

I- 239 - ÁGUA PARA TODOS: MEMBRANAS DE RECICLADAS DE BAIXO CUSTO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA NO PONTO DE USO

Victor Rezende Moreira ⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Lucilaine Valéria de Souza Santos ⁽¹⁾

Química pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Miriam Cristina Santos Amaral ⁽¹⁾

Professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço ⁽¹⁾: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP: 31270-901- Brasil - e-mail: victorrrznde.eng@gmail.com (Victor Rezende Moreira), lucilainevaleria@yahoo.com.br (Lucilaine Valéria de Souza Santos) mcsamaral@yahoo.com.br (Míriam Cristina Santos Amaral)

RESUMO

O acesso à água potável é uma necessidade humana fundamental para a saúde e o bem-estar, mas muitas pessoas em regiões remotas e isoladas têm acesso limitado à água tratada e geralmente pagam preços mais elevados. Para resolver esse problema, são recomendadas tecnologias simples e de baixo custo, como membranas recicladas acionadas por gravidade. Os processos de separação por membranas são capazes de fornecer água potável segura, independentemente da qualidade da água bruta, mas geralmente exigem bombas e energia elétrica. Assim, o objetivo deste trabalho é estabelecer uma rota de tratamento de água com membranas recicladas e de baixo custo para a dessedentação humana no ponto de uso. As membranas de osmose inversa em fim de vida foram recicladas usando um banho de hipoclorito de sódio para oxidar parcial ou completamente sua camada de poliamida. As membranas recicladas foram caracterizadas quanto à sua morfologia e composição e foram testadas em um sistema de ponto de uso para produzir água tratada que atende aos padrões nacionais de potabilidade. Os resultados mostraram que as membranas recicladas foram capazes de produzir 3.000 litros de água tratada sem decaimento de desempenho, sendo comparáveis aos módulos residenciais comerciais, mas com vantagens de não precisar de energia para produção de permeado. A retenção das espécies metálicas foi observada, assim como a formação de uma barreira dinâmica durante os experimentos de filtração. A baixa propensão a incrustação também foi observada para operação de longo prazo no ponto de uso. O estudo concluiu que o sistema de membranas recicladas é uma alternativa promissora para o tratamento de água em regiões mais isoladas, com baixo requisito energético e facilidade de implantação/operação, além de um baixo custo previsto que favorece o seu uso em áreas vulneráveis, regiões remotas e isoladas.

PALAVRAS-CHAVE: Abastecimento de água, regiões isoladas e remotas, reciclagem de membranas, membranas.

INTRODUÇÃO

Uma das necessidades humanas mais fundamentais para a saúde e o bem-estar é o acesso à água potável. Para garantir o acesso à água para todos, um dos objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidas pelas Nações Unidas, seria necessário quadruplicar as atuais taxas de progresso [1]. Três aspectos devem ser considerados em um contexto de provisão de água, são eles: a água precisa estar disponível; a água precisa ser acessível; e a água precisa ser suficientemente tratada. No entanto, essa não é necessariamente a realidade de grupos populacionais vivendo em locais remotos e isolados. O último disponibilizado pelas Nações Unidas revela o oposto: são pessoas com acesso limitado à água tratada e, quando disponível, tendem a pagar preços mais elevados, pois os custos unitários da prestação do serviço costumam aumentar com a distância [2]. O mesmo relatório recomenda tecnologias de simples, de baixo custo e independentes de energia elétrica como alternativas promissoras para atender a necessidade dessas regiões [2].

Assim, uma alternativa seria o uso de membranas recicladas acionadas por gravidade. Os processos de separação por membranas são reconhecidos pela sua robustez, capazes de fornecer água potável segura independentemente da qualidade da água bruta [3]. A força motriz nestes processos é uma pressão hidráulica exercida na corrente de alimentação, que por sua vez é convencionalmente promovida por bombas e energia elétrica. Por muitos anos, isso representou um impedimento para a aplicação de processos de separação por membranas em regiões isoladas, mas a oportunidade de trabalhar com membranas acionadas por gravidade abriu novas oportunidades.

