

# MODELAGEM ANÁLITICA PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA ACIONADOS POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Milton dos Santos Viana – milton.viana@gmail.com

Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com

Olga de Castro Vilela – ocv.olga@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco - Centro de Energias Renováveis

**Resumo.** Neste trabalho apresenta-se uma análise de sensibilidade do modelo analítico de Fraidenraich et al. (2016), concebido para analisar o desempenho de sistemas de osmose reversa acionados por energia solar fotovoltaica (OR – FV), tendo por objetivos: a obtenção do valor mínimo de pressão na entrada ( $P$ ) a partir do qual é possível a utilização do modelo para previsão de valores da concentração média do permeado ( $C_{pmédio}$ ) e da vazão do permeado ( $Q_p$ ) com o coeficiente de permeabilidade da membrana ( $k_{per}$ ) e o coeficiente de permeabilidade do soluto ( $k_s$ ) de valor fixo e proveniente das especificações do conjunto de membranas presente no sistema; como também encontrar o par ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ) diferente do das especificações com o qual seja possível obter melhores previsões com o modelo independentemente do valor mínimo de pressão na entrada. Um sistema de pequena escala composto por três membranas em série foi utilizado para os ensaios experimentais. As salinidades de entrada analisadas foram 2000, 4000 e 6000 mg/L. A priori, duas simulações foram realizadas, a primeira delas considerando o  $k_{per}$  e  $k_s$  fixos e a outra considerando ambos variáveis com  $P$ . Para valores de pressão transmembrânica a partir de 400000 Pa, o que corresponde a  $P \geq 0,8$  MPa, o valor de  $k_{per}$  é praticamente constante e igual ao valor considerado na primeira simulação (das especificações do sistema). Com relação aos valores de  $k_s$  calculados, variáveis com a pressão, o valor médio encontrado foi igual ao valor adotado para a primeira simulação (das especificações do sistema). Assim, foi constatado que para  $P \geq 0,8$  MPa e  $k_{per}$  e  $k_s$  de valor fixo, os valores gerados pelo modelo apresentam boa concordância com os medidos. Outras simulações foram realizadas para diferentes pares ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ) e foi observada uma considerável redução nos desvios padrão de  $C_{pmédio}$  e  $Q_p$ .

**Palavras-chave:** análise de sensibilidade, modelo analítico, osmose reversa.

## 1. INTRODUÇÃO

As águas salobras encontradas em poços da região semiárida do Nordeste do Brasil apresentam concentração entre 1000 e 10000 mg/L (Lima, 2006). De acordo com o Ministério da saúde, o Valor Máximo Permitido (VMP) para os Sólidos Totais Dissolvidos (STD), dentre os quais o Cloreto de Sódio (NaCl) está incluso, deve ser de 1000 mg/L para que a água seja considerada potável. Já Organização Mundial da Saúde (OMS) é um tanto mais rigorosa e definiu o patamar máximo de 500 mg/L. Os constituintes iônicos que contribuem para a salinização da água são os íons sódio ( $Na^+$ ), cálcio ( $Ca^{+2}$ ), magnésio ( $Mg^{+2}$ ), potássio ( $K^+$ ), cloreto ( $Cl^-$ ), carbonato ( $CO_3^{-1}$ ), bicarbonato ( $HCO_3^{-1}$ ) e sulfato ( $SO_4^{-2}$ ). De forma geral os íons que apresentam maiores concentrações nas águas salobras encontradas em muitos poços do semiárido nordestino são, em ordem, o cloreto ( $Cl^-$ ), bicarbonato ( $HCO_3^{-1}$ ) e o sódio ( $Na^+$ ) (Menezes, 2009).

Dentre os diferentes processos para a dessalinização e tratamento da água, a osmose reversa (OR) é o mais usual tendo passado por uma evolução ao longo dos anos, sendo utilizado tanto em aplicações residenciais como também em aplicações hospitalares e industriais (Mauricci, 2002). A OR é considerada uma das tecnologias mais apropriadas tanto do ponto de vista econômico como do de consumo de energia por unidade de água tratada. Consiste numa forma adequada de remover certos contaminantes indesejados da água, como chumbo ou nitratos e bactérias, além de melhorar seu sabor e aparência (Hassinger et al., 1994).

O processo da osmose consiste na passagem do solvente, através de uma membrana semipermeável, de um meio com menor concentração de soluto para um meio com maior concentração em soluto. A pressão que o solvente exerce na passagem através da membrana é denominada de pressão osmótica ( $\pi$ ). Quando a diferença entre a pressão na entrada do sistema ( $P$ ) e a pressão osmótica ( $P - \Delta\pi$ ) é positiva, na qual  $\Delta\pi$  é a diferença de pressão osmótica ao longo da membrana, é criado um gradiente de concentração, provocando um fluxo no sentido oposto ao fluxo natural, processo chamado de OR.

O desempenho de um sistema de OR é determinado pelas condições de entrada e seu comportamento ditado pela fonte de energia utilizada. Quando alimentado pela rede elétrica convencional, estas condições são fixas. Quando alimentado por um arranjo FV sem a utilização de baterias, a pressão aplicada na entrada ( $P$ ) está sujeita à variação. Consequentemente, a vazão na entrada ( $Q_f$ ), a vazão de água permeada ( $Q_p$ ) e a concentração média do permeado ( $C_{pmédio}$ ), também variam.

No processo de dessalinização por OR, três parâmetros são de essencial importância para a compreensão do fenômeno e que figuram nos modelos. São eles: coeficiente de permeabilidade da membrana ( $k_{per}$ ), coeficiente de permeabilidade do soluto ( $k_s$ ) e o fator de polarização ( $f_p$ ). Os dois coeficientes ( $k_{per}$  e  $k_s$ ) medem a capacidade de um meio poroso, no caso da OR, a membrana semipermeável, em transmitir um material (fluido ou sólido). Já o fator de polarização está relacionado com o fenômeno de acumulação de cargas na superfície da membrana, que nada mais é do que o acúmulo de íons do soluto resultante das forças convectivas e difusivas presentes no processo.

