

ESTUDO ANALÍTICO E EXPERIMENTAL DA DIFUSÃO DE SAIS EM MEMBRANAS SEMIPERMEÁVEIS DE OSMOSE REVERSA

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

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Naum Fraidenraich – nr@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Resumo. *Dentre os métodos utilizados para a dessalinização da água, a osmose reversa (OR) é o que mais evoluiu e, por isso, é amplamente utilizada, sendo capaz de eliminar também contaminantes microbiológicos. A utilização da tecnologia fotovoltaica (FV) para alimentar um sistema de OR vem como solução para possibilitar a utilização desta técnica em regiões áridas e com precária eletrificação. Este presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo analítico e experimental da difusão de sais em membranas semipermeáveis de um sistema de osmose reversa alimentado por um gerador fotovoltaico. Um método analítico já desenvolvido, que utiliza o coeficiente de permeabilidade da água (k_{per}), foi ampliado para incluir o coeficiente de difusão do soluto (k_s) e o cálculo da concentração média do permeado (\bar{C}_p), ou seja, a concentração da água dessalinizada. O procedimento experimental permitiu a extração do coeficiente de difusão do soluto. Tal coeficiente foi ajustado por meio de um programa de computador escrito em determinada linguagem e, uma vez conhecido este coeficiente, foram calculados a concentração média do permeado e a vazão do concentrado ($Q(L)$), ou seja, o rejeito. Outro objetivo foi validar a ampliação do procedimento analítico desenvolvido por meio da comparação entre os resultados teóricos e experimentais.*

Palavras-chave: *Osmose reversa, tecnologia fotovoltaica, modelo analítico, difusão.*

1. INTRODUÇÃO

Existem diferentes processos para a dessalinização da água como os que envolvem mudança de fase, filtração e osmose reversa (OR). Dentre estes, o último citado é o mais usual e passou por um processo de evolução ao longo de muitos anos, dominando hoje o mercado e sendo aplicado tanto para prover água para consumo bem como para procedimentos hospitalares e industriais (Mauricci, 2002). A osmose reversa consiste numa excelente forma de remover certos contaminantes indesejados da sua água potável e pode reduzir os riscos de contaminação por chumbo ou nitratos. Ela também pode melhorar o sabor e a aparência da água (Hassinger et al., 1994).

A osmose reversa consiste, também, basicamente, no bombeamento de água com alta concentração de sais contra membranas semipermeáveis. Para este bombeamento é necessária uma pressão maior que a pressão osmótica (π), ou seja, pressão no sentido inverso do da osmose no mínimo e com a mesma intensidade daquela que o solvente faz para atravessar a membrana semipermeável. Em outras palavras, a pressão necessária para impedir o processo natural da osmose. Com o fluxo a partir da água de alimentação são produzidos dois fluxos distintos: o produto, chamado de permeado e o rejeito, chamado de concentrado.

O fluxo do permeado varia com a área da membrana e é diretamente proporcional à pressão transmembrânica ($\Delta P = P - \pi$), ou seja, a diferença de pressão exercida pela água de alimentação (água salina) do sistema (P) que alimenta o sistema e a pressão osmótica. O fator que representa essa proporcionalidade é chamado de constante de permeabilidade da membrana, sendo traduzida como a maior ou menor dificuldade de uma molécula de água transitar através da membrana e varia com a pressão no interior da membrana (Alexiadis, 2007).

Fraidenraich et al. (2009) desenvolveram um modelo analítico para o desempenho desse tipo de sistema de dessalinização. Com este observou-se uma clara dependência do desempenho com as variáveis operacionais. Conhecendo a taxa de fluxo de água característica (θ) e a escala de comprimento do sistema é possível realizar uma descrição geral da variação do fluxo de água de alimentação com as condições físicas na entrada do dessalinizador: pressão, fluxo de água e concentração (salinidade).

Porém, a água permeada, resultante do processo de dessalinização, ainda contém certo teor de salinidade, cujo valor de concentração é inferior, na maioria das vezes, ao máximo permitido, pela Organização Mundial da Saúde (OMS), para os sólidos totais dissolvidos (STD), ou seja, 500 mg/L. No modelo desenvolvido (Fraidenraich et al., 2009) a concentração de salinidade do permeado era introduzida como um parâmetro conhecido, com base nos resultados experimentais.