O procedimento de reciclagem visa degradar a camada densa de membranas de osmose inversa em seu fim de vida. Os processos são simples, porém eficazes, e consistem na exposição da membrana a uma solução de hipoclorito de sódio. No Brasil, cerca de 21 mil elementos de osmose inversa foram importados em 2020 com vida útil de 6 – 12 meses [4]. O dado demonstra a magnitude do desafio de disposição a ser enfrentado, porém, se comprovada a estratégia de reciclagem e posterior aplicação desses sistemas para o tratamento no ponto de uso, então teríamos uma alternativa para evitar a disposição em aterros sanitários e garantir o fornecimento de água segura em regiões remotas e isoladas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer uma rota de tratamento de águas destinadas à dessedentação humana com o uso de membranas recicladas e de baixo custo com aplicação no ponto de uso.

MATERIAIS E MÉTODOS

Obtenção das membranas em fim de vida e procedimentos de reciclagem

Foram selecionadas membranas de osmose inversa em fim de vida (Dow® FilmTec TW30, 0,5 m²), previamente empregadas para o polimento da água após processos convencionais de coagulação-floculação e filtração lenta. Os módulos foram limpos com solução de ácido cítrico (pH 2,5) e hidróxido de sódio (0,2 wt %). Em seguida, o módulo de membrana foi imerso, sem sua desmontagem, em um banho comercial de hipoclorito de sódio (10 vol% ou ~110.000 ppm; pH 11) à temperatura ambiente (25 °C) e diferentes intensidades de contato (220.000–550.000 ppm h) para oxidação parcial ou completa de sua camada de poliamida. O procedimento de reciclagem foi controlado principalmente pela rejeição de salinidade e permeabilidade, medidos em laboratório (sistema representado na Figura 1).

Uma vez recicladas, as membranas foram caracterizadas quanto à sua morfologia e composição por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (Shimadzu IRAffinity-1; região 650–4000 cm⁻¹), microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia de dispersão de raios-X (EDS; JEOL JSM IT300) e tamanho de poro conforme recomendado pela ASTM F316-03. Análises de cromatografia gasosa e espectrometria de massa foram feitas para identificar possíveis subprodutos que poderiam estar presentes na água tratada e que teriam sido liberados das membranas após serem reciclados.

Ensaio no ponto de uso

O módulo reciclado foi instalado para aplicação no ponto de uso (Figura 1). A região é convencionalmente abastecida por água subterrânea, atendendo a demanda hídrica de 64 residências. A água subterrânea de alimentação e o permeado obtido após os experimentos de filtração foram analisados quanto aos padrões nacionais de potabilidade apresentados na Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, que incluíam parâmetros físicos, químicos e biológicos. Os experimentos de filtração foram realizados com restrição total

da saída de concentrado, conformação convencionada como operação “*dead-end*”. Assim, toda água subterrânea alimentada ao sistema é filtrada e convertida em permeado, sem a geração de uma corrente concentrada que demandaria formas adequadas para disposição. Foi avaliada a capacidade do sistema em produzir 3.000 L de água tratada, valor convencionado para a operação de sistemas comerciais empregados para o mesmo objetivo.

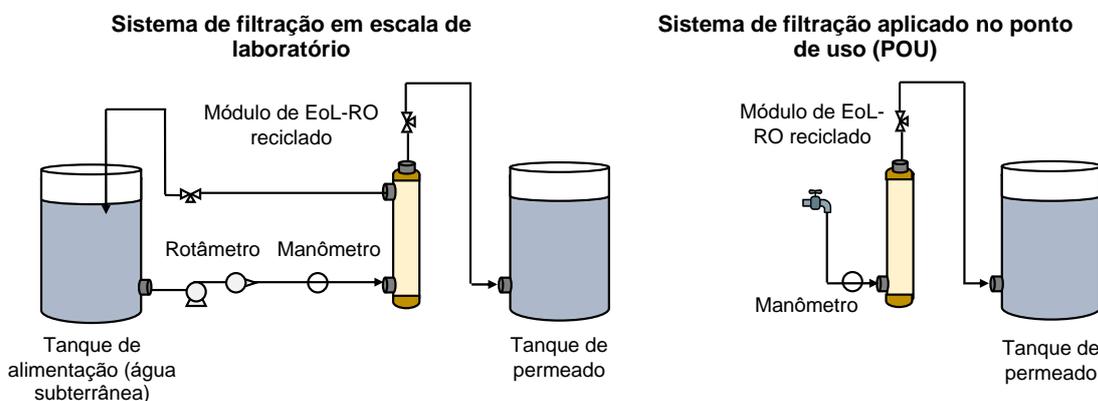


Figura 1. Representação do sistema de filtração em escala de laboratório e instalado no ponto de uso.