O modelo desenvolvido baseia-se em duas equações de difusão de primeira ordem: uma equação que fornece como dado de saída  $Q_p$  e outra equação que fornece como dado de saída  $C_{pmédio}$ . Utiliza como dados de entrada a  $P$ ,  $C_f$  (a salinidade da água que entra no sistema) e  $Q_f$ . Além de utilizar também nas equações os parâmetros de difusão ( $k_{per}$  e  $k_s$ ) e  $f_p$ . Este trabalho analisa as condições de operação de um sistema de osmose reversa instalado no Laboratório do Grupo FAE-UFPE, as previsões analíticas de modelos publicados na literatura e os intervalos de validade de parâmetros utilizados na formulação desses modelos.

## 2. MODELO ANALÍTICO

De acordo com o modelo analítico de Fraidenaich *et al.* (2009), a difusão unidimensional de um sal através de uma membrana de comprimento  $L$ , conforme mostrado na Fig. 1, em uma dada posição  $x$  ( $0 \leq x \leq L$ ), é expressa em termos das equações de conservação da concentração de sal na água ( $C$ ) e da vazão volumétrica ( $Q$ ) além da condição do gradiente do fluxo de água  $Q(x)$ :

$$C_f Q_f = C_p Q_p + C(x) Q(x) \quad (1)$$

$$Q_f = Q_p + Q(x) \quad (2)$$

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -k_{per} w (P - f_p \pi(x) + \pi_p) \quad (3)$$

nas quais os subscritos  $f$  e  $p$ , conforme já mencionados anteriormente, se referem, respectivamente, à água de alimentação ( $f$ ) e o permeado ( $p$ ) (água pós processo de dessalinização). Para o concentrado (rejeito) não foi utilizado nenhum subscrito. O símbolo  $\pi$  denota a pressão osmótica e, por fim,  $w$  denota a largura da membrana.

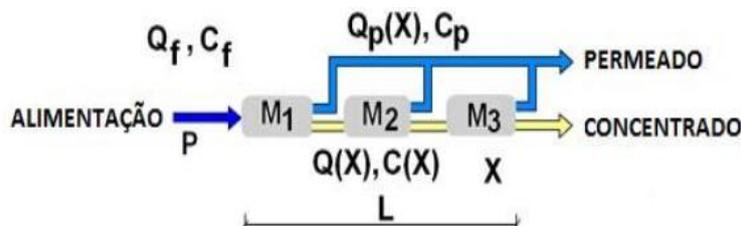


Figura 1 - Fluxo em um comprimento qualquer  $x$  ao longo de um conjunto de três membranas de comprimento total  $L$ .

Além disso, a pressão osmótica ( $\pi$ ) pode ser muito bem aproximada pela Lei de Van't Hoff:

$$\pi = v_s R T C = K C \quad (4)$$

na qual  $v_s$  é o número de íons presentes na solução (mol/L),  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  a temperatura absoluta. Como o cloreto de sódio (NaCl) é o maior constituinte de água salobra e salina e é altamente dissociável em água, então  $v_s=2$ .

Combinando a Eq. (1) com a Eq. (4) se chega à seguinte equação diferencial:

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -\frac{Q_f}{\lambda} \left(1 - \frac{\Theta}{Q(x)}\right) \quad (5)$$

na qual  $\lambda$  é a escala de comprimento e  $\Theta$  a taxa de fluxo característica, ou seja, as características naturais de um sistema de OR e são expressas respectivamente por:

$$\lambda = \frac{Q_f}{k_{per} w (P - (1 - f_p) \pi_p)} \quad (6)$$

$$\Theta = \frac{Q_f f_p (\pi_f - \pi_p)}{P + (1 - f_p) \pi_p} \quad (7)$$

A solução implícita da Eq. (5) (Fraidenaich *et al.* (2009)) é:

$$\frac{x}{\lambda} = \frac{Q_f - Q(x)}{Q_f} - \frac{\Theta}{Q_f} \ln \left( 1 - \frac{Q_f - Q(x)}{Q_f - \Theta} \right) \quad (8)$$

A incorporação analítica da transferência de massa de soluto através da membrana (Fraidenaich *et al.* (2016)) confere ao modelo uma capacidade preditiva maior. A equação é apresentada a seguir:

$$C_p(x) \frac{dQ_p(x)}{dx} = k_s w (f_p C(x) - C_{pm\u00e9dio}) \quad (9)$$

na qual  $C_{pm\u00e9dio}$  denota a concentra\u00e7\u00e3o m\u00e9dia do permeado misturada no reservat\u00f3rio do permeado.

A equa\u00e7\u00e3o a seguir, derivada das equa\u00e7\u00f5es (1) e (2), foi adicionada \u00e0 Eq. (9):

$$C(x) = C_{pm\u00e9dio} + (C_f - C_{pm\u00e9dio}) \frac{Q_f}{Q(x)} \quad (10)$$

Reorganizando e realizando a integra\u00e7\u00e3o da Eq. (9) se chega \u00e0 seguinte equa\u00e7\u00e3o:

$$\frac{Q_f - Q(x)}{k_s w L} = (f_p - 1) - f_p \left( \frac{C_f}{C_{pm\u00e9dio}} - 1 \right) \frac{\lambda}{L} \left( \frac{Q(x) - \Theta}{Q_f - \Theta} \right) \quad (11)$$

A Eq. (8) e Eq. (11) constituem a solu\u00e7\u00e3o das equa\u00e7\u00f5es de difus\u00e3o da \u00e1gua e soluto (Eq. (3) e Eq. (9)).

