

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE OSMOSE REVERSA PARA PURIFICAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR RESÍDUOS MINERAIS

Franciele Roberta Munieweg¹; Michelle Santos²; Valdirio Alexandre Gadelha Segundo³; Caio Cefas da Nóbrega Souza⁴; Mônica Tejo Cavalcanti⁵; José Nilton Silva⁶;

ABSTRACT – Nos processos de tratamento e purificação de águas, buscam-se reduzir e/ou remover contaminantes como sólidos suspensos, orgânicos biodegradáveis, orgânicos voláteis, patogênicos, orgânicos refratários, nutrientes nitrogenados e fosforados, metais pesados, sais e sólidos dissolvidos orgânicos. Cada classe de contaminantes pode ser removido por diferentes operações e diferentes tecnologias. O objetivo desse trabalho é avaliar e aplicar as equações fundamentais do processo de filtração por membranas para o dimensionamento de um sistema de purificação de águas superficiais contaminadas por resíduos de rejeitos minerais formados por alumínio, sódio, chumbo. As membranas de osmose reversa podem ser classificadas quanto a recuperação de água por membranas modular, sólidos totais dissolvidos (STD), taxa de rejeição de sais e pressão de alimentação requerida. O dimensionamento de um sistema de membrana por osmose reversa foi realizado, resultando em um sistema para adequação de fluente contaminado com 269,8, 1.379,4 e 20, 7 mg.L⁻¹ de alumínio, sódio e chumbo, respectivamente. Por sua vez, a previsão da redução do teor de chumbo presente no efluentes foi possível apenas com um segundo passe de membranas de osmose reversa.

Palavras-Chave – tratamento de águas, osmose reversa, membranas.

¹) Universidade Federal do Pampa, R. Luiz Joaquim de Sá Britto, s/n - Universitário, Itaqui - RS, 97650-00, francielemunieweg1267@gmail.com (55) 996275691

²) Universidade Federal do Pampa, R. Luiz Joaquim de Sá Britto, s/n - Universitário, Itaqui - RS, 97650-00, michelesantos@unipampa.edu.br (55) 81389605

³) Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-90 valdirio.segundo@eq.ufcg.edu.br (83) 2101-1530

⁴) Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900

⁵) Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900

⁶) Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900, nilton@eq.ufcg.edu.br (83) 2101-1115

1 - INTRODUÇÃO

A humanidade busca a cada dia desenvolver tecnologias cada vez mais eficientes para obtenção de água tratada e purificada, associada a viabilidade socioeconômico. Nos processos de tratamento e purificação de águas, buscam-se reduzir e/ou remover contaminantes como sólidos suspensos, orgânicos biodegradáveis, orgânicos voláteis, patogênicos, orgânicos refratários, nutrientes nitrogenados e fosforados, metais pesados, sais e sólidos dissolvidos orgânicos. Cada classe de contaminantes pode ser removido por diferentes operações e diferentes tecnologias.

A aplicação da tecnologia dependerá do tipo de água, da finalidade do uso da mesma. Dentre o tipos e finalidade do uso da água tem-se: água potável para consumo humano, água ultrapura e água de reuso para processos industriais. A água potável, regulamentada pela Portaria 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), diz respeito ao uso direto e indireto para o consumo humana, além do uso para agricultura e agropecuária.

Dentre as tecnologias de tratamento e purificação estão os processos que usam filtração por membranas. As membranas são utilizadas para separar substâncias solúveis e insolúveis de águas residuais a partir da atuação de uma força que direciona o líquido a passar por uma membrana semipermeável. O uso de membranas nos processos pode ser classificado em função do tamanho das partículas que será separada, a saber: microfiltração, com retenção de partículas de até 0,1 micron, ultrafiltração (0,01 micron), nanofiltração (0,001 micron) e osmose inversa (0,0001 micron).

