

Eficiência e sustentabilidade: o papel das membranas na filtração de resíduos de processos farmacêuticos.

DOI: 10.5281/zenodo.10558516

Bárbara Emília Ribeiro Alcântara^{a*}

The pharmaceutical industry uses a large amount of water in different stages of production, therefore, the effluents generated can contaminate drinking water matrices with emerging pollutants containing pharmaceuticals, which affect aquatic ecosystems and create a public health problem. Therefore, it is necessary to study and develop efficient and sustainable methods for removing these contaminants.

A indústria farmacêutica utiliza uma grande quantidade de água em diversas etapas da produção, assim, os efluentes gerados podem contaminar matrizes de águas potáveis com poluentes emergentes contendo fármacos, esses que afetam ecossistemas aquáticos e possibilitam a formação de um problema de saúde pública. Dessa forma, faz-se necessário o estudo e desenvolvimento de métodos eficientes e sustentáveis na remoção desses contaminantes.

^aUniversidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

*E-mail: barbaraemiliaalcantara@gmail.com

Palavras-chave: Membranas; filtração; resíduos farmacêuticos.

Recebido em 02 de dezembro de 2023,

Aceito em 18 de janeiro de 2024,

Publicado em 31 de janeiro de 2024.

Introdução

Nos últimos anos, o descarte de resíduos farmacêuticos em corpos d'água vem se tornando uma grande preocupação mundial devido a sua potencial toxicidade para o meio ambiente e os organismos aquáticos. Além disso, uma boa parte dessas substâncias ainda não está incluída em programas nacionais de monitorização de rotina, fato que dificulta a obtenção de um conhecimento mais aprofundado acerca da ecotoxicidade desses resíduos, como também os potenciais efeitos na saúde humana.^{1,2}

Nesse contexto, é necessário que antes da disposição final os efluentes sejam submetidos a tratamentos para a remoção de compostos contaminantes, a fim de evitar prováveis impactos negativos no solo, no ar e nas águas superficiais e subterrâneas. Assim, para a identificação, quantificação, controle e eliminação desses contaminantes emergentes, é fundamental estudar e analisar seus aspectos químicos, físicos e biológicos tais como concentração, pH, pKa e nível de persistência em ambientes aquáticos.³

Na literatura, são descritos diversos métodos para o tratamento de fármacos em efluentes, dentre eles, estão a eletrodegradação, a degradação biológica, a cloração, processos de oxidação avançados (AOPs) e adsorção através do uso de materiais como grafeno, óxidos de zinco, MOFs e zeólitas como adsorventes. Contudo, a remoção desses resíduos através de processos unitários de tratamento convencionais não é totalmente eficaz em muitos casos, uma vez que, mesmo com tratamento em nível terciário, não são

capazes de remover grande parte das substâncias que apresentam alta solubilidade em água e persistência às etapas de eliminação.^{2,3}

As membranas são barreiras seletivas que permitem a passagem de certas substâncias enquanto retêm outras e são comumente utilizadas em diversos processos de separação, incluindo a filtração. Essas podem ser fabricadas a partir de uma variedade de materiais, como polímeros, cerâmicas ou metais, e apresentam poros ou estruturas porosas que desempenham um papel crucial nos processos de filtração. Portanto, entre as tecnologias que têm sido aplicadas para remoção de produtos farmacêuticos em águas residuais, a separação por membranas fornece um processo simples em um ambiente menos controlado e com alta eficiência de remoção.¹

Nesse viés, a funcionalização de membranas com diferentes materiais oferece muitas vantagens no processo de filtração, principalmente nos processos de micro e ultrafiltração, em que podem ser utilizadas para a retenção de diversos micropoluentes. Ademais, essa é uma alternativa bastante promissora quando comparada aos processos de remoção clássicos devido a algumas vantagens como a diminuição da pegada de carbono, fácil adaptabilidade a requisitos específicos e a escalas diversas, além de alta efetividade e seletividade na retenção iônica. Tais características permitem a eliminação seletiva de um ou mais contaminantes específicos com maior clareza.^{2,3}

Igualmente, o uso de membranas no processo de filtração pode ser considerado mais sustentável que outras metodologias, visto que em muitas vezes requer menos energia em comparação com métodos convencionais de filtração, como a filtração por gravidade ou a filtração por pressão. Além disso, são resistentes e têm uma vida útil longa, o que reduz a necessidade de substituição frequente. O processo também pode ser realizado de forma contínua, de modo a permitir uma operação mais eficiente em comparação com métodos intermitentes. Outra vantagem ecológica é que a filtração por membranas pode reduzir a necessidade de produtos químicos adicionais para a separação de partículas, de forma a evitar o impacto ambiental associado ao uso de substâncias químicas. Por último, como citado anteriormente, a eficiência energética e a redução de resíduos associada a tal processo acarreta na diminuição da pegada de carbono de um processo industrial, tornando-o mais amigável ao meio ambiente.