### 3. ESTUDO DA VARIA\u00c7\u00c3O DE $k_{per}$ E $k_s$ COM A PRESS\u00c3O NA ENTRADA (P)

O coeficiente de permeabilidade da membrana ( $k_{per}$ ) \u00e9 tipicamente da ordem de  $10^{-11}$  a  $10^{-12}$  m/s.Pa e, \u00e9 geralmente fornecido pelo fabricante para determinadas condi\u00e7\u00f5es de entrada e opera\u00e7\u00e3o do sistema de OR. Mehdizadeh (1990) constatou que  $k_{per}$  sofre influ\u00eancia da press\u00e3o na entrada (P) e, para uma faixa de temperatura de 5 a 60 \u00b0C foi observado que esse coeficiente decresce linearmente com P e que tal efeito aumenta com a temperatura (Pal *et al.*, 2006; Alsvik & H\u00e4gg, 2013). Esse fato foi observado, mencionado e refor\u00e7ado em outros trabalhos. Alexiadis *et al.* (2007) realizaram alguns experimentos com um sistema de OR de pequena escala e compararam os resultados com os obtidos por meio de simula\u00e7\u00f5es a partir da din\u00e2mica de fluidos computacional (CFD). Nesse estudo tamb\u00e9m foi constatada a depend\u00eancia de  $k_{per}$  com P. De acordo com os autores, a varia\u00e7\u00e3o de  $k_{per}$  com P \u00e9 proveniente da compacta\u00e7\u00e3o da membrana determinada pela varia\u00e7\u00e3o da press\u00e3o ao longo do comprimento desta. Assim,  $k_{per}$  \u00e9 elevado para baixas press\u00f5es e decresce at\u00e9 atingir um valor praticamente constante para altas press\u00f5es. Em baixas press\u00f5es na entrada a press\u00e3o transmembr\u00e2nica \u00e9 pequena ( $\pi(L) - \pi_p$ ) e a diferen\u00e7a ( $P - (\pi(L) - \pi_p)$ ) adquire valores considerados suficientes para permear a \u00e1gua.

O coeficiente de permeabilidade do soluto ( $k_s$ ) tem seus valores da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  m/h ou  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s. Wang e Tarabara (2007) em seus estudos sobre os efeitos da deposi\u00e7\u00e3o de material coloidal e polariza\u00e7\u00e3o de concentra\u00e7\u00e3o em membranas OR, concluíram que, a uma mesma salinidade de entrada,  $k_s$  \u00e9 aproximadamente constante a diferentes valores de press\u00e3o transmembr\u00e2nica. Os valores obtidos neste presente trabalho s\u00e3o da mesma ordem de grandeza citada acima. Por\u00e9m, foi observado uma rela\u00e7\u00e3o linear desse coeficiente com a press\u00e3o transmembr\u00e2nica.

O fator de polariza\u00e7\u00e3o ( $f_p$ ), adimensional, expressa o aumento da concentra\u00e7\u00e3o nos poros e superf\u00edcie da membrana. Esse fator cresce com a concentra\u00e7\u00e3o de sal, a press\u00e3o de condu\u00e7\u00e3o e o comprimento do canal; e decresce com a resist\u00eancia da membrana e o aumento do coeficiente de difus\u00e3o (Song *et al.*, 2003). Por\u00e9m, estudos pr\u00e9vios evidenciam um  $f_p$  aproximadamente constante em uma ampla faixa de press\u00e3o para representativos sistemas de OR. Uma verifica\u00e7\u00e3o adicional, independente e consistente foi realizada utilizando os dados experimentais dos ensaios realizados o que produziu valores de  $f_p$  de 1,00 a 1,25. Um valor m\u00e9dio de  $f_p = 1,15$  foi escolhido para fins de simula\u00e7\u00e3o (Fraidenaich *et al.*, 2016).

#### 4. METODOLOGIA

Para os ensaios experimentais de medição de valores de pressão (P), vazões ( $Q_f$  e  $Q_p$ ) e concentração média do permeado ( $C_{pmédio}$ ) foi utilizado um sistema de OR composto por três membranas em espiral, conectadas em série com  $L = 3,0$  m, a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . O sistema operou com um conversor de frequência conectado à rede elétrica, mas variando-se a frequência do mesmo de forma controlada por meio de um potenciômetro para os seguintes valores: 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz e 60 Hz. Nesse caso, o que foi feito foi uma simulação de uma fonte variável de energia, como a fotovoltaica. As salinidades de entrada analisadas foram 2000 mg/L, 4000 mg/L e 6000 mg/L. O sistema completo é apresentado na Fig. 2. Cabe esclarecer que nos experimentos realizados o arranjo fotovoltaico não foi utilizado.

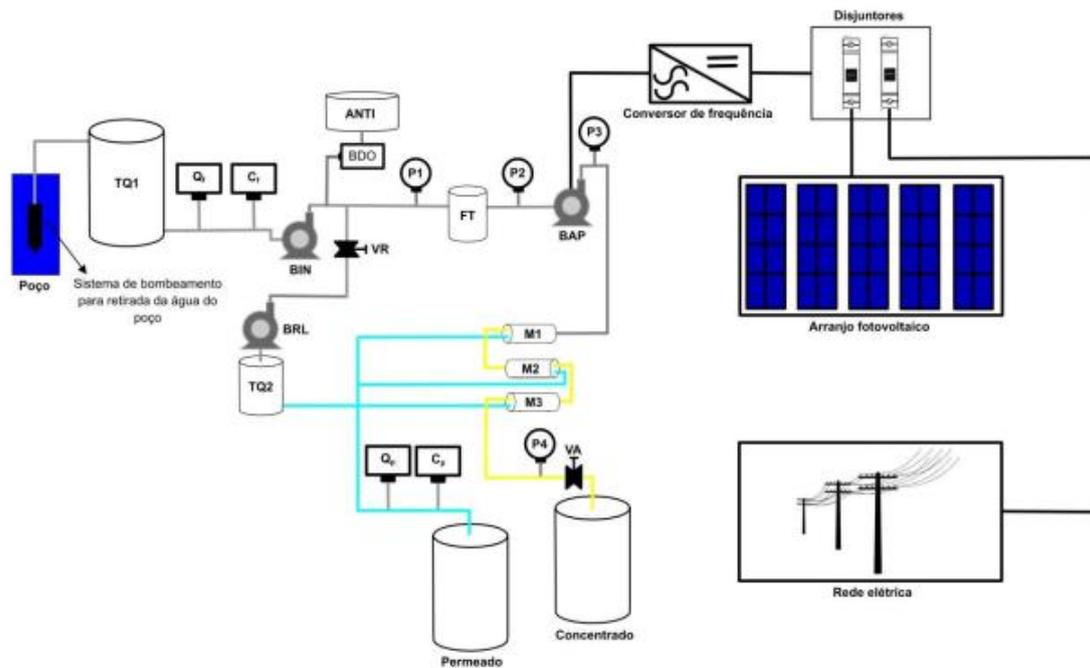


Figura 2 – Diagrama esquemático do sistema de OR utilizado nos ensaios experimentais.

De acordo com a Fig. 2 é mostrado um poço para captação de água de forma independente do sistema de OR e armazenada no tanque (TQ1) para a manipulação da salinidade desejada mediante a adição de cloreto de sódio (NaCl). A bomba presente na entrada (BIN) é responsável pela alimentação da unidade de OR. Antes dessa bomba estão localizados os sensores de vazão ( $Q_f$ ) e concentração na entrada ( $C_f$ ) e, após ela, a bomba dosadora (BDO), que adiciona à água que ingressa no sistema uma solução anti-incrustante para atenuar a incrustação do soluto na superfície e poros do conjunto de membranas. Em seguida, a água segue através do filtro de cartucho (FT), existente para a reter partículas em suspensão. Os sensores de pressão P1 e P2 presentes, respectivamente, antes e depois do filtro, servem para indicar a necessidade de troca do mesmo. Após essa etapa, a água segue para a bomba de alta pressão (BAP), que é uma bomba centrífuga multiestágio, ou seja, aquela composta por vários rotores em série, dispostos em um mesmo eixo, que converte energia cinética de rotação em energia hidrodinâmica de fluxo do fluido. Antes do conjunto de membranas está localizado o sensor de pressão na entrada (P3). Uma parcela da saída do permeado de cada membrana vai para o reservatório do permeado (PERMEADO) e outra vai para o tanque (TQ2), sendo utilizada no processo de retrolavagem das membranas que é realizado pela bomba de retrolavagem (BRL). Antes do reservatório do permeado, estão localizados os sensores de vazão ( $Q_p$ ) e de concentração do permeado ( $C_p$ ). A saída do concentrado de cada membrana segue para a membrana seguinte e, após passar pelo conjunto de membranas, segue para o reservatório do rejeito (CONCENTRADO). Na entrada desse reservatório encontram-se o sensor de pressão (P4) e a válvula (VA), que controla a pressão na entrada da unidade de OR (P) e que influencia na variação das vazões do permeado ( $Q_p$ ) e do concentrado ( $Q(L)$ ).

O conjunto de dados proveniente dos ensaios experimentais foi utilizado para geração dos valores de  $Q_p$  e  $C_{pmédio}$  teóricos, através do modelo de Fraidenaich *et al.* (2016) solucionado com o auxílio do método de Newton – Raphson via simulações computacionais. A geração dos respectivos valores foi feita de duas formas: primeiro, a simulação foi realizada utilizando-se valores fixos de  $k_{per}$  e  $k_s$  ( $k_{per} = 1,00 \times 10^{-11}$  m/s.Pa,  $k_s = 1,40 \times 10^{-7}$  m/s e  $f_p = 1,15$ ), provenientes das especificações do sistema e, segundo, uma simulação posterior foi realizada com  $k_{per}$  e  $k_s$  variáveis com a pressão P, calculados por meio da Eq. (6) e Eq. (11), respectivamente. Por fim, foram feitas outras simulações de forma a encontrar o par ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ) que minimizasse os desvios. Cada par foi escolhido dentro da faixa de cada coeficiente obtida por meio do cálculo com a Eq. (6) e Eq. (11). A cada simulação o desvio padrão (DP) entre o valor gerado pelo modelo para  $C_{pmédio}$  e  $Q_p$  e o valor medido foi calculado por meio da seguinte expressão:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum(\text{valor}_{\text{teórico}} - \text{valor}_{\text{medido}})^2}{N}} \quad (12)$$

na qual N é o número de medidas realizadas em cada ensaio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentadas as curvas de  $C_{p\text{médio}} \times P$  e  $Q_p \times P$  para valores de  $k_{\text{per}}$  e  $k_s$  fixos:

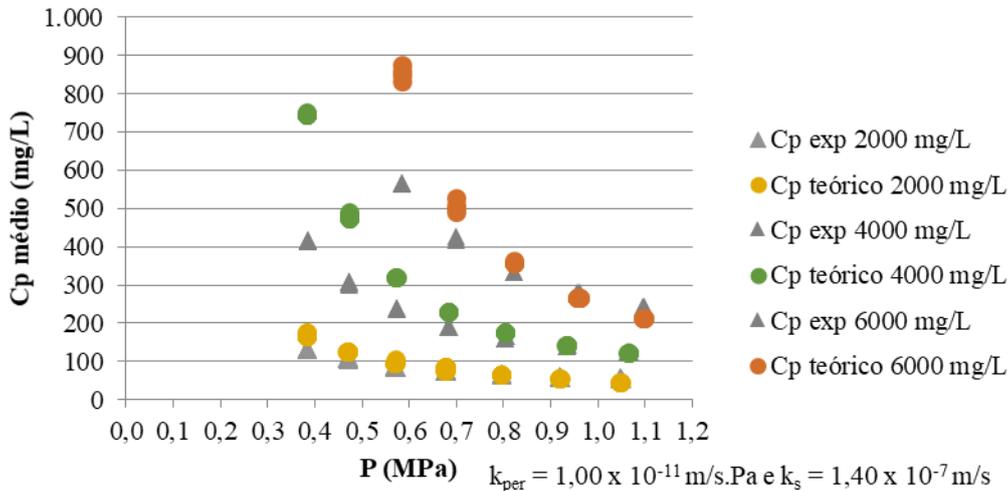


Figura 3 - Curva  $C_{p\text{médio}} \times P$  para o  $k_{\text{per}}$  e  $k_s$  fixos.

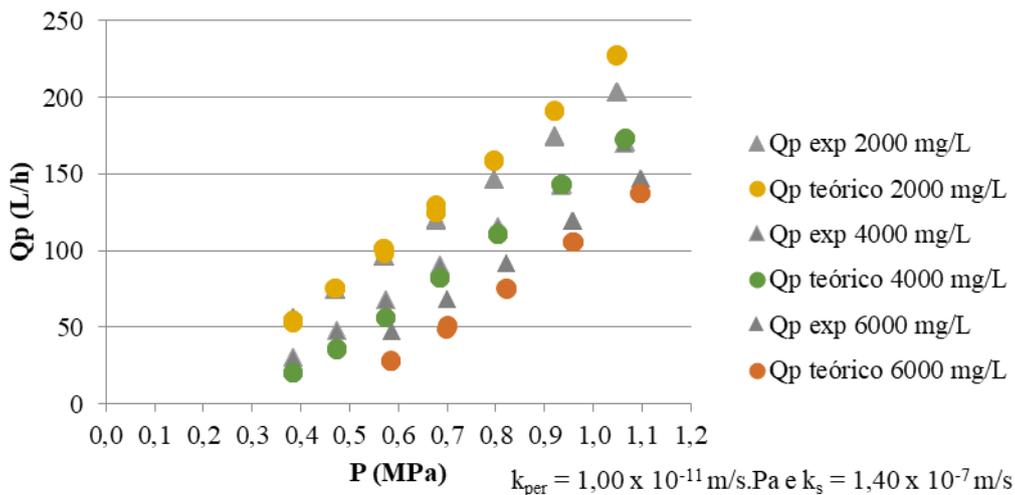


Figura 4 - Curva  $Q_p \times P$  para o  $k_{\text{per}}$  e  $k_s$  fixos.

Observando-se a Fig. 3, nota-se que, para as concentrações de entrada ( $C_i$ ) iguais a 4000 mg/L e 6000 mg/L, para os valores de  $P \leq 0,6$  MPa, os valores preditos pelo modelo de Fraidenaich *et al.* (2016) sobrestimam os valores medidos. Os desvios médios entre os valores de  $C_{p\text{médio}}$ , para pressões abaixo de 0,6 MPa, foram de 21,9% para  $C_i=2000$  mg/L; 62,9% para  $C_i=4000$  mg/L e 51,1% para  $C_i=6000$  mg/L. Já para valores de  $P \geq 0,8$  MPa, os valores gerados pelo modelo concordam com os experimentais para as três salinidades analisadas e para um único valor de  $k_s = 1,40 \times 10^{-7}$  m/s.

Observando-se a Fig. 4, nota-se uma certa concordância entre os valores preditos pelo modelo e os medidos. Porém, para  $C_i$  igual a 2000 mg/L observa-se uma suave sobrestimação do modelo em relação aos valores experimentais para valores de  $P \geq 0,8$  MPa. Ainda assim, o desvio médio entre os valores de  $Q_p$  teóricos e medidos para essa salinidade de entrada foi de 5,6%. Já para a salinidade de entrada de 4000 mg/L, observamos que para valores de  $P \leq 0,8$  MPa o modelo subestimou os valores experimentais. Para essa salinidade de entrada o desvio médio foi de 13,8%. Por fim, considerando agora a salinidade de entrada de 6000 mg/L, observa-se que o modelo subestima os valores experimentais em toda faixa de pressão de operação do sistema. O desvio médio dos valores de  $Q_p$  para essa salinidade de entrada foi de 19,4%.

A alternativa estudada para obter um melhor ajuste entre os resultados experimentais e teóricos foi a utilização de parâmetros  $k_{\text{per}}$  e  $k_s$  variáveis, mantendo os dados de entrada utilizados experimentalmente. Obtido o ajuste com

parâmetros variáveis foram selecionados aqueles parâmetros que permanecem constantes para o conjunto de experiências realizadas e que oferecem a menor discrepância entre resultados teóricos e experimentais, medida pelo desvio padrão entre ambos.

Os valores de  $k_{per}$  e  $k_s$  variáveis são apresentados, respectivamente, na Fig. 5 e Fig. 6, plotados em função da pressão transmembrânica, cuja expressão aparece a seguir, considerando  $x = L$  (comprimento total do conjunto de membranas). Sobre o comportamento de  $k_{per}$ , o mesmo confirma o comportamento observado desse coeficiente por Voros *et al.* (1996), em função da pressão de operação, e por Alexiadis *et al.* (2007) em função da pressão transmembrânica ( $P - f_p \cdot \pi(x) - \pi_p$ ), termo presente na Equação (3). Para baixos valores de pressão, esse coeficiente decresce logaritmicamente e a partir de um determinado valor, ele assume valor praticamente constante. Isso pode ser explicado da seguinte forma: para a faixa  $P \geq 0,6$  MPa e considerando-se as três salinidades de entrada analisadas, o efeito de  $P$  ocasiona a compactação da membrana e um declínio no fluxo o que ocasiona uma diminuição no valor de  $k_{per}$  até esse atingir um valor constante. Para valores de pressão transmembrânica  $\geq 500000$  Pa,  $k_{per}$  já apresenta valor constante. Analisando o conjunto de dados das três salinidades, esse valor de pressão transmembrânica corresponde ao valor de pressão na entrada maior que 0,7 MPa. Justamente, esse é o valor de  $P$  a partir do qual, quando  $k_{per}$  e  $k_s$  são fixos, os valores preditos pelo modelo de  $C_{pméd}$  concordam com os experimentais, confirmando o comportamento apresentado na Fig. 3.

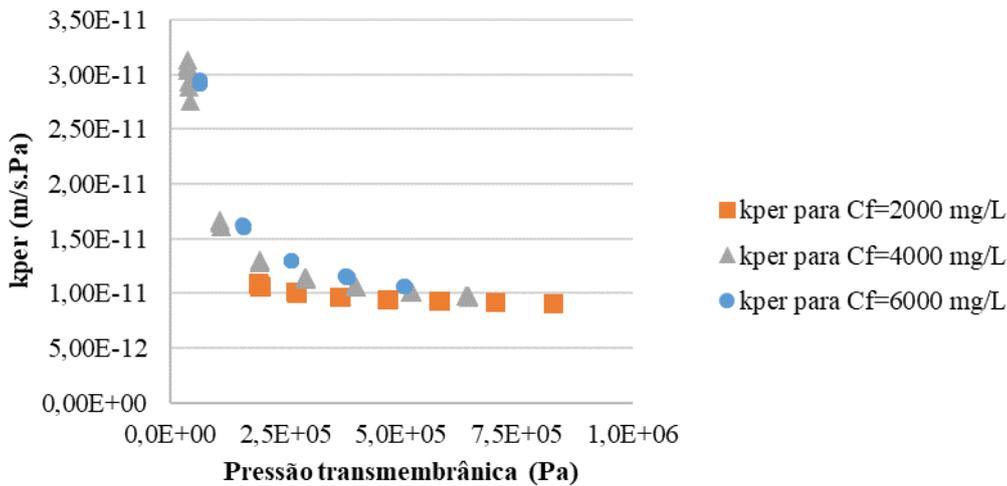


Figura 5 - Curva  $k_{per}$  x Pressão transmembrânica.

O comportamento de  $k_s$  com relação à pressão transmembrânica é tal que à medida que a referida pressão aumenta, o valor do coeficiente vai se tornando levemente superior, conforme apresentado na Fig. 6. Considerando as três salinidades analisadas, os resultados mostram que  $k_s$  não aumenta de forma linear. O que se observa é que para as salinidades de 2000 e 4000 mg/L os valores de  $k_s$  se confundem, enquanto para a salinidade de 6000 mg/L é que se observa esse aumento não linear conjuntamente com os valores para as outras duas salinidades.

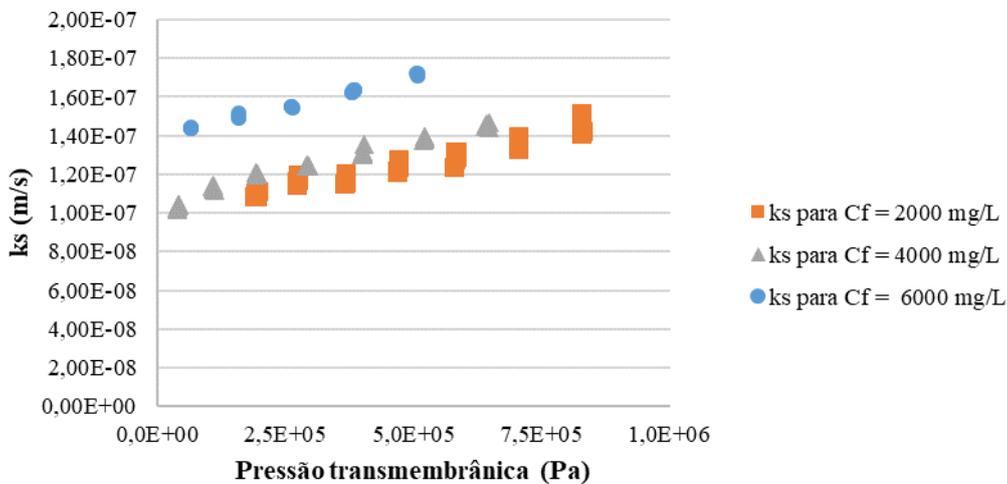


Figura 6 - Curva  $k_s$  x Pressão transmembrânica.

Por fim, nas Figs. 7 e 8 são apresentados os resultados para o par ( $k_{per} = 9,90 \times 10^{-12}$  m/s.Pa e  $k_s = 1,17 \times 10^{-7}$  m/s) com o qual foram obtidos os menores desvios padrão para  $C_{pmédio}$  e  $Q_p$ . É possível observar em ambas as figuras que as salinidades de 4000 e 6000 mg/L apresentam menos pontos em relação à salinidade de 2000 mg/L. Isso aconteceu devido ao fato que, para o referido par ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ), o modelo não gerou resultados para frequências correspondentes às baixas pressões. No caso de 4000 mg/L o modelo gerou resultados para frequência a partir de 35 Hz e para 6000 mg/L a partir de 45 Hz. Lembrando que a frequência mínima adotada em todos os experimentos foi de 30 Hz. A Tab. 1 mostra tais desvios obtidos para esse par comparando com os obtidos com o par oriundo das especificações. Os desvios apresentados foram calculados com os valores para frequência a partir de 45 Hz.

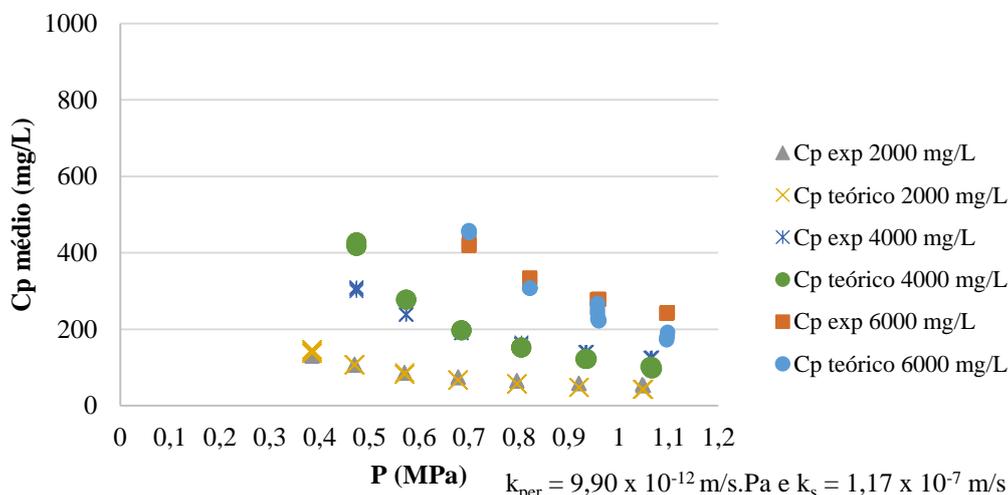


Figura 7 - Curva  $C_{pmédio}$  x  $P$  para o  $k_{per}$  e  $k_s$  fixos e diferentes dos das especificações do sistema.