Fraidenraich (2011) ampliou tal modelo inserido a equação de difusão do soluto que traz em sua expressão o coeficiente de difusão do soluto. Este coeficiente pode ser traduzido como o controle, realizado pela membrana, da quantidade de sal difundida para o reservatório do permeado. Esta modificação no modelo permite extrair o valor

teórico da concentração média do permeado e da vazão do concentrado, por meio de cálculo numérico via um processo iterativo, e sua comparação com o respectivo valor experimental.

2. PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a mais importante propriedade física da membrana semipermeável. Esta propriedade descreve a condutividade de um meio poroso quando atravessado por um fluxo de fluido e em que medida este é capaz de mover-se neste meio. Dois parâmetros medem tal propriedade: o coeficiente de permeabilidade da membrana (k_{per}) e o coeficiente de difusão do soluto (k_s).

2.1 Coeficiente de permeabilidade da membrana (k_{per})

Conforme supracitado, um dos parâmetros que mede a permeabilidade é o coeficiente de permeabilidade da membrana (k_{per}). Quando um processo de osmose é realizado de forma controlada em função do tempo, observa-se um aumento do fluxo de água e diminuição do fluxo de soluto, ou seja, um alto valor de k_{per} . Mehdizadeh (1990) constatou que k_{per} sofre influência da pressão de operação e, para uma faixa de temperatura variando entre 5°C e 60°C, foi observado que tal coeficiente decresce linearmente com a pressão e que este efeito aumenta com o aumento da temperatura (Alsvik e Hägg, 2013; Pal et al., 2006).

Esta constatação é reforçada por outros trabalhos. Alexiadis et al. (2007) realizou um experimento com um sistema de osmose reversa de pequena escala e comparou os resultados com os obtidos a partir de simulações realizadas com programas de dinâmica de fluidos computacional. Constatou também essa variação do coeficiente com a pressão. De acordo com os autores esta variação provém da compactação da membrana determinada pela pressão transmembrânica. Assim, tal coeficiente é elevado para baixas pressões e decresce com a pressão até atingir um valor constante para altas pressões. Lima (2012), também observou uma variação decrescente do coeficiente com o aumento de pressão transmembrânica. Psoch & Schiewer (2008) realizaram uma modelagem do declínio da permeabilidade da membrana em função do tempo e propuseram uma expressão para a obtenção do k_{per} apresentada pela Eq. (1). Esta mostra a relação entre o fluxo do permeado (Q_p) e a pressão transmembrânica, expressa pela Eq. (2), e ΔS é a área efetiva da membrana.

$$k_{per} = \frac{Q_p}{\Delta P \Delta S} = \frac{J_v}{\Delta P} \quad (1)$$

$$\Delta P = \{P - [f_p \pi_{méd} - \pi_p]\} \quad (2)$$

na qual Q_p é o fluxo do permeado, P é a pressão aplicada (considerada constante ao longo da membrana), π_p é pressão osmótica no permeado e $\pi_{méd}$ é a pressão osmótica média.

Na literatura sobre o assunto são encontrados valores para o k_{per} da ordem de $\approx 10^{-12} \text{ m.s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$. Fraidenraich et al. (2009) para um sistema que opera com níveis de salinidade entre 2000 mg/L e 5000 mg/L utiliza os valores de $8,8 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ e $9 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, respectivamente. Kim & Hoek (2005) obtiveram k_{per} de forma empírica e o estabeleceram como uma constante para qualquer valor de concentração. O valor, neste caso, gira em torno de $8,15 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

2.2 Coeficiente de difusão do soluto (k_s)

O coeficiente de permeabilidade do soluto (k_s) através da membrana controla quanto de sal é difundido do lado salino para o reservatório que contém a solução mais diluída (permeado). Além de depender da composição do soluto, depende também da estrutura da membrana e da diferença de concentração ao longo desta. De forma geral pode ser expresso como:

$$k_s = \frac{J_s}{\Delta C} = \frac{J_s}{C_f - C_p} \quad (3)$$

onde J_s é o fluxo do soluto e ΔC diferença de concentração ao longo da membrana.

Em termos microscópicos o coeficiente k_s pode se expressar como:

$$k_s = \frac{D}{\delta} \quad (4)$$

Na qual D é a difusividade do soluto e δ a espessura da camada de difusão (Tamas et al., 2007).