Metodologia

Devido ao seu grande potencial nos processos de filtração, membranas com diversas características avançadas estão sendo introduzidas para lidar com águas residuais. Nesse sentido, diversos estudos são produzidos atualmente a fim de explorar a modificação da superfície das membranas como uma rota atraente para superar as deficiências encontradas nas mais variadas operações e melhorar a capacidade de rejeição de solutos das membranas existentes. Entre esses, os Biorreatores com Membranas (MBR) ganharam grande destaque nas últimas décadas.⁴

Os reatores de membrana são usados para controlar os produtos de reações químicas e podem consistir em um catalisador, uma enzima ou uma cultura de células. Um Biorreator de Membrana (MBR) é uma combinação de um processo de membrana como ultrafiltração e nanofiltração com um processo de lodo ativado. Assim como em outros equipamentos que fazem uso dessa tecnologia de membranas, alguns fatores precisam ser considerados no projeto como o tamanho dos poros da membrana, o processo de filtração e o método de limpeza da membrana que pode ter um impacto na incrustação da membrana.⁵

Nessa perspectiva, os poros desses biorreatores atuam como barreiras que impedem a passagem das partículas do poluente, retendo-as no reator, e permitem a permeação do efluente tratado. Esse método de filtração pode ser feito de duas maneiras, com a membrana submersa ou externa. No primeiro caso, o módulo das membranas possui duas

disposições, sendo uma dentro do tanque do próprio reator e a outra em um tanque separado; já na segunda montagem, o módulo é disposto em um tanque exterior ao biorreator.⁶

Em ambas as formas de montagem, o efluente a ser tratado é conduzido verticalmente pelos módulos de membrana de ultrafiltração através de bombas que mantêm o fluxo contínuo. Então, a matéria orgânica poluente fica retida na membrana e é posteriormente recirculada para o tanque de aeração, enquanto isso, o efluente tratado permeia os poros da membrana e segue para as próximas fases de tratamento. Esse filtrado é normalmente retirado por meio de uma bomba de sucção e enviado ao tanque de permeado onde pode ser reutilizado em outra operação. Após a finalização do processo, ocorre uma retrolavagem obrigatória para reduzir a incrustação da superfície da membrana, ademais, a água também é reciclada e volta ao biorreator para evitar perda de biomassa.^{5, 6}

Outra metodologia que também é comumente utilizada na filtração de resíduos gerados pela indústria farmacêutica é a Osmose Reversa. Esse processo ocorre quando um solvente é separado de um soluto de baixa massa molecular por uma membrana permeável ao solvente e impermeável ao soluto. Isso só é possível ao se aplicar uma grande pressão sobre este meio aquoso, o que contraria o fluxo natural da osmose. Desse modo, a água passa através da membrana por força de uma pressão hidráulica e a membrana seleciona as partículas e não permite que atravessem materiais com um peso molecular específico. É uma aplicação vantajosa, pois apresenta a capacidade de retirar a maioria dos tipos de contaminantes, como íons, contaminantes orgânicos, colóides e partículas.⁷

Resultados e discussão

Ao comparar o Biorreator com Membrana (MBR) com outras técnicas de filtração mais convencionais, observou-se que o MBR possui algumas vantagens, tais como maior eficiência de remoção com melhor controle do processo, menor pegada, protegendo assim o meio ambiente, maior eficiência de remoção, portanto, aumento de pureza. Além disso, o amontoamento de lodo não é um problema e há demanda combinada de oxigênio químico (DQO), remoção de sólidos e nutrientes em uma única unidade. Entretanto, o MBR tem alta necessidade de energia para a filtração por membrana e apresenta uma grande quantidade de concentração de biomassa devido à qual é necessária uma alta taxa de consumo de oxigênio e deposição de torta de lodo na superfície da membrana.⁵

Tabela 1. Benefícios e desvantagens de um MBR em comparação com as técnicas convencionais de tratamento.

Benefícios	Desvantagens
Pequena pegada	Grande quantidade de concentração de biomassa
Melhor controle do processo	Alto custo de manutenção e operação
Maior eficiência de remoção	Alta necessidade de energia
Planta de pequeno porte	Maior consumo de oxigênio
Baixa produção de lodo	Deposição de torta de lama na superfície da membrana

Além desse ponto, estudos feitos aplicando o método de tratamento MBR para efluentes farmacêuticos contendo diversos fármacos demonstraram eficiência de remoção de 98,7% para SST e 90,4% para DQO total. Algumas das principais substâncias farmacêuticas presentes no efluente tratado e a taxa de remoção das mesmas estão citadas na Tabela 2.⁶

Tabela 2. Substâncias farmacêuticas e suas taxas de remoção.

