



II-174 - ÁGUA RENOVÁVEL NA MINERAÇÃO AURÍFERA: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS DE CONTATO DIRETO E COM FOLGA DE AR PARA A RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DE EFLUENTES

Victor Rezende Moreira

Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Lívia Maíra Carneiro Castro

Estudante de Engenharia Química na Universidade Federal de Minas Gerais.

Lucilaine Valéria de Souza Santos

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

Míriam Cristina Santos Amaral⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço⁽¹⁾: Av. Antônio Carlos, 6627 – Escola de Engenharia, Bloco 1 – 4º andar, sala 4629. Pampulha, Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. CEP: 31270-010. E-mail: miriam@desa.ufmg.br; mcsamaral@yahoo.com

RESUMO

A mineração de ouro é uma atividade que consome quantidades significativas de água, desde o processo de extração até o beneficiamento, impactando negativamente o meio ambiente e os recursos hídricos. Este estudo investiga a viabilidade da destilação por membrana (MD) para recuperar água dos efluentes da mineração de ouro, visando promover a sustentabilidade ambiental e econômica através do reúso da água. Foram avaliados dois tipos de MD: destilação por membrana de contato direto (DCMD) e destilação por membrana com intervalo de ar (AGMD). O desempenho de ambas as configurações foi comparado em termos de fluxo, eficiência térmica e consumo de energia. Os resultados demonstraram que a AGMD apresentou um desempenho superior, com maior eficiência energética e menor consumo específico de energia, apesar de ter um fluxo de destilado ligeiramente inferior ao da DCMD. A análise das características físico-químicas dos destilados mostrou que ambos os processos foram eficazes na remoção de contaminantes, com concentrações aceitáveis de metais como ferro e níquel. A AGMD foi identificada como a técnica mais recomendada para a recuperação de água de alta qualidade dos efluentes da mineração de ouro, devido ao seu melhor desempenho energético. Além disso, a AGMD oferece oportunidades para a recuperação de metais valiosos da corrente concentrada, contribuindo para uma abordagem mais holística da economia circular na indústria de mineração de ouro. Conclui-se que a utilização da AGMD não só permite a recuperação eficiente de água, mas também abre caminho para uma gestão mais sustentável dos resíduos, reduzindo o desperdício e a demanda por recursos naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de Efluentes, Ouro e Meio Ambiente, Membranas, Sustentabilidade na Mineração, Contaminantes Inorgânicos.

INTRODUÇÃO

A água está presente em todo o processamento do ouro, sendo usada desde o umedecimento das rochas para corte/perfuração, até o beneficiamento. Apenas nos EUA, em 2015, o consumo de água pela mineração atingiu 4000 Mgal/d [1]. Diante do elevado consumo de água pela mineração, conclui-se que a recuperação dessa



substância pelo tratamento residual permite o reciclo de água em todo o processamento do ouro e promove, no contexto da economia circular, uma maior sustentabilidade ambiental e econômica para a atividade aurífera.

Dentre as diferentes formas de recuperação da água proveniente de águas residuais, destaca-se a destilação por membrana (MD), um método de separação que utiliza diferenciais de temperatura como força motriz. O processo envolve uma mistura líquida contendo água e substâncias dissolvidas, que é aquecida para evaporar parcialmente os compostos voláteis. Utiliza-se uma membrana hidrofóbica que impede a penetração de seus poros pela fase líquida, ao passo que permite a passagem do vapor devido a um desequilíbrio na pressão de vapor através da sua estrutura. Essa diferença de pressão permite que o vapor penetre nos poros da membrana, resultando em duas correntes de saída: o líquido concentrado, que não a atravessa, e o vapor, que condensa após atravessá-la [2]

Um primeiro tipo de MD que pode ser usada para a recuperação de água é a destilação por membrana de contato direto (DCMD). Nela, o efluente e o destilado (água recuperada) estão em contato direto, separados pela membrana. Essa configuração apresenta maiores fluxos se comparado as outras, no entanto, devido o contato direto entre as fases de alta e baixa temperatura, há uma baixa eficiência energética.