Nesse contexto, esse trabalho tem por objetivo aplicar as equações fundamentais para o processo de purificação de águas por processo de filtração por membranas de osmose reversa aplicadas ao tratamento e purificação de águas após contaminação por resíduos de rejeitos minerais.

2 - OBJETIVO

Avaliar e aplicar as equações fundamentais do processo de filtração por membranas para o dimensionamento de um sistema de purificação de águas superficiais contaminadas por resíduos de rejeitos minerais formados por alumínio, sódio e chumbo.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros relatos científicos sobre membranas semipermeáveis data de 1748, quanto Abbe Nollet observou o fenômeno de osmosis, Cheryan (1998). Em seguida outros trabalhos, incluindo Pfeffer e Traube, sobre o fenômeno osmótico usando membrana cerâmicas nos anos da década 1850. As atuais tecnologias de membranas datam da década de 1940, quando o Dr. Geral Hassler da Universidade da Califórnia de Los Angeles (UCLA) iniciou investigações das propriedades osmótica do celofane em 1948, Koenigsber (1998).

Em 1959, Reid e Breton da Universidade da Florida, demonstraram a capacidade de dessalinização do filme de acetato de celulose Kucera (2015). Eles avaliaram membranas semipermeáveis formadas por filmes poliméricos contendo hidrofílicos. Os pesquisadores concluíram que o acetato de celulose apresentou requisitos de propriedades de semipermeabilidades para aplicações práticas de purificação de águas com diferentes salinidades.

Na década de seguinte, Sidney Loeb e Srinivasa Sourirajan da UCLA desenvolveram trabalhos onde abordaram a osmose reversa, a partir da pressurização da solução diretamente contra um filme plástico plano Glater (1998). Esses trabalhos levaram ao desenvolvimento da primeira membrana de acetato de celulose assimétrica em 1960. Nos anos seguintes, um melhor entendimento do mecanismo de transporte foi importante para o desenvolvimento de membranas que exibiam melhores rendimentos de fluxo e rejeição de sais.

Em 1971, a DuPont patenteou uma membrana de poliamida aromática linear com grupos de ácidos sulfônicos pendentes. Tais membranas exibiam alto fluxo de água com pressões operacionais menores do que as membranas de acetato de celulose. Sendo em 1972, o surgimento das membranas de interface compósito poliamida, a partir das pesquisas de John Cadotte.

Até meados de 1999, diversas pesquisas levaram ao desenvolvimento de membranas com link cruzado de compósito poliamida aromática, buscando melhoria com a redução de pressão de operação, aumento do fluxo relativo e maior rejeição de sais, Kucera (2015). Além disso, outros desenvolvimentos são observados quanto a manutenção dos sistemas de osmose reversa, tais como antincrustantes, limpeza de membranas, redução de formação de biofilme Moreira e Carvalho (2017); Nakamura *et al.* (2015), Chester *et al.* (2013).

4 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo contínuo de purificação de água por osmose reversa é um movimento forçado de um solvente, geralmente água, através de uma membrana semipermeável, criando uma ou duas correntes a partir de uma corrente de alimentação do processo, como mostra a Figura 1. Esse processo tem por finalidade gerar uma corrente com maior concentração de soluto e outra com uma menor concentração de soluto.

Para aplicação de água com alto teor de partículas, a corrente de menor teor é a denominada água purificada ou permeada. No entanto, uma vez que esse processo não é espontâneo, se faz necessário a aplicação de uma força diretora para aumento da pressão na passagem da água pela membrana semipermeável (Kucera, 2015), que por sua vez podem ser realizados por bombas de alta pressão, juntamente com válvulas de restrição das vazões nas correntes de entrada e saída do sistema.

O processo de purificação de água pela técnica de osmose reversa tem como principal função a dessalinização, devido a porosidade da membrana menor que 0,0001 micron, permitindo a separação dos sais da água. Dentre as aplicações, pode-se citar: irrigação de plantações,

alimentação de caldeiras, produção de produtos químicos e hemodiálise, além da produção de água purificada para o consumo humana, denominada de água adicionada de sais (Anvisa, 2018).