Substância	Taxa de remoção (%)
Naproxeno	99,3
Cetoprofeno	91,9
Ibuprofeno	99,8
Diclofenaco	87,4
Paracetamol	64,6
Glibenclamida	47,3
Bezafibrato	95,8

Os resultados da Tabela 2 foram obtidos mediante uma análise geral em um corpo d’água que continha diversos compostos provenientes de variados fármacos. Contudo, uma análise específica de cada substância separadamente utilizando essa metodologia mostra um aumento no valor da taxa de remoção de certos fármacos, como o Paracetamol, por exemplo. Após ser degradado biologicamente em uma incubadora shaker operando a 25 °C e 150 rpm por 48 h e posteriormente filtrado, foi possível obter uma remoção de 100% do Paracetamol na amostra.⁵

Conclusões

Por meio dessa revisão, é notável que a indústria farmacêutica gera uma quantidade de efluentes significativa, além disso, identificou-se que as diversas substâncias que compõem esses resíduos possuem características e particularidades. Dessa forma, antes de serem enviados para os corpos hídricos ou para uma rede coletora, é necessário que seja empregado um tratamento eficaz que reduza os níveis de poluentes e consequentemente os impactos negativos sobre o meio ambiente e os seres vivos.

O uso de membranas em processos de filtração de resíduos gerados por indústrias farmacêuticas representa uma abordagem sustentável para a purificação de efluentes. A aplicação de membranas oferece benefícios significativos, incluindo seletividade controlada, eficiência energética, redução de resíduos e operação contínua.

A seletividade das membranas permite a retenção de partículas indesejadas, de modo a assegurar o fornecimento de produtos mais puros e minimizar a geração de resíduos. Além disso, a economia de energia associada à filtração por membranas contribui para práticas industriais mais sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental e os custos operacionais. Ademais, a capacidade de operar de forma contínua é uma ferramenta inovadora na gestão eficiente dos resíduos industriais, especialmente em um setor tão sensível como o farmacêutico. A utilização de membranas na filtragem de resíduos não apenas atende às demandas de pureza e qualidade dos produtos, mas também promove a responsabilidade ambiental ao minimizar o desperdício de recursos e a emissão de poluentes.

Nessa ótica, no contexto da indústria farmacêutica, onde a qualidade dos produtos é crucial, a adoção de tecnologias de membranas para o tratamento de resíduos representa um passo significativo na direção a processos mais

limpos, seguros e orientados com os princípios de desenvolvimento sustentável. Portanto, a pesquisa contínua e implementação de inovações em tecnologias de membranas são essenciais para intervenções ainda mais eficientes, além de garantir a sustentabilidade dos processos de filtragem de resíduos na indústria farmacêutica.

Contribuições por Autor

A resenha do artigo de referência e a inclusão de certas observações são de Bárbara E. R. Alcântara.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Agradeço também ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 K. Banjerdtteerakul, H. Peng e K. Li, Membrana de nanofiltração baseada em COF para tratamento eficaz de águas residuais contendo resíduos farmacêuticos, *Journal of Membrane Science*, 2023, **681**, 121780.
- 2 A. A. L. S. Duarte, S. M. N. Ferreira, M. T. P. Amorim, Aplicação de membranas funcionalizadas na remoção de antibióticos, *Studies in Environmental and Animal Sciences*, 2022.
- 3 A. C. Spaciari, Tratamento de efluentes contendo Ibuprofeno utilizando membranas funcionalizadas, 2022.
- 4 A. Matin, N. Baig, D. Anand, I. Ahmad, M. Sajid e MS Nawaz, Membranas nanocompostas de película fina para remoção eficiente de contaminantes orgânicos farmacêuticos emergentes da água, *Environmental Research*, 2023, **237**, 116905.
- 5 MA Gulamhussein, B. Saini e A. Dey, Remoção de contaminantes farmacêuticos através de biorreator de membrana, *Materials Today: Proceedings*, 2023, **77**, 260–268.
- 6 C. A. Taraczkuk, Métodos aplicados no tratamento de efluentes oriundo da indústria farmacêutica: uma revisão da literatura, 2022.
- 7 T. S. Silva, Avaliação das metodologias de purificação de água na indústria farmacêutica nos últimos dez anos. Uma revisão da literatura, 2022.