

MODELAMENTO DE SISTEMA DE OSMOSE REVERSA ACIONADO POR UM GERADOR FOTOVOLTAICO

Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Gilmário dos Anjos Lima – gilmario@cefetpesqueira.edu.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco, UNED – Pesqueira-PE

Resumo. Um modelo teórico para o estudo de condições operacionais de sistemas de Osmose Reversa (OR) é apresentado. O modelo é aplicado para simular o comportamento de um sistema Osmose Reversa Acionado por Gerador Fotovoltaico (OR-FV) monitorado com sensores de vazão, salinidade, pressão, tensão e corrente de operação. O sistema é acionado por um gerador FV com potência pico de 0,81 kW. A interface entre gerador FV e motor-bomba é feita com um conversor de frequência, operando a uma tensão fixa, escolhida dentro da região de máxima potência do gerador. Considerando a relação dada pela curva de carga (pressão de operação vs. vazão de entrada) o fluxo de permeado é determinado para um dado comprimento de membrana. O desvio dos resultados teóricos em relação aos experimentais foi menor que 14,5%. O modelo pode ser utilizado para obtenção de parâmetros importantes no dimensionamento desses sistemas.

Palavras-chave: Osmose reversa, Sistema fotovoltaico, Modelo Teórico

1. INTRODUÇÃO

Equipamentos de osmose reversa associados a sistemas de bombeamento fotovoltaico podem ser uma boa alternativa para o atendimento do suprimento de água potável em comunidades localizadas em regiões onde a água disponível não atende aos requisitos de nível máximo de salinidade recomendados pela Organização mundial de Saúde (500 mg/L de STD – Sólidos Totais Dissolvidos, onde 1,0 mg/L = 1,0 ppm).

Diversos trabalhos sobre modelamento de sistemas de OR têm sido realizados, desde modelos mais simples (Al-Bastaki e Abbas, 1999) até modelos bastante complexos como o de Alexiadisa et al. (2007) que utilizam técnicas computacionais avançadas, ou os baseados em métodos conhecidos como termodinâmica de tempo finito (Sorin et al., 2006). As propostas para sistemas com fontes renováveis de energia tais como solar e eólica normalmente baseiam-se em simulações computacionais que tratam todos os componentes do sistema (Thompson et al. 2002) ou modelos detalhados que consideram as variações temporais da fonte de energia e seus efeitos no sistema de membranas (Jamal et al., 2004).

Neste trabalho, apresentamos um modelo simples para a simulação de um sistema OR-FV. Uma solução analítica é apresentada podendo ser utilizada para simular o comportamento do sistema sob uma variedade de condições de operação.

2. MODELO ANALÍTICO

O layout de um sistema de OR com três membranas em série é apresentado na Fig. 1.

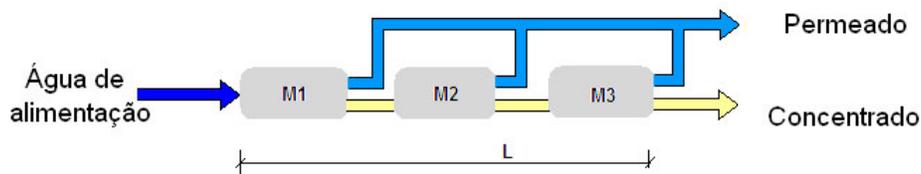


Figura 1 - Representação esquemática de um sistema de OR com três membranas em série.

Em um sistema de membranas a equação de conservação de massa e sais, dada pela Eq. 1, deve ser satisfeita.

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

onde (C_f) é a concentração da água de alimentação, (C_p) do permeado, e ($C(x)$) da água local em uma posição x do arranjo-série. A vazão de alimentação é dada por (Q_f), a vazão de água permeada (Q_p) e a vazão local de água concentrada (Q).

Considerando-se que a água de alimentação é a soma dos fluxos de permeado e concentrado [$Q_f = Q_p(x) + Q(x)$], pode-se escrever a Eq. 1 na forma:

$$C(x) - C_p = \frac{Q_f}{Q(x)} (C_f - C_p) \quad (2)$$

De acordo com a geometria das unidades OR, todo o fluxo de permeado é misturado ao longo do sistema. Pode-se portanto assumir que não há dependência local da concentração do fluxo de permeado. Assim, considera-se (C_p) uniforme e com um baixo nível de salinidade (200 mg/L, por exemplo). A pressão osmótica correspondente é escrita como (Π_p).