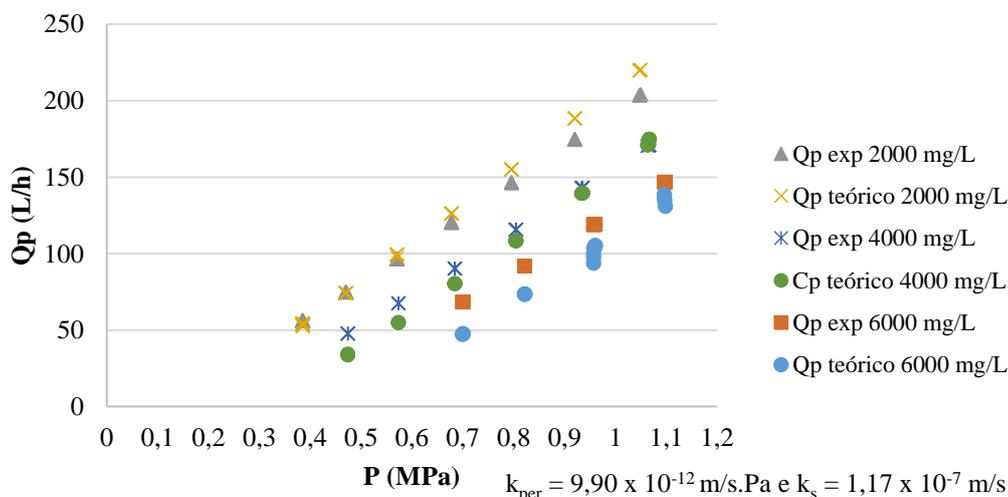


Figura 8 - Curva  $Q_p$  x  $P$  para o  $k_{per}$  e  $k_s$  fixos e diferentes dos das especificações do sistema.

Tabela 1 – Desvios padrão entre os valores de  $C_{pmédio}$  e  $Q_p$  gerados pelo modelo e os experimentais para dois diferentes pares ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ).

Par		2000 mg/L		4000 mg/L		6000 mg/L	
$k_{per}$ (m/s.Pa)	$k_s$ (m/s)	DP $C_{pmédio}$	DP $Q_p$	DP $C_{pmédio}$	DP $Q_p$	DP $C_{pmédio}$	DP $Q_p$
$1,00 \times 10^{-11}$	$1,40 \times 10^{-07}$	6,74	15,15	21,25	4,94	43,91	14,50
$9,90 \times 10^{-12}$	$1,17 \times 10^{-07}$	8,93	11,17	15,79	6,73	35,16	7,73

Observando-se a curva expressa na Fig. 7 e comparando-a com o resultado expresso na Fig. 3, já é possível perceber, visualmente, uma aproximação entre os valores de  $C_{pmédio}$  gerados pelo modelo e os experimentais. Essa observação é reforçada com o conteúdo da Tab. 1, na qual se constata essa diminuição, principalmente para as salinidades de entrada de 4000 e 6000 mg/L, apesar de ainda os desvios estarem um pouco altos. Para a salinidade de 2000 mg/L observa-se que

o desvio aumentou um pouco com o novo par, mas nada que comprometa a utilização do novo par ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ). Comparando visualmente os resultados expressos nas Figs. 4 e 8, as curvas se apresentam semelhantes. Porém, para as salinidades de 4000 e 6000 mg/L se observa uma distância maior entre os valores gerados pelo modelo e os experimentais em baixas pressões. De qualquer forma, ambas apresentam uma boa concordância entre os valores de  $Q_p$  gerados pelo modelo e os valores medidos o que é corroborado pela Tab. 1, que mostram valores baixos de desvios nas duas situações.

## 6. CONCLUSÃO

É importante que o modelo analítico opere na região de  $k_{per}$  e  $k_s$  constantes o qual se verifica: a) Para  $k_{per}$  na região de pressão transmembrânica maior que 0,50 Mpa (Fig. 5) ou equivalentemente pressões maiores que 0,7 MPa; b) No que se refere a  $k_s$  não existe uma região onde este coeficiente seja aproximadamente constante. Observa-se que apresenta uma pequena variação com a pressão transmembrânica, fato que deve ser aceito e sugere utilizar valores médios nessa região.

É importante lembrar também que o valor de  $P$  está relacionado com radiação solar, frequência de operação do conversor, velocidade de rotação da bomba centrífuga multiestágio e posição da válvula de controle do sistema. Uma região de baixa pressão é proveniente de baixos valores de radiação solar o que leva a baixos valores de frequência de operação do conversor e, conseqüentemente, a baixas velocidades de rotação. Baixos valores de  $P$  acarretam em baixas vazões de permeado. Também nessa região de pressão, a difusão de sal é mais acentuada, acarretando na produção de um permeado com alta concentração e, por isso, de baixa qualidade. Assim, do ponto de vista tanto operacional quanto da produção de permeado, não é interessante um sistema de OR funcionar nessas condições.

Fica justificada também a necessidade de realização de mais experimentos para a confirmação do comportamento de  $k_{per}$  e  $k_s$  assim como a realização de uma análise estatística mais apurada de forma a investigar até que ponto os altos desvios na região de baixa pressão podem afetar o resultado final. Isso porque, se numa determinada situação o sistema de OR opera a maior parte do dia em baixos valores de radiação solar, o mesmo funcionará a baixos valores de pressão e, conseqüentemente, produzirá pouco permeado e com alto valor de concentração. Agora, se o sistema opera num dia com altos valores de radiação solar, isso não acontece. Nesse caso, será interessante, do ponto de vista de projeto, a concepção de um controle automático da válvula de controle do sistema de OR, também responsável por determinar o valor de pressão.