Os valores de k_s são da ordem de 10^{-4} m/h ou 10^{-7} m/s . Wang e Tarabara (2007) ao realizar estudos sobre efeitos de acoplamento da deposição coloidal e polarização de concentração do sal em membranas de osmose reversa, concluiu com que k_s é aproximadamente constante a diferentes valores de pressão que correspondem a diferentes valores de fluxo de permeado e concentração na superfície da membrana (C_m).

3. MODELOS ANALÍTICOS

Muitos modelos analíticos foram e ainda são desenvolvidos para analisar e descrever adequadamente o desempenho de um sistema de osmose reversa como, por exemplo, o modelo de Modelagem matemática para a separação de soluções aquosas binárias utilizando fibras ocas e módulos de osmose reversa (Kumar e Deswal, 2009) entre outros. Estes modelos são necessários para a otimização e desenvolvimento de sistemas mais eficientes.

A maioria deles é baseada no modelo de difusão de solução proposto por Lonsdale et al. em 1965. Em tal modelo o transporte do soluto e do solvente, se dá por difusão sob um gradiente de potencial químico e tais difusões são consideradas como processos distintos resultante da concentração e diferenças de pressão através da membrana (Djebedjian et al., 2008; Absar et al., 2010).

Outros combinam tal modelo com a teoria do filme fino e investigam parâmetros de operação e desenho tais como: taxa de fluxo de alimentação, pressão de operação, fator de recuperação, tipo e geometria da membrana. Em 2005, Carvalho et al. desenvolveu um destes modelos para análise da difusão de sal através da membrana de um sistema de OR alimentado por um gerador fotovoltaico. Tal modelo tem por objetivo prever os parâmetros de funcionamento instantâneos. Alguns anos antes, mais precisamente, em 1999, Colangelo et al. desenvolveu um modelo cujas equações levam em conta os valores da insolação solar diária média e da temperatura ambiente (Sassi & Mutjaba, 2010).

3.1 Descrição do modelo de Fraidenraich et al. (2009)

O objetivo principal é prever a variação da taxa de fluxo do permeado ao longo do sistema e sua dependência com os parâmetros de entrada (água de alimentação). O modelo é unidimensional e utiliza equações de conservação de massa, vazão volumétrica e difusão, em determinada posição x ao longo da membrana, mostradas na Fig. 1.

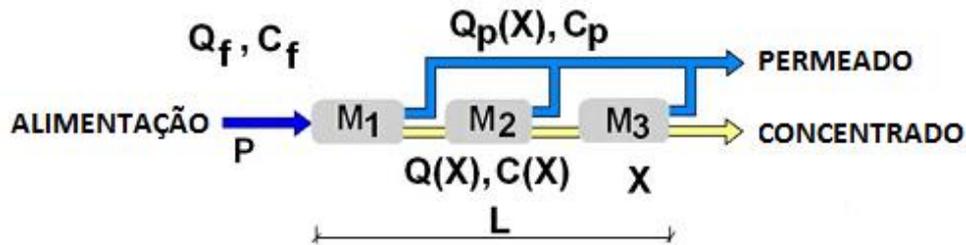


Figura 1 - Diagrama de fluxo de um sistema de osmose reversa de três estágios cujo conjunto de membranas tem comprimento total L .

Fonte: Adaptado de Fraidenraich et al. (2009).

$$C_f Q_f = C_p Q_p(x) + C(x) Q(x) \quad (5)$$

$$Q_f = Q_p(x) + Q(x) \quad (6)$$

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -k_{per} w [P - (f_p \pi(x) - \pi_p)] \quad (7)$$

A Eq. (7) mostra a relação entre o gradiente em vazão (Q) e a diferença de pressão ao longo do sistema, w é a largura da membrana, P é a pressão de condução, f_p é o fator de polarização, π denota a pressão osmótica que é expressa por:

$$\pi = v_s R T C \quad (8)$$

Na qual v_s é o número de íons presentes na solução, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura absoluta e C a concentração. Como o cloreto de sódio (NaCl) é altamente dissociado e é o sal presente em maior frequência em água salobra, então $v_s \sim 2$.