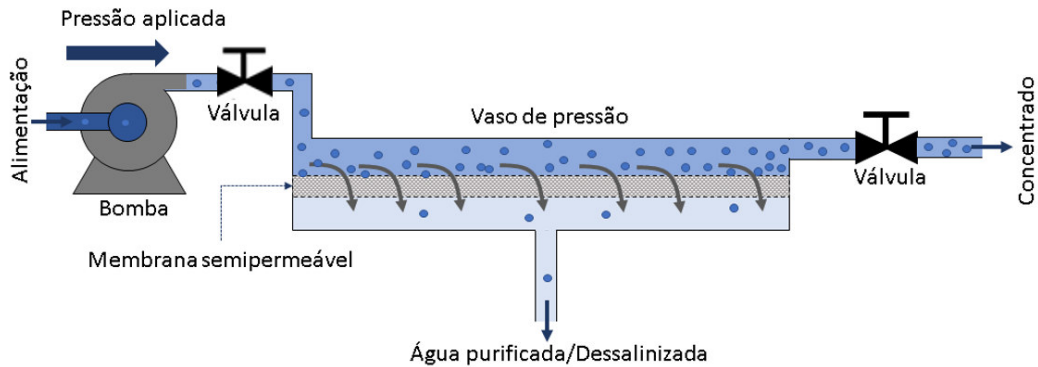


Figura 1 – Processo de purificação por osmose reversa (Fonte: autoria própria)

4.1 - Equações fundamentais

O dimensionamento de uma unidade de purificação de água por processo de separação de filtração por membranas dependerá da qualidade da água de alimentação, da qualidade da água purificada e a quantidade de água a ser produzida (Bergman, 2007). As equações de projeto de um sistema de osmose inversa podem ser descritas de acordo com as equações de 1 a 9.

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (1)$$

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2)$$

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (3)$$

$$F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (4)$$

$$F_s = K_s (C_m - C_p) = K_s \left(\frac{C_f + C_c}{2} - C_p \right) = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (5)$$

$$K_w = \frac{Q_p}{A (\Delta P - \Delta \pi)} \quad (6)$$

$$K_s = \frac{Q_p C_p}{A \Delta C} \quad (7)$$

$$\Delta C = (C_m - C_p) = \frac{C_f + C_c}{2} - C_p \quad (8)$$

$$C_p = \frac{K_s C_f}{K_w \Delta P + \Delta \pi \left(\frac{2 - 2R}{2R} \right) + K_s} \quad (9)$$

sendo, $Q_f [Lmin^{-1}]$ é a vazão volumétrica de alimentação (feed), $Q_p [Lmin^{-1}]$, a vazão de permeado, $Q_c [Lmin^{-1}]$, vazão de concentrado; R é a razão recuperada do produto; $F_w [Lmin^{-1}cm^{-2}]$ é o fluxo de água pela área de membrana, enquanto $F_s [Lmin^{-1}cm^{-2}]$, o fluxo do soluto; $K_w [Lmin^{-1}cm^{-2}atm^{-1}]$, é o coeficiente de transferência de massa de água, $K_s [cm.min^{-1}]$, o coeficiente de transferência de

massa para o soluto; ΔP [atm] é a pressão diferencial transmembrana, enquanto $\Delta\pi$ [atm], pressão osmótica diferencial transmembrana; A é a área efetiva da membrana; C_m [g L^{-1}] é a concentração na superfície da membrana, C_p [g L^{-1}], concentração do soluto no permeado, C_f [g L^{-1}] a concentração do soluto na alimentação, ΔC [g L^{-1}], a concentração diferencial.