Portanto, o sistema operando na região de pressão em que  $k_{per}$  é constante se apresenta como o ideal e, nesse caso, se observou que o modelo de Fraidenraich *et al.* (2016) possui uma boa capacidade preditiva. Nessa região também é possível se utilizar  $k_s$  com valor constante. Além disso, com o resultado de uma simulação para outro par ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ), o modelo apresentou também desvios reduzidos de forma considerável, inclusive na região de baixa pressão de entrada ( $P$ ) e para uma ampla faixa de valores de concentração de sal (2000 a 6000 ppm). Esse último resultado atesta a eficácia do modelo de Fraidenraich *et al.* (2016) para ser utilizado como uma ferramenta tanto de concepção de novos sistemas como também de análise de desempenho e diagnóstico de problemas; isso, independentemente da faixa de concentração da água que ingressa no sistema para ser dessalinizada.

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que, por Sua vontade, me conduziu a prestar a seleção para o Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (PROTEN – DEN/UFPE). Agradeço ao PROTEN – DEN/UFPE por acreditar em meu projeto e me selecionar como aluno deste programa. Em seguida, agradeço aos professores Naum Fraidenraich e Olga Vilela, pela dedicação e paciência e também aos técnicos Rinaldo e Marcelo por toda a ajuda prestada. Por fim, sem me esquecer, agradeço ao CNPq e CAPES por todo apoio e financiamento deste presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Alexiadis, A., Wiley, D. E., Vishnob, A., Leea, R. Fletcher, D. F., Baos, J., 2007. CFD modeling of reverse osmosis membrane flow and validation with experimental results, *Desalination*, vol. 217, pp. 242-250.
- Alsvik, I. L., Hägg, M. B., 2013. Pressure retarded osmosis and forward osmosis membranes: materials and methods, *Polymers*, vol. 5, pp. 303-327.
- Fraidenraich, N., Vilela, O. C., Lima, G. A., Gordon, J., 2009. Reverse osmosis: modeling and experiment, *Applied Physics Letters*, vol. 94.
- Fraidenraich, N., Vilela, O. C., Viana, M. S., Gordon, J., 2016. Improved analytic modeling and experimental validation for brackish-water reverse-osmosis desalination, *Desalination*, vol. 94, pp. 60-65.
- Hassinger, E., Doerge, T. A., Baker, P. B., 1994. Water Facts: Number 6 Reverse osmosis units., Arizona Corporate Extension, n. 194019.
- Lima, G. A., 2006. Sistema de dessalinização por osmose reversa acionado por arranjo fotovoltaico com conversor de frequência, Dissertação de Mestrado, PROTEN – DEN, UFPE, Recife.
- Mauricci, J. J., 2002. Vuelco del concentrado de plantas potabilizadoras por membranas a una rede cloacal, *Água Latinoamérica*, vol. 2, n. 3.

- Mehdizadeh, H., 1990. Modeling of transport phenomena in reverse osmosis membranes, Tese de Doutorado, McMaster University, Canadá.
- Menezes, J. S., 2009. Desenvolvimento de dispositivo caseiro para dessalinização de água de água salobra para dessedentação humana, Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, UFBA, Salvador.
- Pal, L., Joyce, M. K., Fleming, P.D., 2006. A simple method for calculation of the permeability coefficient porous media, Tappi Journal, vol. 5, n. 9, pp. 10-16.
- Song, L., Hu, J. Y., Ong, S. L., Ng, W. J., Elimelech, M., Wilt, M., 2003. Emergence of thermodynamic restriction and its implications full-scale reverse osmosis process, Desalination, vol. 155, pp. 213-228.
- Wang, F., Tarabara, V. V., 2007. Coupled effects of colloidal deposition and salt concentration polarization on reverse osmosis membrane performance, Journal of Membrane Science, vol. 293, pp. 111-123.

### **ANALYTICAL MODELING FOR REVERSE OSMOSIS DESALINATION SYSTEMS ACTUATED BY PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY: SENSITIVITY ANALYSIS**

**Abstract.** *In this work we present a sensitivity analysis of the analytical model of Fraidenaich et al. (2016), designed to analyze the performance of reverse osmosis systems powered by photovoltaic solar energy (OR - FV), aiming at: obtaining the minimum pressure value at the inlet ( $P$ ) from which it is possible to use the model for predicting values of the mean permeate concentration ( $C_{paverage}$ ) and the permeate flow ( $Q_p$ ) with the permeability coefficient of the membrane ( $k_{per}$ ) and the permeability coefficient of the solute ( $k_s$ ) of fixed value and coming from the set specifications of membranes present in the system; but also to find the pair ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ) different from the specifications with which it is possible to obtain better predictions with the model independently of the minimum pressure value at the entrance. A small scale system composed of three membranes in series was used for the experimental trials. The analyzed salinities were 2000, 4000 and 6000 mg/L. Initially, two simulations were performed, the first considering the  $k_{per}$  and  $k_s$  fixed and the other considering both variables with  $P$ . For values of transmembrane pressure from 400000 Pa, corresponding to  $P \geq 0.8$  MPa, the value of  $k_{per}$  is practically constant and equal to the value considered in the first simulation (of the system specifications). With respect to the values of  $k_s$  calculated, variables with pressure, the average value found was equal to the value adopted for the first simulation (of the system specifications). Thus, it was found that for  $P \geq 0.8$  MPa and  $k_{per}$  and  $k_s$  of fixed value, the values generated by the model show good agreement with the measured values. Other simulations were performed for different pairs ( $k_{per}$ ,  $k_s$ ) and a considerable reduction was observed in the standard deviations of  $C_{pmedio}$  and  $Q_p$ .*

**Key words:** *sensitivity analysis, analytical model, reverse osmosis.*