O modelo também invoca a lei de Vant'Hoff de proporcionalidade entre a pressão osmótica e concentração e adiciona dois parâmetros, a escala de comprimento (λ) e a taxa de fluxo característica (θ), expressas respectivamente por:

$$\lambda = \frac{Q_f}{k_{per} w [P + (1 - f_p) \pi_p]} \quad (9)$$

$$\Theta = \frac{Q_f f_p (\pi_f - \pi_p)}{P + (1 - f_p) \pi_p} \quad (10)$$

Com a combinação das Eqs. (6), (7), (8), (9) e (10) se chega à forma simplificada da Equação 7:

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -\frac{Q_f}{\lambda} \left(1 - \frac{\Theta}{Q(x)}\right) \quad (11)$$

Aplicando à Eq. (11) a condição inicial $Q(0) = Q_f$ tem-se, como solução:

$$\begin{aligned} \frac{x}{\lambda} &= \frac{Q_f - Q(x)}{Q_f} - \frac{\Theta}{Q_f} \ln \left(1 - \frac{Q_f - Q(x)}{Q_f - \Theta}\right) \\ &= \frac{Q_p(x)}{Q_f} - \frac{\Theta}{Q_f} \ln \left(1 - \frac{Q_f - Q(x)}{Q_f - \Theta}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

A solução apresentada permite um dimensionamento do tamanho do sistema e a determinação dos parâmetros de entrada (Q_f e P). Os resultados teóricos mostram uma boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

3.2 A modificação no modelo de Fraidenraich et al. (2009)

A modificação realizada por Fraidenraich (2011) realizou uma melhoria e, assim, a concentração média do permeado é obtida por meio da equação de difusão do soluto. O modelo regido por essa equação depende do coeficiente de permeabilidade do soluto (k_s). A equação diferencial adicionada a este modelo, que mostra o gradiente em vazão do permeado ao longo do sistema ($Q_p(x)$), é apresentada abaixo:

$$\frac{d(Q_p(x))}{dx} C_p(x) = -k_s w (f_p C(x) - \bar{C}_p) \quad (13)$$

Na qual $C(x)$ é a concentração de sal do concentrado (rejeito). Mesmo existindo um perfil salino representado por $C_p(x)$, como resultado da difusão em cada posição x ao longo da membrana, a concentração no reservatório do permeado é tomada como a média.

A resolução da Eq. (13) é iniciada com a combinação das Eqs. (5) e (6) para escrever $C(x)$ em função de $Q(x)$, assim:

$$C(x) = \bar{C}_p + (C_f - \bar{C}_p) \frac{Q_f}{Q(x)} \quad (14)$$

Com a arrumação dos termos chega-se a:

$$\frac{d(Q_p(x))}{dx} C_p(x) = -k_s w \left[\bar{C}_p (f_p - 1) + f_p (C_f - \bar{C}_p) \frac{Q_f}{Q(x)} \right] \quad (15)$$

Resolvendo a Eq.(16) e aplicando as condições iniciais $Q(0)=Q_f$, $Q_p(0)=0$ tem-se, como solução:

$$(Q_f - Q(L)) \bar{C}_p = -k_s w \left[\left[\bar{C}_p (f_p - 1) + f_p (C_f - \bar{C}_p) \lambda \ln \left(\frac{Q(L) - \Theta}{Q_f - \Theta} \right) \right] \right] \quad (16)$$

Neste caso se substituiu o x pelo L (comprimento da membrana). Procedendo da mesma forma para equação (12) tem-se que:

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{Q_f - Q(L)}{Q_f} - \frac{\Theta}{Q_f} \ln \left(1 - \frac{Q_f - Q(L)}{Q_f - \Theta}\right) \quad (17)$$

As Eqs. (16) e (17) formam um sistema de equações não lineares sendo necessária a utilização de um processo iterativo para a sua resolução.

4. METODOLOGIA

O coeficiente de difusão do soluto foi obtido por meio da Eq. (16) na qual os demais parâmetros (C_f , \bar{C}_p , Q_f , $Q(L)$, P , λ e θ) serão tomados, diretamente ou indiretamente, dos resultados experimentais. Um programa em linguagem SCILAB foi desenvolvido para validar a Eq. (16) encontrar o valor ajustado de k_s que tornava um dos lados de equação igual ao outro lado. Em seguida, foi realizado um estudo do comportamento de k_s com a pressão de entrada e a pressão transmembrânica. O valor utilizado para o fator de polarização foi de 1,15 de acordo com Fraidenraich et al. (2009). Já os respectivos valores de k_{per} foram calculados a partir da expressão, do método das correlações, proposta por Lima (2012):