RESULTADOS

O módulo de membrana de osmose inversa em fim de vida apresentava permeabilidade média correspondente a 3,0 L/hm²bar. Após sua oxidação química o módulo apresentou permeabilidade de $79,1 \pm 5,8$ L/h.m²bar e rejeição de sal (NaCl 2,0 g/L) de $16,7 \pm 2,5\%$. O aumento da permeabilidade e a redução da rejeição salina estão associados às mudanças na camada seletiva da membrana. Os espectros de infravermelho mostraram bandas que foram previamente correlacionadas com a polissulfona (camada suporte) e poliamida (camada seletiva), levando à conclusão de que a membrana foi parcialmente oxidada. Além disso, os valores de permeabilidade e rejeição salina são semelhantes aos observados para membranas de UF, reforçando a ideia de que a membrana foi efetivamente convertida. Após a reciclagem, a membrana apresentou tamanho médio de poro de $0,04 \pm 0,01$ µm. Os cromatogramas e espectros de massa da água bruta e tratada apresentaram o mesmo perfil e fragmentos de massa, indicando que a membrana não teria liberado subprodutos para água tratada após sua reciclagem.

A água tratada ainda atingiu todos os parâmetros nacionais (109 no total) e internacionais (55 no total, estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde) exigidos para usos potáveis. Apesar da qualidade das águas subterrâneas, as membranas recicladas contribuíram para uma remoção adicional de 20 parâmetros (Figura 2): radioatividade beta total; bário; cobre; cromo; níquel; nitrato; N-NO₃/N-NO₂; acrilamida; cloraminas totais; clorato; cloro residual livre; cloreto; dureza total; ferro; manganês; monoclórobenceno; sódio; sólidos dissolvidos totais; sulfato e zinco.

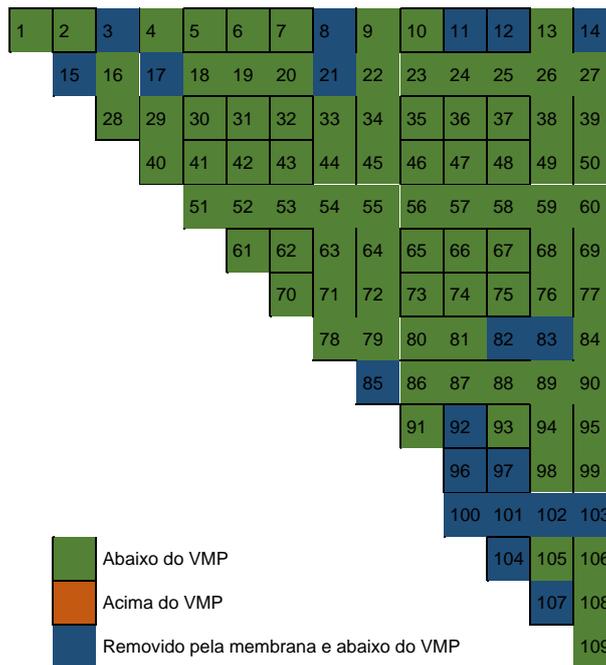


Figura 2. Padrões de potabilidade para o permeado gerado pela membrana reciclada. Permeado coletado ao final do ensaio de filtração, após gerado os 3.000,00 L de permeado. VMP: valor máximo de permitido para o contaminante.

Os resultados de fluxo, pressão transmembranar, resistência a filtração, turbidez e cor para o permeado gerado pela membrana reciclada são apresentados na Figura 3, e as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura na Figura 4.

