45g/L, FeCl₃.6H₂O 1,3g/L, MnCl₂.4H₂O 0,36g/L, H₃BO₃ 33,6g/L, NaH₂PO₄.2H₂O 20g/L, NaNO₃ 100g/L, ZnCl₂ 2,1g/100mL, CoCl₂.6H₂O 2g/100mL, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O 0,90g/100mL, CuSO₄.5H₂O 2g/100mL. O esgoto doméstico utilizado foi obtido da cidade de Mucugê, Bahia, BR. A solução osmótica trabalhada foi uma solução de NaCl 2M. A membrana de osmose direta, da Hydration Technology Innovations, tinha uma área efetiva de 0,00738 m², o sistema foi montado de acordo com Arcanjo et al. (2021) e conforme mostrado na Figura 1. Foi utilizado um volume de 800 mL para a solução de alimentação e um volume de 1L para a solução osmótica. O módulo de acrílico continha a membrana de OD, e duas bombas de diafragma faziam com as a solução de alimentação e a solução osmótica circulassem em contracorrente. Os experimentos foram realizados durante 24 horas, monitorando o valor da massa da solução osmótica e da alimentação, além da condutividade de ambos, em intervalos de tempo. A quantificação do número de células de microalgas foi determinada no início e final do experimento através da leitura da absorbância a 680 nm e logo correlacionando o valor com a curva de absorbância versus concentração de células por mL. Para a determinação de nitrato e nitrito foi feita pelo método SM4500B, SM4110B respectivamente (APHA, 2012), nitrogênio amoniacal e fosforo total, foram feitos por cromatografia iônica, sódio total e cloretos foram feitos pelo método SM3120B, SM4500B, respectivamente (APHA, 2012)

O cálculo do fluxo de permeado foi realizado seguindo a equação.

$$J = \frac{mt_2 - mt_1}{(t_2 - t_1) \times A_m} \quad \text{equação (1)}$$

Sendo m a massa da solução osmótica para os tempos t_2 e t_1 e A_m a área efetiva da membrana.

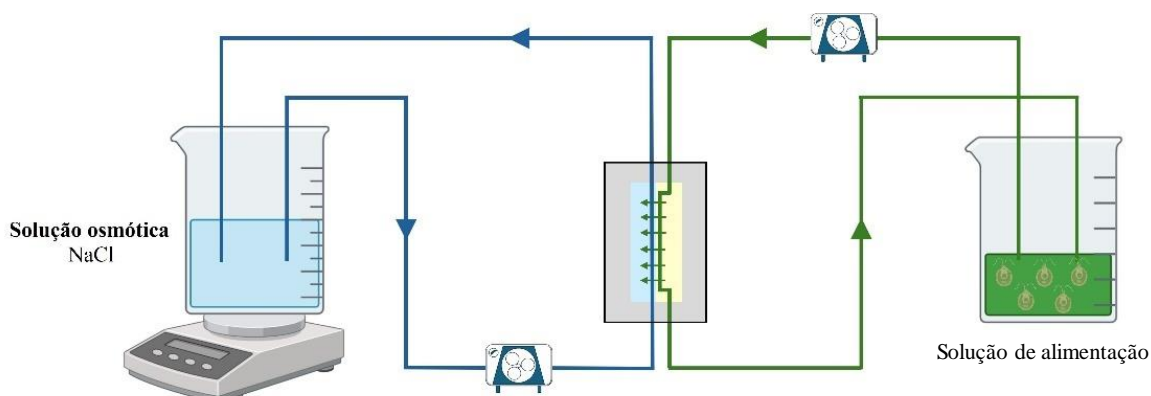


Figura 1: Esquema do sistema de concentração de biomassa microalgal com membrana de osmose direta.

RESULTADOS OBTIDOS

De acordo com a Tabela 1 e ilustrado na Figura 2, o fluxo de permeado (J) para teste realizado somente com água foi de 5,07 kg/m²h. Quando o ensaio foi realizado com microalgas como solução de alimentação, FS2, J caiu para 1,85 kg/m²h, que pode ser resultado da presença da biomassa no meio de cultivo, responsável por aumentar a pressão osmótica da alimentação e diminuir a diferença de pressão osmótica no processo, mas também pela concentração de microalgas, que promove uma resistência à passagem de água na membrana. No ensaio FS3, quando a alimentação utilizada foi as microalgas cultivadas no esgoto, J não teve um decaimento muito maior que no ensaio FS2, apresentando valor de 1,73 kg/m²h. Para avaliar o desempenho da osmose direta tratando somente esgoto doméstico, foi realizado o teste FS4, em que o resultado de J foi similar ao FS2, e igual a 1,89 kg/m²h.

Tabela 1: Fluxo de permeado para os ensaios com e sem microalgas.