$$k_{per} = 3,30760 \cdot 10^{-10} \cdot (\Delta P^{-0,264173}) \quad (18)$$

A obtenção teórica da concentração média do permeado e da vazão do concentrado requer a resolução do sistema de Eqs. (16) e (17). Estas formam um sistema de equações não lineares, necessitando, para sua resolução, de um processo iterativo. Este processo gera sucessivas soluções aproximadas até convergir para certo valor. O método de resolução utilizado será o Método de Newton que consiste, primeiramente, no cálculo das derivadas parciais em relação às incógnitas do sistema, neste caso, \bar{C}_p e $Q(L)$. Em seguida, outro programa em linguagem SCILAB foi desenvolvido para a realização processo iterativo e obtenção dos valores de \bar{C}_p e $Q(L)$.

Os valores experimentais principais parâmetros de água dessalinizada (pressão, vazão e concentração na entrada do sistema, concentração média do permeado (\bar{C}_p)) foram monitorados pelos respectivos sensores presentes no sistema e seus valores obtidos pelo sistema de aquisição de dados conectado ao sistema de OR e a um computador. O experimento foi realizado com uma solução salina de concentração 2000 mg/L (2000 ppm).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Concentração média do permeado (\bar{C}_p)

A Fig. 2 mostra o comportamento da concentração média do permeado em função da pressão na entrada.

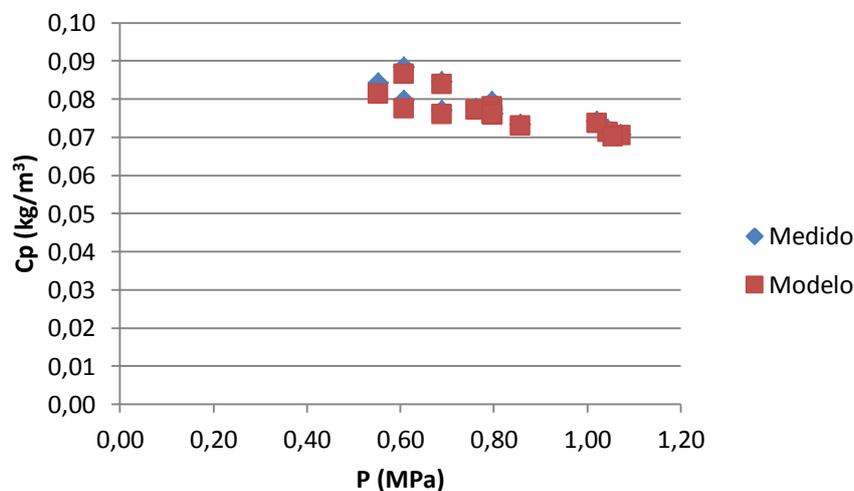


Figura 2- Concentração média do permeado (\bar{C}_p) em função da pressão na entrada (P).

Verifica-se um comportamento linear decrescente da concentração média do permeado com a pressão na entrada. Na Eq. (5), caso a grandeza concentração média do permeado seja isolada, percebe-se que esta concentração média e sua vazão (Q_p) são inversamente proporcionais. Fraidenraich et al. (2009) encontrou um comportamento linear crescente entre a vazão do permeado e a pressão na entrada. Assim, era esperado, que mediante o aumento de P , Q_p cresça enquanto \bar{C}_p diminua, já que são inversamente proporcionais. O desvio médio obtido foi da ordem 1,051% entre os resultados de experimentais e teóricos de \bar{C}_p . Este pequeno valor de desvio mostra que a ampliação aplicada no modelo por Fraidenraich (2011) é válida. Os valores de concentração média do permeado, situado na faixa de 70 mg/L a 90 mg/L, mostra que a combinação do sistema de osmose reversa com o gerador fotovoltaico é eficiente no processo de dessalinização da água.

5.2 Vazão do concentrado Q(L)

A Fig. 3 mostra o comportamento da concentração média do permeado em função da pressão na entrada.