Um modelo muito simples pode ser elaborado para descrever as características operacionais do sistema OR. Assume-se geometria unidimensional e que nenhum efeito inercial existe, isso significa que a resposta de tempo do sistema é muito rápida. Como será mostrado na comparação entre os resultados teóricos e experimentais as predições do modelo são satisfatórias para a aplicação fotovoltaica.

Assumindo que existe uma relação linear entre o fluxo local de permeado e a diferença de pressão ao longo do sistema, a vazão de permeado por unidade de comprimento ($q_p(x)$) pode ser escrita como

$$q_p(x) = k_{perm} A [P(x) - f_p (\Pi(x) - \Pi_p)] \quad (3)$$

onde (k_{per}) é a constante de permeabilidade da membrana, (A) a largura da membrana, ($\Pi(x)$) a pressão osmótica local, ($P(x)$) a pressão local em (x), dentro do vaso de osmose reversa e f_p o fator de polarização. Este parâmetro leva em consideração o aumento na concentração de íons na superfície da membrana como resultado da retenção do soluto.

Neste trabalho o fator (f_p) é considerado igual a 1,1 (Schneider e Tsutiya, 2001).

Para a produção de permeado em uma posição qualquer ao longo da membrana a pressão de operação ($P(x)$) deve satisfazer à seguinte condição: $P(x) > f_p (\Pi(x) - \Pi_p)$. Utilizando-se a Eq. (3) esta condição pode ser escrita como

$$P(x) > f_p (\Pi_f - \Pi_p) \cdot \frac{Q_f}{Q(x)} \quad (4)$$

Considerando-se que vazão local de permeado pode ser expressa em termos da variação do fluxo de concentrado ($q_p(x) = -dQ/dx$) e que a diferença na pressão osmótica ($\Pi(x) - \Pi_p$) é função da diferença na concentração, pode-se re-arranjar a Eq. (3) como segue:

$$\frac{dQ}{dx} = -k_{perm} \cdot A [P(x) - v_s RT \frac{Q_f}{Q(x)} f_p (C_f - C_p)] \quad (5)$$

onde (v_s) é o número de íons presente na solução (≈ 2 para cloreto de sódio), R a constante universal dos gases e T a temperatura absoluta.

Se ($P(x)$) é constante, e pode ser demonstrado que esta é uma hipótese razoável (Al-Bastaki, e Abbas, 2000) a Eq. (5) é uma equação diferencial de primeira ordem que descreve o comportamento físico do sistema de OR. Separando-se as variáveis e considerando que $Q = Q_f$ em ($x=0$) a solução da Eq. (5) será:

$$Q_f - Q(x) + \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{\alpha Q_f - 1}{\alpha Q(x) - 1} \right) = \Gamma x \quad (6)$$

onde: $\Gamma = k_{perm} \cdot A \cdot P$ e $\alpha = \frac{P}{f_p (\Pi_f - \Pi_p) Q_f}$

A solução obtida fornece o comprimento (x) em função de (Q) ($x = x(Q)$), dependente de dois parâmetros (Γ) e (α). O parâmetro (Γ) é determinado pela intensidade da pressão de trabalho e (α) é dado pelas condições na entrada das membranas, concentração e vazão de água de alimentação, juntamente com a pressão. A vazão de permeado é dada pela diferença no primeiro membro da Eq. (6) ($Q_f - Q(x)$) a qualquer posição (x) ao longo das membranas.

As condições operacionais das membranas estão sujeitas a restrições severas especificadas pelos fabricantes: pressão de operação mínima e máxima, vazão mínima e máxima e, máximo fator de recuperação (FR). O fator (FR) é definido pela relação da vazão total de permeado ($Q_{p,t}$) pela vazão de alimentação ($FR = Q_{p,t} / Q_f$).

3. METODOLOGIA

O sistema OR-FV utilizado em nosso experimento é acionado por 18 módulos fotovoltaicos de 45 Wp cada (potência pico total: 0,81 kW). A interface entre gerador e motor-bomba é feita com um conversor de frequência, operando a uma tensão fixa, escolhida dentro da região de máxima potência do gerador FV. O conjunto de três membranas em série apresenta comprimento total de 3 m. A membrana utilizada foi a RE-2540-TE da SAEHAN CSM que apresenta um diâmetro de 2,5 polegadas e comprimento de 40 polegadas.

A corrente e tensão na saída do gerador, bem como a irradiância incidente são medidas. O sistema de OR foi montado e equipado com sensores de vazão, pressão e salinidade, todos conectados a um sistema de aquisição de dados.