Na destilação por membrana com intervalo de ar (AGMD), por outro lado, uma placa de metal é interposta entre a membrana e a superfície de condensação do vapor d'água. Esse intervalo de ar representa uma barreira à passagem do vapor de água, o que promove menores fluxos na AGMD; contudo, sua presença facilita uma distribuição superior de calor, reduzindo sua perda e aprimorando a eficiência da destilação. [2]

Nesse sentido, o presente estudo investiga os potenciais das destilações por membrana de contato direto (DCMD) e com intervalo de ar (AGMD) na recuperação sustentável de água para reuso, proveniente das águas residuais da mineração do ouro. Espera-se também compará-las, quanto aos fluxos, eficiência e qualidade, para identificar qual o melhor método para este tratamento de efluentes.

O presente estudo teve como objetivo reciclar membranas de osmose reversa no final de sua vida útil, visando a obtenção de membranas de nanofiltração. Isso representa a reutilização de membranas que atingiram o fim de sua vida útil devido à incrustação, formação de depósitos, degradação química e/ou física. Após o processo de reciclagem, as membranas foram validadas para o tratamento de água subterrânea, com a intenção de utilizá-las em regiões isoladas e remotas.

MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de efluente coletadas foram armazenadas a 4°C e levadas à temperatura ambiente antes dos experimentos. Todos os procedimentos de caracterização seguiram as recomendações descritas nos Métodos Padrão para Exame de Água e Esgoto [3] (íons metálicos: método 3111; pH: método 4500-H+; ácido sulfúrico: métodos 4500-H+ e 2310; e condutividade: método 2510).

Os experimentos utilizaram 2 L de efluente mantidas a uma temperatura constante de 60 °C e taxa de recirculação de 0,3 L/min. Água deionizada foi utilizada como solução de resfriamento, mantida a 25°C. O fluxo de destilado foi estimado usando uma balança analítica, monitorando incrementos de massa a intervalos de 2 minutos. Foi empregado uma membrana polimérica comercial (politetrafluoretileno ou PTFE) da Sterlitech® com uma área efetiva de 42,09 cm². A membrana possui um tamanho de poro de 0,2 µm, uma espessura de 170 µm e uma pressão de entrada de líquido de 3 bar.

Três métricas de desempenho foram empregadas para comparar as configurações. Os parâmetros avaliativos abrangeram o *gained output ratio* (GOR), eficiência térmica e consumo específico de energia (SEC). GOR (Equação 1), definido como a razão de calor atribuído à transferência de vapor de água para o calor total de entrada, assume valores inferiores ou iguais a 1 em cenários onde o calor latente permanece não recuperado.

$$GOR = \frac{\dot{m}_{dis} \lambda_{fg}}{\dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,in} - T_{f,o})} \quad (1)$$

Na Equação 1, \dot{m}_{dis} representa a taxa de fluxo de massa de destilado, \dot{m}_f a taxa de fluxo da alimentação, λ_{fg} o calor latente de vaporização do efluente, $T_{f,in}$ e $T_{f,o}$ às temperaturas de entrada e saída da alimentação, e $c_{p,f}$ sua capacidade térmica.

A Equação 2 fornece uma estimativa para a eficiência térmica (TE), onde K representa permeabilidade da membrana, ΔP_{vap} a diferença de pressão de vapor, h_f a entalpia de vaporização, k_m a condutividade efetiva da membrana [4], δ_m a espessura da membrana e $T_{f,m}$ e $T_{d,m}$ as temperaturas da alimentação e do destilado na superfície da membrana.

$$TE = \frac{K \cdot \Delta P_{vap} h_f (T_{d,m})}{B \cdot \Delta P_{vap} h_f (T_{d,m}) + \frac{k_m}{\delta_m} (T_{f,m} - T_{d,m})} \quad (2)$$

O consumo específico de energia (SEC; Equação 3) está relacionado à entrada total de energia, expressas por unidade de volume de destilado produzido. Na Equação 3, onde ΔP_{drop} a queda de pressão através do módulo de membranas, e η_p a eficiência da bomba, presumida como 0,75 [4].

$$SEC = \frac{\dot{m}_f \Delta P_{drop}}{\dot{m}_{dis} \cdot \eta_p} \quad (3)$$

RESULTADOS

O processo de destilação por membranas de contato direto apresentou fluxo médio de 8.4 L/m²h, enquanto o processo com folga de ar apresentou um valor médio inferior a este, correspondente a 6.6 L/m²h. Não foi observado decaimento de fluxo em nenhum dos processos, indicando a não formação de incrustação. Na Figura 1 são comparadas as variáveis de desempenho entre as duas técnicas, enquanto na Tabela 1 são apresentadas as características físico-químicas apresentadas pelo destilado obtido pelos dois processos.