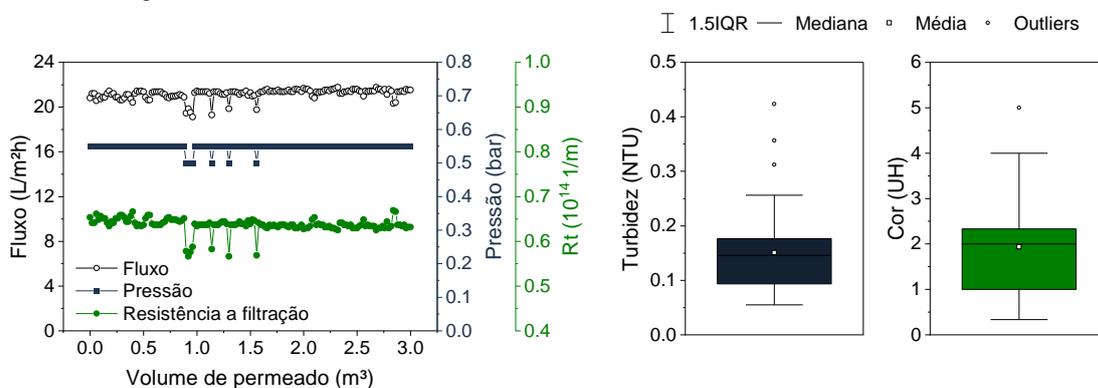


Figura 3. Dados de monitoramento para operação do módulo reciclado.

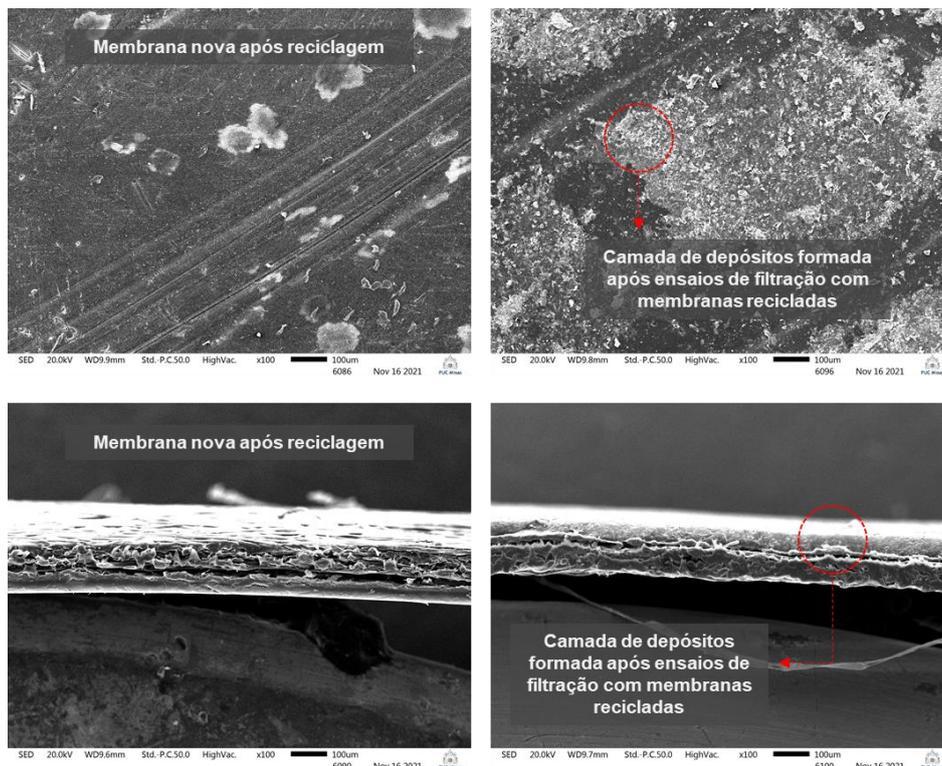


Figura 4. Micrografias das membranas novas (após reciclagem) e após os ensaios de filtração.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As membranas conseguiram de produzir 3,000 L de água tratada sem decaimento de desempenho (fluxo ou comprometimento da qualidade do permeado; Figura 3). Com base nos resultados, as membranas recicladas seriam comparáveis aos módulos residenciais comerciais, com as vantagens da não necessidade de energia para produção de permeado, favorecendo a aplicação no ponto de uso. Na mesma figura são apresentados os valores de turbidez e cor. Partículas em suspensão responsáveis pelos valores de turbidez na água tratada também podem atuar como carreadores de patógenos, espécies metálicas e metalóides, o que pode comprometer o fornecimento seguro de água potável [5,6]. A partir disso, seria importante garantir baixos valores de turbidez na água potável. Embora cor não seja uma grande preocupação para aplicações domésticas, os Padrões Secundários de Água Potável da EPA dos EUA recomendam valores de cor inferiores a 15 uH para água potável [7].