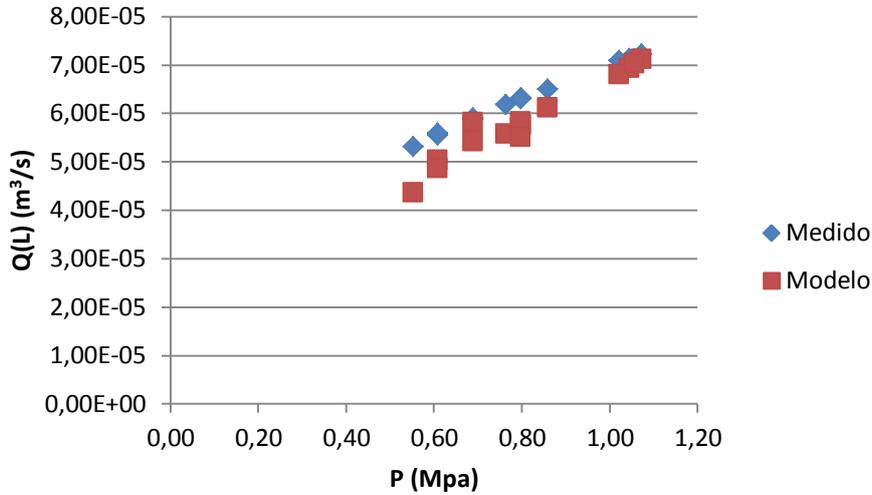


Figura 3 – Vazão do concentrado Q(L) em função da pressão na entrada (P).

Verifica-se um comportamento linear crescente da vazão do concentrado com a pressão na entrada. Da Eq. (6) percebemos que a vazão do concentrado, a vazão do permeado (Q_p) e a vazão na entrada (Q_f) são diretamente proporcionais. Fraidenraich et al. (2009) encontrou um comportamento linear crescente da vazão do permeado em relação à pressão na entrada. Logo, era esperado, que mediante o aumento de P, Q_f e Q_p cresçam com esta pressão assim como Q(L) também. O desvio médio obtido foi da ordem 7,803% entre os resultados experimentais e teóricos de Q(L). Este resultado mostra também que a ampliação aplicada no modelo analítico por Fraidenraich (2011) é válida.

5.3 Coeficiente de difusão do soluto (k_s)

As Figs. 4 e 5 mostram o comportamento do coeficiente de difusão do soluto com a pressão na entrada e com a pressão transmembrânica, respectivamente.

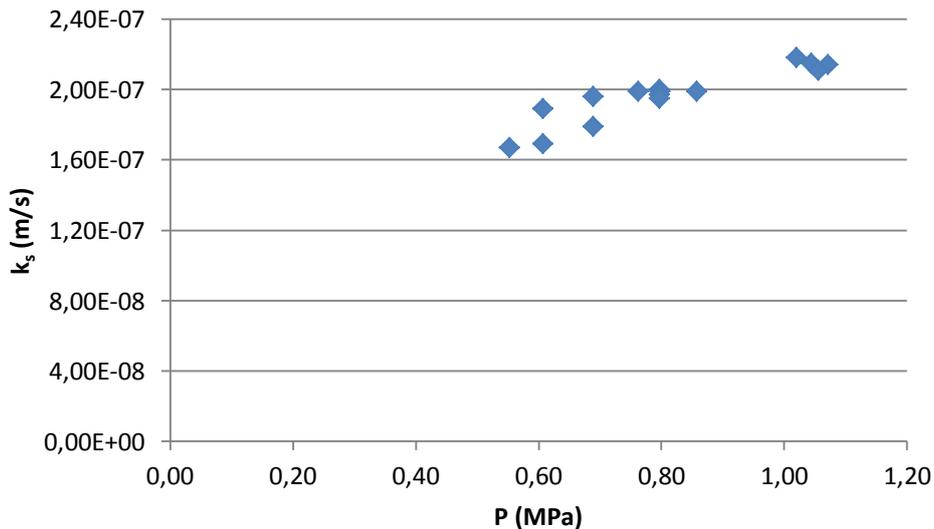


Figura 4 – Coeficiente de difusão do soluto (k_s) em função da pressão na entrada (P).

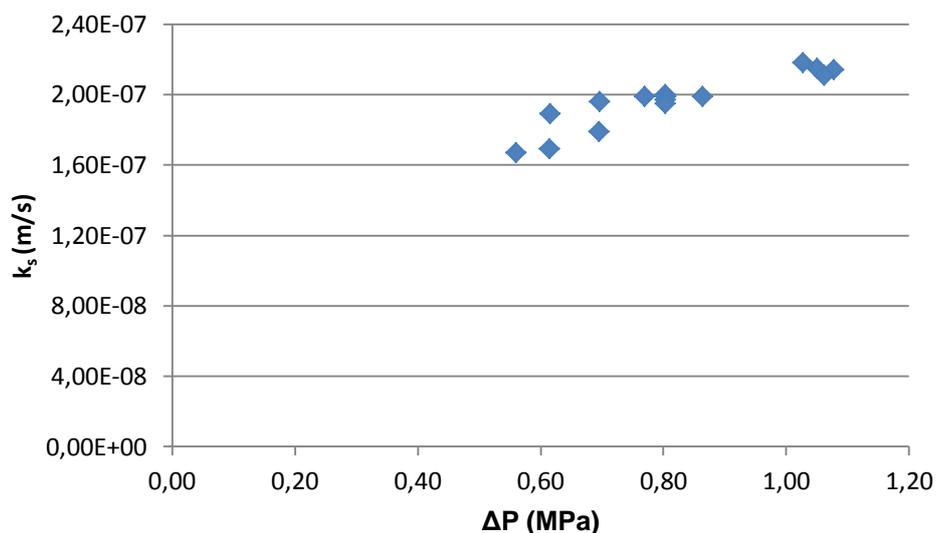


Figura 5 – Coeficiente de difusão do soluto (k_s) em função da pressão transmembrânica (ΔP).

Observa-se um sutil comportamento linear crescente do coeficiente de difusão do soluto tanto com a pressão de entrada quanto com a pressão transmembrânica, com os valores de tal coeficiente com as referidas pressões situadas na faixa ($1,69 \times 10^{-7}$ m/s – $2,18 \times 10^{-7}$ m/s), ou seja, uma variação pequena, levando-se em conta a ordem de grandeza que é de 10^{-7} . O valor médio é de $(1,99 \pm 0,10) \times 10^{-7}$ m/s. Esta pequena variação está de acordo com o resultado obtido por Wang & Tarabara (2007). Ambos constataram que o coeficiente de difusão de soluto é aproximadamente constante para diferentes pressões.

6. CONCLUSÕES

A ampliação feita por Fraidenraich (2011) mediante a adição da equação de difusão do soluto (Eq. (15)) torna o modelo analítico, desenvolvido em 2009, mais completo e eficiente. Completo, porque a análise do desempenho de um sistema de OR é feita também do ponto de vista do soluto. Eficiente, porque os valores teóricos obtidos são bem próximos dos valores experimentais. Isto é evidenciado visualmente através das curvas plotadas e dos valores de desvio apresentados. A escolha do método iterativo para a resolução do sistema de equações não lineares, neste caso o Método de Newton-Raphson, contribuiu, pois tal método garante rápida convergência. Sobre o coeficiente de difusão do soluto, os resultados obtidos estão de acordo com a literatura sobre o assunto. Com relação à utilização do gerador fotovoltaico conclui-se que a utilização do mesmo não diminui a eficiência do sistema de OR no processo de dessalinização. Basta olhar, para a concentração de entrada analisada, que os valores obtidos estão bem abaixo do máximo permitido, para os sólidos totais dissolvidos, pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me concedeu a graça de participar do PROTEN – UFPE, aos professores Naum Fraidenraich e Olga Vilela, meus orientadores, pela dedicação e paciência. Ao recém-doutor Manoel Henrique pela ajuda no desenvolvimento dos programas em linguagem SCILAB e ao CNPq pelo apoio e incentivo ao meu trabalho.

REFERÊNCIAS

- Absar, B.; Kadi, S. E. M. L.; Belhamiti, O. Reverse Osmosis Modeling With The Orthogonal Collocation On Finite Element Method. *Desalination And Water Treatment*. 21, 23–32p. 2010.
- Alexiadis, A.; Wileya, D. E.; Vishnob, A.; Leea, R.; Fletcher, D.F.; Baos, J. Cfd Modeling Of Reverse Osmosis Membrane Flow And Validation With Experimental Results. *Desalination*. 217, 242-250p. 2007.
- Alsvik, I. L.; Hägg, M. B. Pressure Retarded Osmosis And Forward Osmosis Membranes: Materials And Methods. *Polymers*. 5, 303-327p. 2013.
- Colangelo, A.; Marano, D.; Spagna, G.; Sharma, V. K. Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Sea-Water Desalination Systems. *Applied Energy*. 64, 289-305p. 1999.
- Djebedjian, B.; Gad, H.; Khaled, I.; Rayan, M. A. Optimization Of Reverse Osmosis Desalination System Using Genetic Algorithms Technique. Twelfth International Water Technology Conference, Iwtc12 2008, Alexandria, Egypt. 1047-1066p. 2008.
- Fraidenraich, N.; Vilela, O. C.; Lima, G. A.; Gordon, J. M. Reverse Osmosis Desalination: Modeling And Experiment. *Applied Physics Letters American Institute Of Physics*. N. 94. 2009.