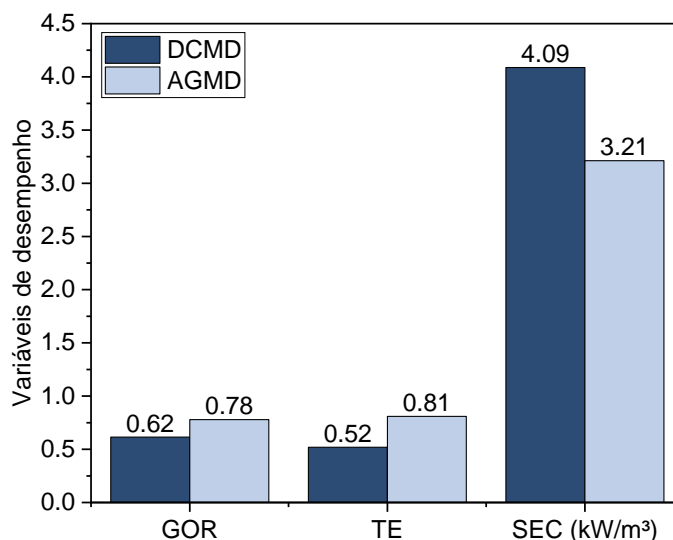


Figura 1: Comparação entre as variáveis de desempenho *gained output ratio* (GOR), eficiência térmica (TE) e consumo específico de energia (SEC) para a destilação por membranas com folga de ar (AGMD) e a destilação por membranas de contato direto (DCMD).



Tabela 1: Caracterização físico-química do efluente bruto da mineração de ouro e destilado obtidos a partir da destilação por membranas de contato direto (DCMD) e com folga de ar (AGMD).

Parâmetro	Efluente bruto	DCMD	AGMD
H ₂ SO ₄ (mmol/L)	19.5 ± 3.1	<0.05	<0.05
Ferro (mg/L)	916.5 ± 13.0	<0.5	24.4 ± 0.1
Magnésio (mg/L)	1873.1 ± 7.2	<0.5	<0.5
Manganês (mg/L)	102.8 ± 2.5	<0.5	<0.5
Cobre (mg/L)	202.9 ± 6.3	<0.5	<0.5
Níquel (mg/L)	239.8 ± 2.1	<0.5	2.5 ± 1.1
Cobalto (mg/L)	35.4 ± 0.9	<0.5	<0.5

A configuração de contato direto apresentou valores mais elevados se comparada a configuração com folga de ar. Nesta última, a folga de ar atua como uma camada de isolamento térmico, reduzindo a perda de calor da membrana e melhorando a eficiência térmica. No entanto, essa mesma camada de isolamento impõe uma maior resistência à transferência de massa, resultando em um menor fluxo de destilado.

Apesar dos menores fluxos, maior eficiência energética é observada para a configuração com folga de ar (Figura 1). Nesta configuração, observa-se uma maior eficiência térmica e valor para a variável GOR, juntamente com um menor consumo específico de energia. Apesar dos valores de GOR abaixo de um, a destilação por membranas com folga de ar apresenta uma maior eficiência energética aos maiores valores.

O coeficiente de eficiência térmica está alinhado com as expectativas para processos de destilação por membranas acionados termicamente. Duas alternativas para aprimorar a eficiência seriam mitigar a formação de incrustações na membrana e a polarização de concentração [5]. Como a formação de incrustações não foi observada, as ações devem se concentrar na redução da polarização de concentração, como o aumento na vazão de recirculação da corrente de alimentação.

No entanto, este aumento na vazão de recirculação pode resultar em um maior consumo específico de energia. A destilação por membranas de contato direto, apesar de ter um maior fluxo de destilado, apresentou um maior consumo específico de energia, principalmente atribuído aos requisitos de aquecimento e resfriamento para manter a força motriz devido as maiores trocas de calor que ocorrem nesta configuração. Embora esses resultados indiquem preocupações potenciais, o consumo de energia pode não ser um problema crítico em aplicações reais de destilação por membranas no tratamento de águas residuais da mineração de ouro. Para abordar isso, Moreira et al. [6] propuseram reutilizar o calor residual da água residual para manter temperaturas de alimentação mais elevadas, com o fluxo contínuo de água do processo fornecendo o destilado.

A Tabela 1 ilustra as características físico-químicas da alimentação e destilado. As altas rejeições observadas podem ser atribuídas ao fato de que apenas compostos voláteis podem passar pelos poros da membrana. Em comparação com outros elementos, as concentrações de ferro e níquel foram mais altas, embora ainda baixas e com baixo potencial de comprometimento do reúso desta corrente.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que tanto a DCMD quanto a AGMD permitem a recuperação de água de elevada qualidade, proveniente das águas residuais. Nos destilados, foram observados ferro e níquel em maiores concentrações, principalmente na AGMD, no entanto, essas concentrações ainda foram baixas e não prejudicam a reinserção da água recuperada no processamento do ouro ou em outras partes da indústria.



Comparando-se as duas técnicas, identificou-se, como esperado, que o fluxo médio de destilado proporcionado pela DCMD (8.4 L/m²h) foi maior que o da AGMD (6.6 L/m²h). Entretanto, a AGMD se sobressaiu significativamente com relação aos parâmetros de desempenho, apresentando um GOR mais elevado, melhor eficiência térmica e um menor consumo específico de energia.

Dessa maneira, especialmente em função do balanço energético, a AGMD foi o método mais recomendado por este estudo para a recuperação de água proveniente dos volumosos efluentes da mineração do ouro. Essa técnica é mais viável, porque não é necessário fornecer energia em abundância para manter as temperaturas da alimentação e da superfície de condensação, uma vez que estão parcialmente isoladas pela camada de ar. Seria possível ampliar a viabilidade energética da DCMD, por outro lado, caso houvesse o reaproveitamento do calor residual gerado por essa configuração.

Para situar a recuperação da água pela AGMD na economia circular, é válido detalhar, ainda, as possibilidades de aplicação da água e da corrente concentrada geradas. Para a água recuperada, é viável o retorno especialmente ao processo de beneficiamento, em operações como flotação, oxidação e lixiviação. Há registros de que, apenas na lixiviação de minérios com extração por solvente e eletroextração, são consumidos de 3 a 30 m³ de água/ton de metal recuperado [7], reforçando a aplicabilidade da corrente de destilado.

Ademais, com relação à corrente concentrada, é válido mencionar a sua riqueza em diversos metais, sendo alguns de elevado valor agregado como cobre, níquel e cobalto. Assim, essa corrente pode ser submetida a processos de extração para obtenção de metais, que atendam às indústrias de ligas, baterias, biossensores, entre outras. Conclui-se, portanto, que o uso da AGMD permite não apenas a recuperação eficiente de água, mas abre espaço para uma exploração mais aprofundada dos resíduos, evitando o desperdício e a extração excessiva de recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Pró-reitoria de Extensão da Universidade Federal de Minas Gerais (PROEX – UFMG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] USGS, “Mining water use,” <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/mining-water-use>.
- [2] Z. S. Tai, M. H. D. Othman, K. N. Koo, W. N. F. W. Mustapa, and F. Kadir Khan, “Membrane innovations to tackle challenges related to flux, energy efficiency and wetting in membrane distillation: A state-of-the-art review,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 39, p. e00780, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2023.e00780.
- [3] APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23th ed.), vol. 56, no. 4, 2017.
- [4] V. R. Moreira, Y. A. R. Lebron, D. Gontijo, and M. C. S. Amaral, “Membrane distillation and dispersive solvent extraction in a closed-loop process for water, sulfuric acid and copper recycling from gold mining wastewater,” *Chemical Engineering Journal*, p. 133874, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.133874.
- [5] V. T. Shahu and S. B. Thombre, “Air gap membrane distillation: A review,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, Jul. 2019, doi: 10.1063/1.5063766.



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



- [6] V. R. Moreira, J. V. Raad, J. X. Lazarini, L. V. S. Santos, and M. C. S. Amaral, “Recent progress in membrane distillation configurations powered by renewable energy sources and waste heat,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 53, p. 103816, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103816.

- [7] H. Wessman, O. Salmi, J. Kohl, P. Kinnunen, E. Saarivuori, and U.-M. Mroueh, “Water and society: mutual challenges for eco-efficient and socially acceptable mining in Finland,” *J Clean Prod*, vol. 84, pp. 289–298, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.026.