TESTE	J(kg/m ² h)
FS1 - água destilada	5,07
FS2 - microalgas em meio Conway	1,85
FS3 - microalgas em esgoto	1,73
FS4 - esgoto	1,89

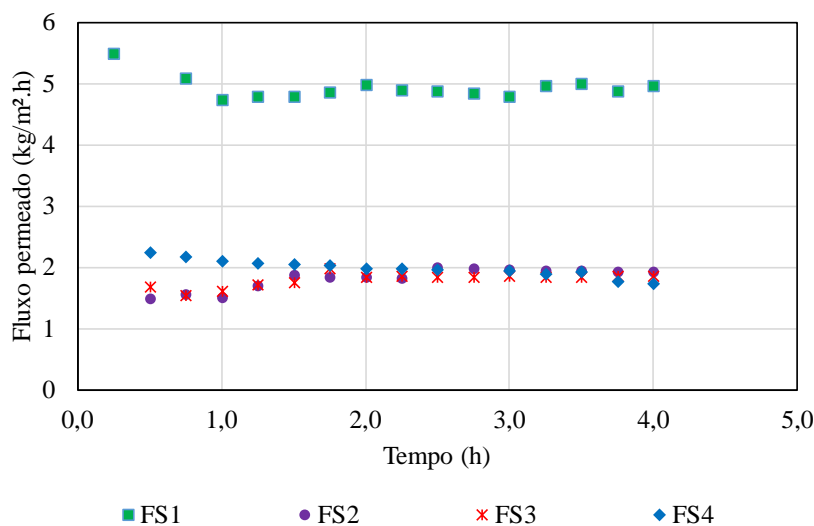


Figura 2: Fluxo permeado para a FS1, FS2, FS3 e FS4.



ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A redução no fluxo de permeado quando a solução de alimentação não é água destilada já era esperada, uma vez que a força motriz do processo de osmose direta diminui. Além disso, a concentração de microalgas, que se acumula na membrana de FO, pode formar uma torta, responsável pela incrustação da membrana.

O ensaio com microalgas cultivadas em esgoto, o decaimento do fluxo não foi tão elevado, mesmo considerando os efeitos dos componentes combinados. Por outro lado, as microalgas utilizaram os nutrientes do esgoto como substrato, o que amenizou a redução de J . Dessa forma, o uso de microalgas para o tratamento de esgotos, além dos benefícios de reciclagem de nutrientes, permite um menor impacto na membrana de osmose direta. A utilização da FO para o tratamento de esgoto também pode ser uma alternativa viável, mas a avaliação dos parâmetros físico-químicos é necessária, mesmo com a elevada rejeição teórica apresentada por membranas não-porosas.

Na Figura 1, para FS1 que utilizou água destilada como alimentação, foi registrada inicialmente cerca de $5,5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ e após 24 horas estabilizou em $5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$. Por outro lado, para FS2 e FS3, que tiveram microalgas na alimentação, sendo a FS2 microalgas em meio sintético, registrou-se fluxo de permeado inicial, após se estabilizar em 3,75 horas, cerca de $1,5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ e após 24 horas estabilizou em $1,9 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$. Já no ensaio FS3, com as microalgas cultivadas em esgoto, o fluxo iniciou em $1,7$ e terminou em $1,85 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$. Comparado com as outras soluções de alimentação, FS3 foi o que apresentou o menor fluxo, o que pode ser devido aos esgoto apresentarem elevada concentração de íons, como cálcio, magnésio, sódio, cloreto, fosfato, etc., que fazem com sua pressão osmótica seja maior que da água destilada, com consequente redução do $\Delta\pi$. A concentração de matéria orgânica e de material particulado também tem uma tendência à incrustação e redução do J (Wang et al., 2021). Comportamento semelhante ocorreu para FS4, que utilizou esgoto na alimentação, em que o J inicial foi de $2,24 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ e após 24 horas estabilizou em $1,89 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$.

A concentração inicial para FS2 foi de $2,35 \times 10^5 \text{ cell/mL}$ e finalizou com uma concentração celular de $1,96 \times 10^5 \text{ cell/mL}$. Por outro lado, para a FS3 iniciou com $5,25 \times 10^5 \text{ cell/mL}$ e finalizou com $6,56 \times 10^5 \text{ cell/mL}$; o que indica um aumento de 25% na concentração de biomassa após 24 h do experimento. Son et al. (2017) cultivaram a espécie de microalga *Chlorella* sp KR-1 em meio sintética, para a concentração da biomassa utilizando o processo de osmose direta durante 1,5 h com uma solução osmótica de 2M de NaCl e apresentaram resultados de 86% de desidratação para suas condições experimentais.

Buckwalter et al. (2013) cultivaram *C. vulgaris* em meio BG-11 e esgoto doméstico, e utilizaram NaCl 0,6M como solução osmótica para concentração, durante 4 horas. Os autores obtiveram fatores de concentração de 65% e 85%. Isto representou um aumento de cerca de 21% na concentração de algas por hora e uma duplicação da concentração em 2,4 h. Munshi et al. (2018) realizaram um teste conduzido durante um período prolongado de 170 h para a avaliação do fluxo do permeado e concentração de biomassa mediante osmose direta utilizando uma solução osmótica de 0,6 M de NaCl cultivando a microalga *C. vulgaris* em meio BBM. No final do primeiro lote de algas, em 70 h, 81% de desidratação foi alcançada com apenas 29% de queda de fluxo de um fluxo inicial de $4,1 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$. Em outro trabalho Zhou et al. (2021) em meio modificado enriquecido de selenita cultivaram *C. vulgaris* para a desidratação microalgal na osmose direta utilizando NaCl 1M como solução osmótica. Após 6 h de experimento, houve declínio no fluxo de permeado, diminuindo de 1,0 para 0,75, e durante a primeira hora do experimento, também se apresentaram acúmulos de incrustações na membrana.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A osmose direta emerge como uma alternativa eficaz para a separação de microalgas. Sua eficiência energética e capacidade de reduzir custos a tornam uma opção promissora para diversas aplicações industriais e ambientais, contribuindo significativamente para a sustentabilidade e a geração de bioprodutos de alto valor agregado. Os resultados obtidos com a aplicação da OD na concentração de biomassa microalgal e esgoto doméstico mostraram que este pode ser um processo viável, reduzindo o consumo energético. Os testes com microalgas cultivadas em esgoto sugerem que as microalgas podem reduzir o impacto dos esgotos na osmose direta. Isso sugere que a osmose direta pode ser aplicada com sucesso em diferentes cenários, incluindo a concentração de microalgas e o tratamento de esgoto. Em suma, os dados de fluxo de permeado fornecem resultados importantes sobre a eficácia da osmose direta em diferentes contextos. Os resultados de fluxo de permeado apresentados neste estudo reforçam que é necessário avaliar a concentração de microalgas cultivadas em outros meios de



cultivos como por exemplo, as diversas categorias de esgoto ou águas residuárias, uma vez que a maioria dos trabalhos reportados na literatura apresenta o cultivo de microalgas apenas em meio de cultivos. Também se pode sugerir para futuros trabalhos poder reportar o resultado em quantidade de biomassa e não só em porcentagem para ter uma maior informação do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo auxílio à pesquisa, e à UFBA pelo auxílio à pesquisa através do Programa de Apoio a Jovens Pesquisadores, e à UFBA e ao CNPq pelas bolsas PIBIC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARCANJO, G. S. et al. Forward osmosis as an opportunity for acid mining effluent reuse - An assessment of concentration polarization effects on forward osmosis performance and economic aspects. **Separation Science and Technology**, v. 56, n. 14, p. 2426–2438, 22 set. 2021.
2. APHA - American Public Health Association. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, Washington (USA). Ed. 22^a. 2012
3. BUCKWALTER, P., EMBAYE, T., GORMLY, S., TRENT, J.D. Dewatering microalgae by forward osmosis. **Desalination** 312, p. 19–22, 2013.
4. CATH, T. Y. Osmotically and thermally driven membrane processes for enhancement of water recovery in desalination processes. **Desalination and Water Treatment**, v. 15, n. 1–3, p. 279–286, mar. 2010.
5. MORE, T. T. et al. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. **Journal of Environmental Management**, v. 144, p. 1–25, 2014.
6. MKPUMA, V. O.; MOHEIMANI, N. R.; ENNACERI, H. Microalgal dewatering with focus on filtration and antifouling strategies: A review. **Algal Research**, v. 61, p. 102588, 2022.
7. MUNSHI, Faris M. et al. Dewatering algae using an aquaporin-based polyethersulfone forward osmosis membrane. **Separation and Purification Technology**, v. 204, n. April, p. 154–161, 2018.
8. OLIVEIRA, A. C. V.; SILVA, A. D. S.; MOREIRA, Í. T. A. ECONOMIA CIRCULAR: CONCEITOS E CONTRIBUIÇÕES NA GESTÃO DE RESÍDUOS URBANOS. **RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 3, n. 44, p. 273–289, 2019.
9. SON, J., SUNG, M., RYU, H., OH, Y.K., HAN, J.I. Microalgae dewatering based on forward osmosis employing proton exchange membrane. **Bioresource Technology**. 244, 57–62, 2017
10. WANG, X.; CHANG, V. W. C.; TANG, C. Y. Osmotic membrane bioreactor (OMBR) technology for wastewater treatment and reclamation: Advances, challenges, and prospects for the future. **Journal of Membrane Science**, v. 504, p. 113–132, abr. 2016.
11. YAZDANABAD, S. K. et al. Microalgae biomass dewatering by forward osmosis: Review and critical challenges. **Algal Research**, v. 56, p. 102323, jun. 2021.
12. WANG, J., Liu, X.,. Forward osmosis technology for water treatment: Recent advances and future perspectives. **Journal of Cleaner Production**. 280, 2021.
13. ZHANG, Jing et al. A critical review of characteristics of domestic wastewater and key treatment techniques in Chinese villages. **Science of the Total Environment**, v. 927, 2024.
14. ZHAO, S. et al. Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges. **Journal of Membrane Science**, v. 396, p. 1–21, abr. 2012.
15. ZHOU, HU. et al. Understanding the interaction mechanism of algal cells and soluble algal products foulants in forward osmosis dewatering. **Journal of Membrane Science**, v. 620, n. oct. 2021.