O fluxo do solvente através da membrana é proporcionalmente linear a diferença efetiva de pressão através da membrana, além do mais, não haverá fluxo enquanto a pressão aplicada não excede a pressão osmótica da solução de alimentação (Kucera, 2015). Dessa forma, a medida que a pressão aplicada aumenta, progressivamente mais água passa pela membrana em relação ao sal. Para soluções suficientemente diluídas a pressão osmótica (π) pode ser dada pela equação 10.

$$\pi = mRTi \quad (10)$$

sendo π [atm], a pressão osmótica da solução, m [mols. m^{-3}] a concentração do soluto em solução em, R [atm.L $K^{-1}mol^{-1}$] a constante universal dos gases perfeitos, T [K], a temperatura e, i o fator de correção de Van't Hoff em mols de partículas.

A equação de Vant't Hoff mostra que a pressão osmótica de uma solução diluída é diretamente proporcional à concentração molar do soluto e, portanto, inversamente proporcional ao peso molecular do mesmo. A aplicação desta equação para soluções reais exige a introdução de correções análogas às aplicadas à equação dos gases perfeitos para torna-la válida a gases reais. A equação de Vant' Hoff pode ser escrita de acordo com a equação 11.

$$i = 1 + \alpha(q - 1) \quad (11)$$

sendo i , fator de correção de Vant't Hoff em mols de partículas, α , o grau de ionização e q o número total de íons liberados na ionização de um composto.

De acordo com a literatura, Dow Filmtec (2018a), as membranas de osmose reversa podem ser classificadas quanto a recuperação de água por membranas modular de 1 m, sólidos totais dissolvidos (STD), taxa de rejeição de sais e pressão de alimentação requerida. Na mesma literatura, a faixa de pressão de operação tem como referência a composição de sais na água de alimentação, podendo ser menor de 21 bar, para águas com STD menores que 1.000 mg.L $^{-1}$, e até 41 bar, para concentrações acima de 1.000 mg.L $^{-1}$, que por sua vez tem a taxa aumentada com o aumento da pressão de operação.

Por fim, o aumento da recuperação de água, o fluxo de permeado através da membrana vai diminuindo e interrompido quando a concentração salina atinge um valor no qual a pressão osmótica do concentrado é superior à pressão aplicada na corrente de alimentação, dessa forma a taxa de rejeição de sais também é reduzida com o aumento da recuperação de água. Por sua vez, a pressão necessária ao sistema define a potencia da bomba e por consequência os custos energéticos.

5 - METODOLOGIA

A consideração fundamental no desenvolvimento de um sistema de tratamento e purificação de águas utilizando filtração por membranas de osmose reversa é o dimensionamento dos seus componentes. Desta forma, para obtenção de uma unidade de purificação de água a partir de uma fonte de água contendo contaminantes minerais, a metodologia para o dimensionamento da membrana osmótica segue os seguintes passos: determinação da pressão osmótica, do fluxo do soluto, do fluxo do solvente, da perda relativa do soluto e da pressão requerida pelo sistema.

O efluente utilizado nesse estudo faz parte de águas de uma fonte superficiais contaminadas por rejeitos minerais contendo por alumínio, sódio e chumbo, com teores acima do valor máximo permissível, 269 mg.L^{-1} , 1.379 mg.L^{-1} e 20 mg.L^{-1} , respectivamente, além de um sólidos totais dissolvidos de 3.320 mg.L^{-1} . E com isso definiu-se a configuração adequada para o sistema de membranas.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água utilizada nesse estudo faz parte de uma bacia hídrica, com alterações nas águas superficiais devido ao vazamento de rejeitos minerais causados por uma indústria mineradora, apresentando altos níveis de alumínio, sódio e chumbo. A bacia hídrica abastece comunidades locais, e a fuga de rejeitos provocou impactos direto no fornecimento. Para estruturar uma solução de tratamento da água contaminada foi avaliada a aplicação de tecnologias de filtração por membrana de osmose reversa a partir da modelagem implementada em *Excel*[®], validada com a ferramenta de simulação *ROSA*[®] (Filmetec, 2018b).