A maioria dos compostos retidos pela membrana (Figura 2) é reconhecida por seu impacto negativo na saúde humana devido à ingestão direta, como as espécies metálicas (cobre, cromo, zinco, bário e manganês) [8]. Outras espécies como ferro e cloraminas quando presentes na água tratada resultam em propriedades organolépticas indesejáveis. Apesar de sua menor toxicidade, o consumidor poderia optar por águas potencialmente mais tóxicas, porém ausentes dessas características indesejadas. Por essa razão, o teor de ferro e cloraminas também são aspectos importantes a serem monitorados. A retenção da maioria das espécies pode ser explicada por uma barreira dinâmica formada durante os experimentos de filtração. Tal barreira pode ser observada nas imagens apresentadas na Figura 4 [9].

Outra vantagem em relação à solução proposta seriam os custos. Uma comparação recente foi feita entre membranas comerciais e recicladas, reforçando os altos custos de aquisição e substituição de membranas comerciais quando aplicadas no tratamento de água [10]. Coutinho & Amaral [10] sugeriram que os módulos comerciais poderiam apresentar um custo de membrana de 980 US\$ por unidade (equivalente a 25,13 US\$/m²), que somado ao seu custo de substituição anual poderia representar um investimento de 1176 US\$. Por sua vez, as membranas recicladas em fim de vida apresentariam um custo de membrana de 8,53 US\$ por

unidade (equivalente a 0,22 US\$/m²), além dos ganhos ambientais relacionados ao reaproveitamento de uma membrana gasta.

CONCLUSÕES

A conformidade com os padrões de água potável é um ponto de preocupação para regiões remotas que lidam com o ônus da acessibilidade à água potável e a falta de sistemas de tratamento. A robustez, eficiência, baixo requisito energético e facilidade de implantação/operação desses sistemas são algumas das características que fazem do sistema de membranas recicladas uma alternativa promissora para o tratamento de água em regiões mais isoladas. A baixa propensão a incrustação também foi observada para operação de longo prazo no ponto de uso. Foi demonstrado que o sistema funcionaria efetivamente por 6 meses, atingindo um consumo diário de ~15 L de uma família de cinco membros (total de 3.000 L filtrados). Os dados de monitoramento demonstram um fluxo de permeado constante, sem uma tendência para seu decaimento. Esses resultados reforçam que as interrupções de limpeza não seriam necessárias e enfatizam as características de fácil utilização e baixa manutenção das membranas recicladas no ponto de uso. Ao final, foi possível produzir água filtrada e em conformidade com os 109 padrões de potabilidade analisados. O baixo custo previsto ainda favorece o seu uso em áreas vulneráveis, regiões remotas e isoladas, garantindo o abastecimento de água potável em direção ao cumprimento dos objetivos da agenda 2030 de desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] United Nations, The sustainable development goals report 2022, 2022. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>.
- [2] UNESCO, The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind, 2019.
- [3] E. Obotey Ezugbe, S. Rathilal, Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review, Membranes (Basel). 10 (2020) 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>.
- [4] L.B. Grossi, B.R.S. da Silva, E.F.O. Neves, L.C. Lange, M.C.S. Amaral, Reverse osmosis elements waste assessment: Screening and forecasting of emerging waste in Brazil, Desalination. 517 (2021) 115245. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115245>.
- [5] W.H.O. WHO, Water Quality and Health - Review of Turbidity: Information for regulators and water suppliers, 2017.
- [6] G.S. Bilotta, R.E. Brazier, Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, Water Res. 42 (2008) 2849–2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>.
- [7] U.S.E.P.A. EPA, Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals, (2021). <https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals> (accessed January 6, 2022).
- [8] K. Brindha, R. Paul, J. Walter, M.L. Tan, M.K. Singh, Trace metals contamination in groundwater and implications on human health: comprehensive assessment using hydrogeochemical and geostatistical methods, Environ. Geochem. Health. 42 (2020) 3819–3839. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00637-9>.
- [9] V.R. Moreira, Y.A.R. Lebron, E.C. de Paula, L.V. de S. Santos, M.C.S. Amaral, Recycled reverse osmosis membrane combined with pre-oxidation for improved arsenic removal from high turbidity waters and retrofit of conventional drinking water treatment process, J. Clean. Prod. 312 (2021) 127859. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127859>.
- [10] E. Coutinho de Paula, M.C. Santos Amaral, Environmental and economic evaluation of end-of-life reverse osmosis membranes recycling by means of chemical conversion, J. Clean. Prod. 194 (2018) 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.099>.