As medidas foram realizadas para água de alimentação com salinidades de 2000 e 5000 mg/L. Os dados foram coletados a cada segundo e registrados em intervalos de um minuto.

A vazão de alimentação (Q_f) varia com a irradiância solar incidente no gerador FV (I_{col}). A relação entre (Q_f) e (I_{col}) fornece a curva característica do sistema FV de bombeamento FV.

A curva característica do sistema é usualmente representada por um polinômio de segundo grau (Fraidenraich e Vilela, 2000).

A curva de carga do sistema OR é dada pela relação (P vs. Q_f).

Com o conhecimento dos valores de irradiância, utilizando as correlações das curvas características do sistema, e das curvas de carga, pode-se determinar, através da Eq. 6 a vazão de água permeada para um dia qualquer.

4. RESULTADOS

A Fig. 2 mostra a curva característica do sistema de bombeamento FV e a Fig. 3 mostra a curva de carga do sistema de membranas. Ambas relações são dependentes da concentração (2000 e 5000 mg/L).

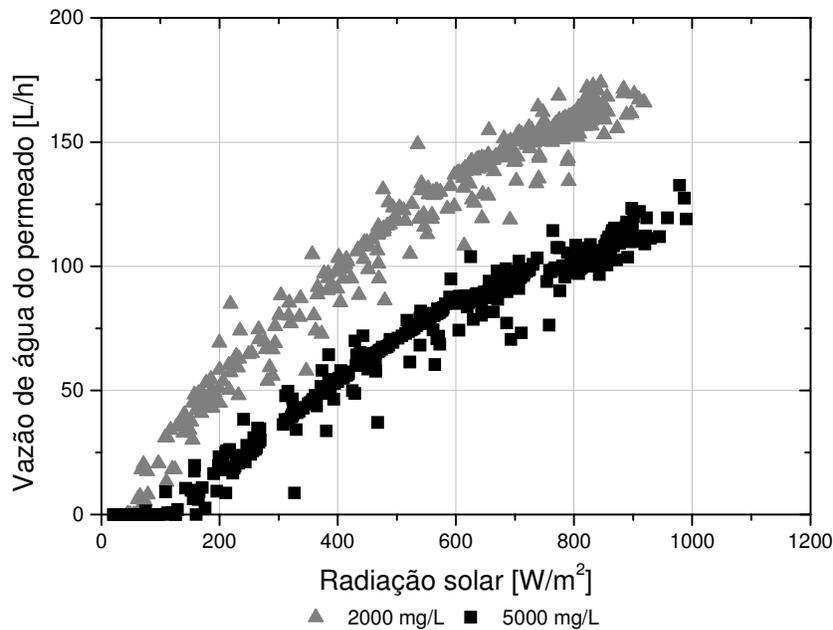


Figura 2 - Curva característica do sistema FV de bombeamento. Concentrações de 2000 e 5000 mg/L.

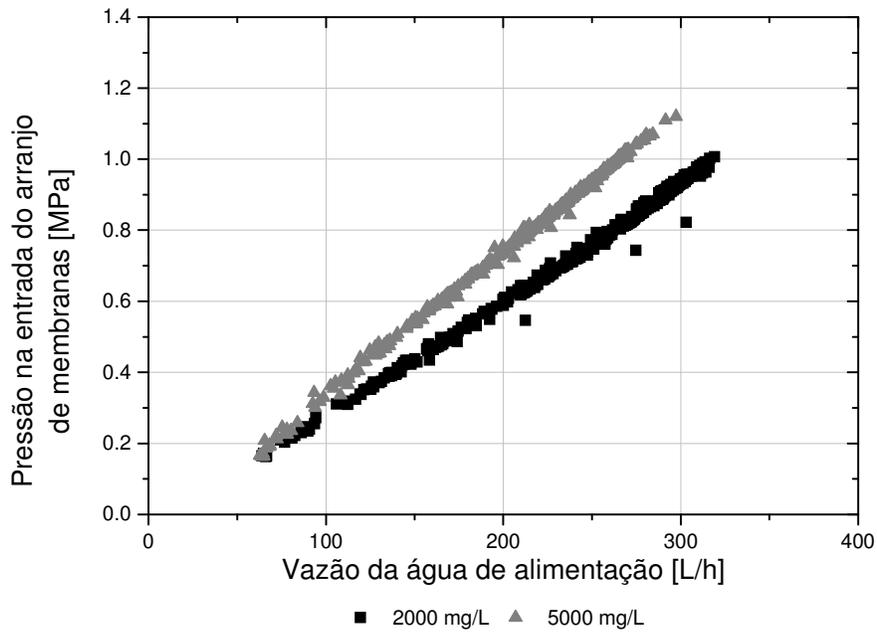


Figura 3 - Curva de carga do sistema OR-FV. Concentrações de 2000 e 5000 mg/L.

A Fig. 4 mostra os valores teóricos e experimentais da vazão de permeado obtida em função da pressão do sistema de OR-FV para dois dias com valores de salinidade de 2000 e 5000 mg/L.

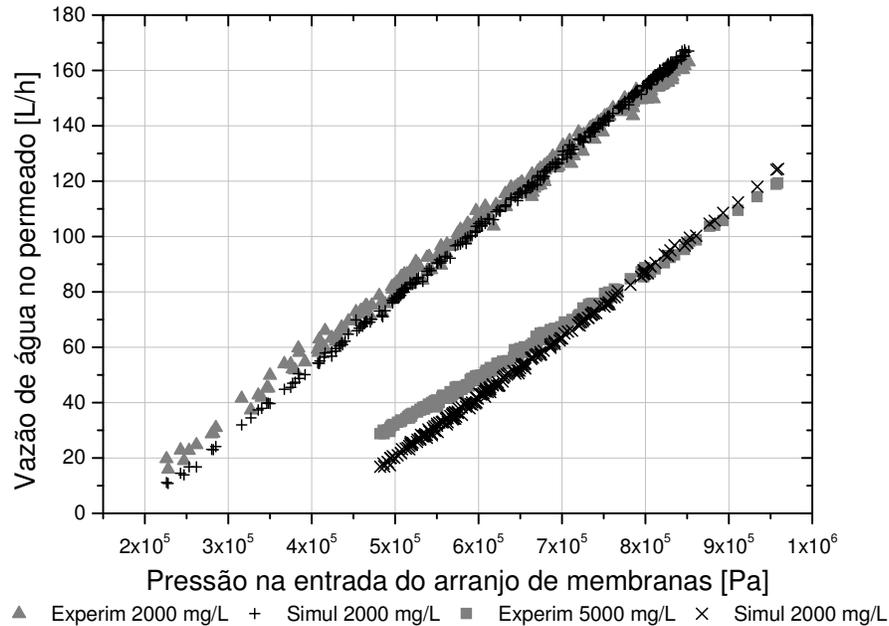


Figura 4 - Comparação entre resultados teóricos e experimentais para salinidades de 2000 e 5000 mg/L.

O desvio quadrático médio obtido para a salinidade de 2000 mg/L foi de 3,8%. Para 5000 mg/L o desvio foi maior, da ordem de 14,5%. Verifica-se um distanciamento das curvas experimental e simulada na região de pressões mais baixas. Este distanciamento deve-se ao comportamento da constante de permeabilidade das membranas k_{perm} , que é elevada para baixas pressões e decresce à medida em que atinge uma certa compactação determinada pela diferença entre pressão aplicada e pressão osmótica (ΔP) (Alexiadis et al., 2007), como pode ser observado na Fig. 5. Este parâmetro tende a um valor constante para (ΔP) mais elevado (da ordem de 0,45MPa para o caso do sistema ensaiado). O comportamento de k_{perm} explica também o maior desvio obtido para 5000 mg/L, pois quanto maior a concentração

maior será a pressão de operação necessária para atingir a compactação final da membrana. Assim, ao se utilizar o valor de k_{perm} constante, correspondente à compactação total da membrana, consegue-se reproduzir bem apenas o comportamento do sistema para pressões mais elevadas. Portanto, é possível reduzir o desvio apresentado, levando-se em consideração as variações de k_{perm} .

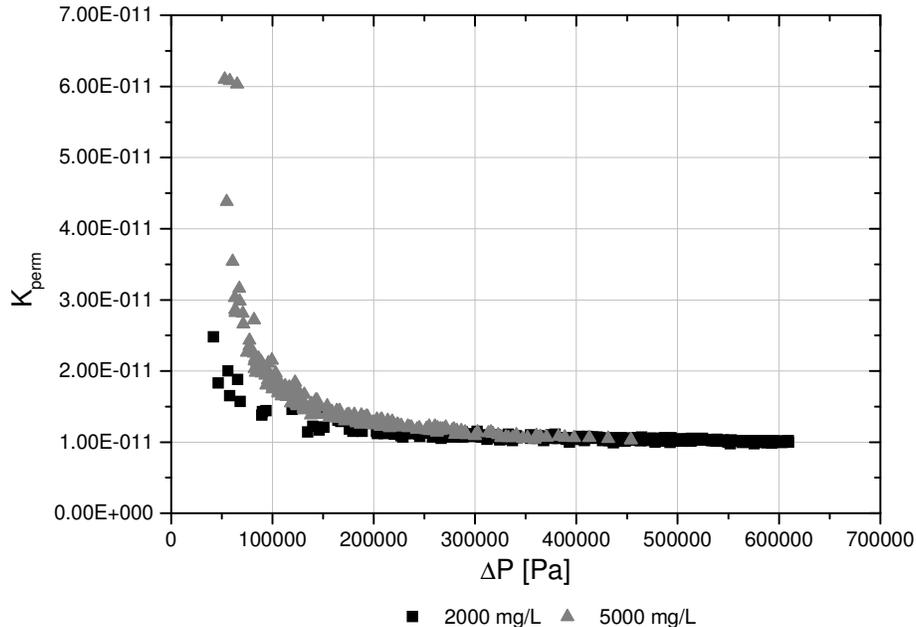


Figura 5 - Comportamento da constante de permeabilidade das membranas k_{perm} em função da diferença entre pressão aplicada e pressão osmótica (ΔP).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um modelo teórico simples que considera os principais aspectos do comportamento do sistema OR foi desenvolvido. Para uma dada salinidade, as condições iniciais para a vazão de alimentação e pressão de operação podem ser estabelecidas. A evolução do sistema é completamente determinada por essas condições.

Os resultados obtidos com as simulações apresentaram desvios quadráticos médios da ordem de 3,8% e 14,5% para 2000 e 5000 mg/L respectivamente. O desvio pode variar dependendo do parâmetro k_{perm} utilizado, que no caso estudado, foi considerado constante. Para um melhor ajuste é necessário considerar as variações de k_{perm} com a pressão aplicada. O modelo elaborado pode ser uma ferramenta útil para o projeto, predição e simulação do comportamento desses sistemas.

REFERÊNCIAS

- A1-Bastaki Nader M. e Abbas A.. (1999). Modeling an industrial reverse osmosis unit. *Desalination*. 126, 33-39.
- A1-Bastaki N. M. e Abbas A.. (2000). Predicting the performance of RO membranes. *Desalination*. 132, 181-187
- Alexiadis A., Wiley D.E., Vishnoib A., Leea R.H.K, Fletcher D.F. e Baoa J.. (2007). CFD modelling of reverse osmosis membrane flow and validation with experimental results. *Desalination*. 217, 242-250.
- Fraidenraich N. e Vilela O. C., (2000). Performance of solar systems with non-linear behavior calculated by the utilizability method: application to PV solar pumps. *Solar Energy*. 69, 131-137.
- Jamal K., Khan M.A. e Kamil M. (2004). Mathematical modeling of reverse osmosis systems. *Desalination*. 160, 29-42.
- Schneider, R.P. e Tsutiya, M.T. (2001). *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso*, 1st. edn. ABES, Brasil.
- Sorin M., Jedrzejak S. e Bouchard C., (2006). On maximum power reverse osmosis separation process. *Desalination*. 190, 212-220.
- Thomson M., Miranda M. S. e Infield D.. (2002). A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range. *Desalination*. 153, 229-236.

MODELING PHOTOVOLTAIC-POWERED REVERSE OSMOSIS SYSTEM

Abstract. *A theoretical model to study the operational conditions of Reverse Osmosis systems (RO) is presented. The model is applied to simulate the behavior of a Photovoltaic-Powered Reverse Osmosis System (PV-RO) monitored with sensors for measuring water flow, salinity, pressure voltage and current of operation. The system is powered by a PV generator with peak power of 0.81 kW. The interface of the PV generator and the motor-pump is a frequency converter, programmed to maintain the array working at a fixed voltage, chosen within the region of the maximum power. Considering the relation given by the load curve (pressure vs. feed flow rate) the permeated flow rate was determined theoretically for a given membrane length. The deviation between calculated and experimental results is smaller than 14.5 %. The model can be used to determine parameters important in the sizing of those systems.*

Key words: *Reverse osmosis, Photovoltaic system, Theoretical model*