Para o dimensionamento da membrana osmótica, alguns parâmetros devem ser considerados, sendo o principal a diferença de pressão osmótica, fluxo do permeado e o fluxo do concentrado. A diferença da pressão osmótica, obtida pela equação 10 e 11, e expressa na Tabela 1. A determinação da pressão osmótica é precedida da concentração das espécies químicas presentes.

Tabela 1 – Pressão Osmótica da água de alimentação do sistema

Concentração mg.L^{-1}		VMP*, mg.L^{-1}	$\pi(\text{atm})$
Alumínio	269,82	0,20	20,90
Sódio	1.379,39	200,00	
Chumbo	20,72	0,01	
TDS	1.650	1.000	

A partir do valor da pressão osmótica, a pressão do sistema deverá ser maior do que a pressão osmótica, para que o fluxo transmembrana inicie. Segundo a *Dow Filmetec* (2018a), para águas com total de sais dissolvidos (TDS) menor que 5.000 mg.L^{-1} , para taxas de rejeição de sais maiores que 95 %, a pressão do sistema poderá ser até 41 bar. Dessa forma, a pressão para o sistema a ser considerado será de 35 atm, por ser menor que a pressão recomendada, segundo a mesma referência para uso de membranas do tipo BW30. e assumindo 5 % maior que a pressão osmótica.

Considerando uma rejeição de sais de 98 %, e uma pressão de operação de 35 atm, ou 36,163 kgf/cm², a concentração de permeado, obtido a partir das equações de 1 a 9, resultam em concentração das espécies contaminantes alumínio e sódio abaixo dos valores máximos permissíveis, como expresso na Tabela 2. Por sua vez, a redução de chumbo não foi o suficiente para enquadrar o valor máximo permissível.

Tabela 2 – Especificações operacionais para o sistema

P _f (atm)	P _p (atm)	Q _f (L.min ⁻¹)	R (%)	Q _p (L.min ⁻¹)
35	1	55	50	27,50
Concentração no permeado				
	Permeado		VMP	Unidade
Alumínio	0,13		0,20	mg.L ⁻¹
Sódio	27,59		200,00	mg.L ⁻¹
Chumbo	0,41		0,01	mg.L ⁻¹
TDS	33,00		1.000,00	mg.L ⁻¹

Para a redução do teor de chumbo, se faz necessário adicionar um segundo passe na água de permeada, resultando em um sistema como mostra a Figura 2. Dessa forma, reduz o teor de chumbo de 0,41 mg.L⁻¹ para 0,008 mg.L⁻¹, mantendo a mesma rede de pressão no sistema.

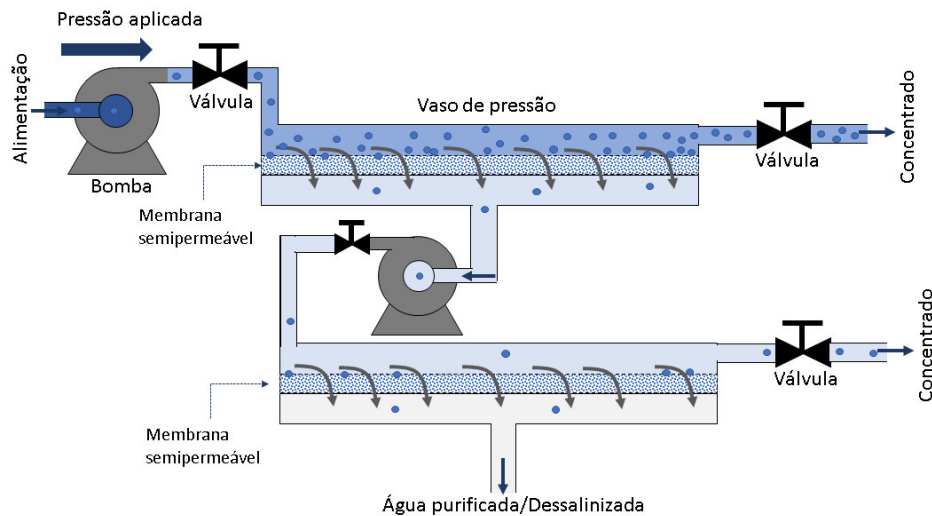


Figura 2 – Sistema projetado para purificação de água contaminada por altos teores de chumbo filtração por osmose reversa (Fonte: autoria própria)