- Fraidenraich, N. Improved Solutions For Permeate Concentration Delivery Profiles In Reverse Osmosis Systems. Publicação Interna. Departamento De Energia Nuclear, Grupo De Fontes Alternativas De Energia (Fae), Universidade Federal De Pernambuco. 2011.
- Hassinger, E.; Doerge, T. A.; Baker, P. B. Water Facts: Number 6 Reverse Osmosis Units. Arizona Cooperative Extension, The University Of Arizona • College Of Agriculture • Tucson, Arizona 85721. Publication Number 194019. 1994.
- Kim, S.; Hoek, E. M. V. Modeling Concentration Polarization In Reverse Osmosis Processes. *Desalination*, 186, 111–128p. 2005.
- Kumar, A; Deswal, S. Mathematical Modelling For Separation Of Binary Aqueous Solution Using Hollow Fiber Reverse Osmosis Module. *International Journal Of Civil And Environmental Engineering*. 1:1. 2009.
- Lonsdale, H., Merten, U.; Riley, R. Transport Properties Of Cellulose Acetate Osmotic Membranes. *Journal Of Applied Polymer Science*. 9, 1341. 1965.
- Mauricci, J. J. Vuelco Del Concentrado De Plantas Potabilizadoras Por Membranas A Una Red Cloacal. *Santa Fé. Água Latinoamérica*. VI. 2, N. 3. 2002.
- Mehdizadeh, H., Modeling Of Transport Phenomena In Reverse Osmosis Membranes. 1990. Open Access Dissertations And Theses. Paper 1866.
- Pal, L.; Joyce, M. K.; Fleming, P. D. A Simple Method For Calculation Of The Permeability Coefficient Of Porous Media. *Tappi Journal*. VI. 5, N. 9., 10-16p. 2006.
- Sassi, K. M.; Mutjaba, I. M. Simulation And Optimization Of Full Scale Reverse Osmosis Desalination Plant. 20th European Symposium On Computer Aided Process Engineering – Escape20. S. Pierucci And G. Buzzi Ferraris (Editors). 2010.
- Silva, L. G.; Fator de polarização e coeficiente de permeabilidade em um sistema de osmose reversa acionado por um gerador fotovoltaico. 2006. Dissertação (Mestrado Em Fontes Renováveis De Energia) – PROTEN/DEN, Universidade Federal De Pernambuco.
- Wang, F.; Tarabara, V. V. Coupled Effects Of Colloidal Deposition And Salt Concentration Polarization On Reverse Osmosis Membrane Performance. *Journal Of Membrane Science*. 293, 111–123p. 2007.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE DIFFUSION OF SALTS IN SEMIPERMEABLE MEMBRANES FOR REVERSE OSMOSIS

Abstract. Among the methods used for water desalination, reverse osmosis (RO) is the most evolved and therefore is widely used and is also capable of removing microbiological contaminants. The use of photovoltaic technology (PV) to power an RO system come as a solution to allow the use of this technique in arid and poor electrification regions. This present study aims to present an analytical and experimental study of the diffusion of salts in semipermeable membranes of a reverse osmosis system powered by a photovoltaic generator. Have developed an analytical method, which uses the coefficient of water permeability (k_{per}) was expanded to include the solute diffusion coefficient (k_s) and calculating the average concentration of the permeate (\bar{C}_p), in other words, the concentration of water desalinated. The experimental procedure allowed the extraction of the diffusion coefficient of the solute. This coefficient is adjusted by means of a computer program written in a particular language, and once this known coefficient, the average concentration of the permeate and the concentrate flow (Q (L)), or the waste were calculated. Another objective was to validate the extension of the analytical procedure developed through the comparison between theoretical and experimental results.

Keywords: reverse osmosis, photovoltaic technology, analytical model, diffusion.