Além da etapa de determinação da pressão osmótica, o dimensionamento do sistema completo de filtração por membrana, se faz necessário o dimensionamento do sistema de bombeamento: ponto de operação do sistema, perda de carga do sistema, potência do conjunto moto bomba; e, dimensionamento do sistema de pré-filtragem: concentração do material em suspensão, total do material em suspensão, esforço cortante crítico, índice de dureza e regime de fluxo. Além disso, pode-se incluir o pré-tratamento químico, buscando reduzir danos ao sistema de membranas, com a redução de incrustantes por carbonatos e sílica, e de formação de biofilmes.

7 - CONCLUSÕES

O dimensionamento de um sistema de membrana por osmose reversa foi realizado partir das as equações fundamentais do processo de filtração por membranas o qual possibilita a purificação de águas superficiais contaminadas por resíduos de rejeitos minerais formados por alumino, sódio e chumbo. Por sua vez, a previsão da redução do teor de chumbo para os níveis toleráveis pelo ministério da saúde presente no efluentes foi possível apenas com um segundo passe de membranas de osmose reversa.

8 - REFERÊNCIAS

- ANVISA. AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução da diretoria colegiada- RDC nº 182, 17 out. 2017. Disponível em: < www.anvisa.gov.br/legis > Acessado em: 13 de maio 2018.
- BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria n.º 2.914, de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre normas de potabilidade de água para o consumo humano. Brasília: SVS, 2011.
- CHERYAN, MUNIR, “Ultrafiltration and Microfiltration Handbook”, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 1998.
- CHESTER, S.P, PENA, N., GALLEGOS, S., ARMSTRONG, M. W., VIGO F. Del, “Result from 99 sea water RO membrane autopsies”, IDA Journal of Desalination and Water Reuse, Volume 5, 40-47, 2013.
- DOW FILMTECT. Brackish Water Reverse Osmosis. Disponível em: <<https://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/products/reverse-osmosis>> Acessado em: 15 de maio de 2018a.
- DOW FILMTECT. WAVE (Water Application Value Engine). Disponível em: <<https://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/design-software>>Acessado em: 2 de abril de 2018b.
- GLATER, JULIUS, “The Early Hist. of Reverse Osmosis Memb. Development” Desalination, 117 1998.
- GLATER, JULIUS, “The Early History of Reverse Osmosis Membrane Development,” Desalination, 117 (1998).
- KUCERA, J. Reverse osmosis: industrial processes and applications. Scrivener Publishing LLC, 2015.
- MOREIRA, P. H. B, CARVALHO. MÉTODO QUÍMICO DE REJUVENESCIMENTO DE MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA”, ARTIGO TÉCNICO, O PAPEL vol. 78, num. 3, pp. 69 - 75 MAR 2017.
- NAKAMURA, T., KAWAKATSU, T., HAYAKAWA, K., KATSUMI, M., MATOBA, Y., KAZUKI, I. “Innovative Chemicals for Deteriorated RO Membranes”, IDA Congress , 2015.
- REID, C.E. and E.J. Breton, “Water and Ion Flow Across Cellulosic Membranes,” Journal of Applied Polymer Science, vol 1, issue 2 (1959).
- BERGMAN, ROBERT, Reverse Osmosis and Nanofiltration, 2nd ed., American Water Works Association, Denver, CO, 2007.
- REID, C.E. AND E.J. BRETON, “Water and Ion Flow Across Cellulosic Membranes,” Journal of Applied Polymer Science, vol 1, issue 2, 1959.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho.