

SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE REVERSA ACIONADO POR GERADOR FOTOVOLTAICO COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

Gilmário dos Anjos Lima – gilmario@ufpe.br

Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

3.5 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

Resumo. *Uma fração importante dos aquíferos da Região Nordeste do Brasil apresenta água com níveis de salinidade elevados. A população que habita essas regiões não conta com suprimento de água nem de energia elétrica convencional, para acionamento de possíveis sistemas de bombeamento e dessalinizadores. Entretanto, sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados em forma confiável para operá-los. Neste trabalho é estudado o comportamento operacional de um sistema de osmose reversa com três unidades de membranas em série, capacidade de produção de 250 l/h e água com grau de salinidade de 2.000 e 5.000 mg/L. O sistema de osmose reversa está acoplado a um gerador fotovoltaico (0,88 kWp) com um conversor de frequência como interface entre ambos. Determinam-se as relações de vazão de permeado e vazão de água de alimentação versus radiação solar e potência elétrica, com a finalidade de realizar estimativas de produção de água dessalinizada a longo prazo, seja por meio de séries temporais ou pelo método de utilizabilidade. Usando este último método foi estimada a produção mensal e anual de água permeada e de água de alimentação. A produção diária, média anual, de água permeada resulta ser igual a 860 L/dia para 2.000 mg/L e 500 L/dia para 5.000 mg/l. Esta produção permite atender a demanda diária de água de uma população de 400 e 200 habitantes, respectivamente. Calcula-se também o fator de recuperação, ou seja a relação de água permeada e água de alimentação. As condições operacionais que definem este parâmetro devem ser tais que não superem o valor especificado pelos fabricantes, com a finalidade de garantir a vida útil das membranas. Descrevem-se rotinas de manutenção e precauções a serem adotadas durante a utilização do equipamento. Valores indicativos do custo da água potável são mencionados.*

Palavras-chave: *Gerador Fotovoltaico, Osmose Reversa, Dessalinização de Águas Salobras.*

1. INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil é habitada, em parte, por pequenas comunidades desprovidas de infra-estrutura básica, como energia elétrica e/ou abastecimento de água. Escassez de água potável é uma das desvantagens principais nesses lugares. Às vezes água salgada subterrânea é a única fonte de água disponível ou, se a fonte for um reservatório de água superficial, está sujeito a intenso processo de evaporação (2.500 mm/ano) e a qualidade da água deteriora com o tempo.

A região semi-árida do Nordeste do Brasil, conhecido pelo nome de "Polígono da Seca", com aproximadamente um milhão de km², é localizado em uma formação geológica cristalina que se estende ao longo de mais da metade daquela área. Aquíferos fundos, baixo fluxo de água e níveis de salinidade altos caracterizam a maioria das águas achadas nessas terras. A Organização Mundial de Saúde (em inglês, HWO) define o nível de 500 mg/L como a máxima concentração admissível de sais na água para consumo (potável). Vários tipos de sais são necessários para metabolismo humano, mas eles não podem exceder certos limites, a menos que danos sérios para saúde humana possam ser causados.

Bombeamento fotovoltaico é hoje uma tecnologia disponível e madura capaz de resolver o problema da falta de energia elétrica e água ao mesmo tempo. Porém, muito frequentemente a extração

de água deveria ser combinada com um processo de dessalinização para prover água potável para as pessoas e animais. Outras necessidades humanas, como água para propósitos sanitários, não requerem água potável. Osmose reversa acionada por geradores de fotovoltaicos é uma das técnicas capazes de dar uma resposta ao problema da dessalinização.

As grandezas físicas pertinentes ao desempenho de sistemas podem ser expressadas em termos do volume de água a ser dessalinizado (V_t) e volume de água permeado (V_p). Este trabalho determina as informações básicas necessárias para a estimativa a longo e médio prazo de ambas as magnitudes. Valores diários médios mensais são calculados durante cada mês do ano. A relação (V_p/V_t), chamada fator de recuperação (FR), é um parâmetro operacional importante do qual o ciclo de vida da membrana depende. É relacionado ao número de unidades de osmose reversas que estão conectadas em série e não deveriam ser excedidos os valores especificados, estabelecidos pelos fabricantes, para garantir seu tempo de vida útil.

Sistemas de osmose reversa para água do mar (40.000 mg/L) foram estudados por Thomson e Infield (2002) e Thomson *et al.* (2002). Acionados por um gerador fotovoltaico de 2,4 kWp, o sistema de osmose reversa produz uma média anual de 3 m³/dia. Um procedimento de simulação usado por Mohsen e Jaber (2001), para dessalinização de água salobra (3.000 a 5.000 mg/L), mostrou que valores baixos de consumo específico de energia podem ser obtidos quando o gerador fotovoltaico aciona um motor CC (corrente contínua) acoplado a uma caixa de redução. Uma estratégia de otimização que relaciona as potências necessárias e o consumo de energia é apresentada por Laborde *et al.* (2001). Os autores mostram que o tipo de membrana e a eficiência da bomba afetam fortemente o desempenho do sistema. Uma demonstração de uma pequena unidade de osmose reversa com gerador fotovoltaico, 50 a 100 W, foi realizada com sucesso, porém, com consumo específico de energia bastante elevado (Joyce *et al.*, 2001). Carvalho *et al.* (2004) desenvolveu um projeto para provisão de água potável em uma comunidade rural no semi-árido do Brasil (latitude 3°44'). Foram investigadas duas estratégias operacionais: a) Uma planta OR-FV (Osmose Reversa com Gerador Fotovoltaico) é equipada com um motor CC; e b) Um motor de indução trifásico é usado. Pela análise dos dados registrados a segunda opção é escolhida como a melhor alternativa. Ao término do período descrito - janeiro (20 dias), fevereiro e março de 2001- a OR-FV equipada com motor de indução de trifásico teve uma produção total de água potável de 38.413 litros e um consumo elétrico total de 11.643 kWh.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

O equipamento utilizado está integrado pelos seguintes componentes e dispositivos:

- a) Bomba de Entrada (220 V – monofásico – 1/3 CV \cong 0,25 kW);
- b) Bomba de Alta Pressão (220 V – monofásico – 1/3 CV \cong 0,25 kW);
- c) Bomba Dosadora (220V – 0,11 A);
- d) Filtro de cartucho – O elemento filtrante é o cartucho de celulose aglomerada e polipropileno 5 micra (vazão máxima de operação de 1,0 m³.h⁻¹ e pressão diferencial máxima de 1,8 - 2,4 kg.m⁻²);
- e) Cartuchos de membranas – Tubo de alta pressão confeccionado em aço inox 304, inteiramente montado com membranas de osmose reversa (Pressão máxima de operação: 355,0 psi \cong 2,44 MPa);
- f) Gerador fotovoltaico: 16 módulos em série de 55 Wp (0,88 kWp);
- g) Conversor de frequência: 2 HP.

O layout do sistema é mostrado na Fig. 1.

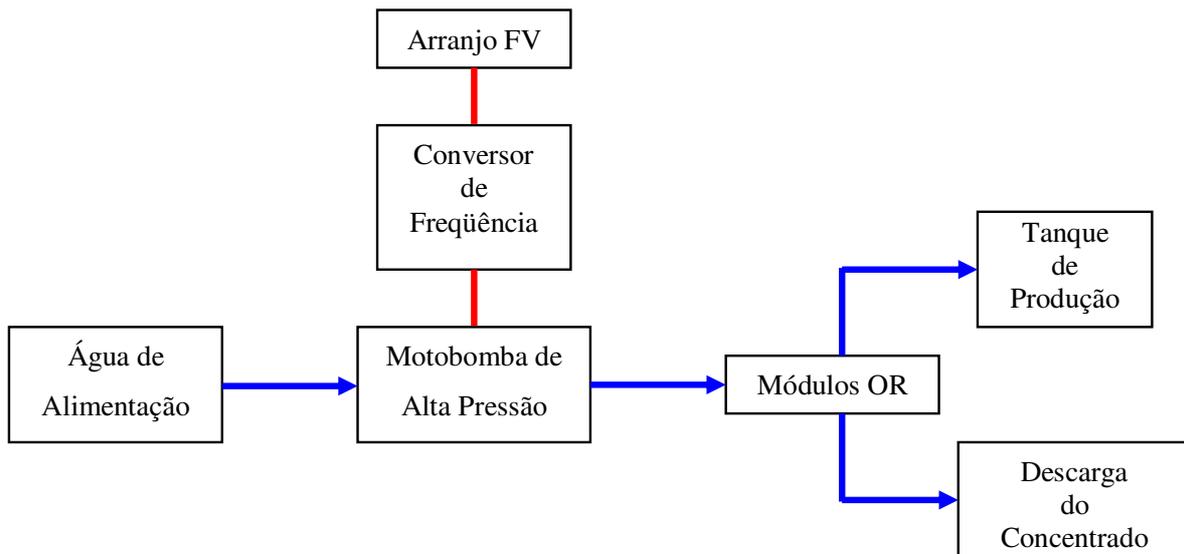


Figura 1 – Layout do sistema de osmose reversa.

As amostras de água utilizadas possuem uma concentração salina de 2000 e 5000 ppm. Estes valores de concentração foram escolhidos por ser representativos da salinidade das águas que se encontram na região do semiárido do estado de Pernambuco.

2.1 Metodologia

O procedimento a ser descrito envolve duas fases: a) Determinação experimental da relação entre fluxo de água do permeado e fluxo de água de alimentação, ambos em função da radiação solar coletada. Esses dados permitem gerar duas curvas características: $(\dot{V}_t \text{ vs. } I_{\text{coll}})$ e $(\dot{V}_p \text{ vs. } I_{\text{coll}})$; b) A relação entre (\dot{V}_t) e (\dot{V}_p) e a potência elétrica na saída do gerador fotovoltaico (P_e) também é determinada. Isto porque as curvas como função da potência elétrica $(\dot{V}_p \text{ vs. } P_e)$, por exemplo, é menos dependente das condições locais que as curvas obtidas em função da radiação solar. Assim, para este tipo de equipamento, os dados obtidos poderiam ser utilizados em outros locais. Obter as curvas características para um lugar diferente $(\dot{V}_t \text{ vs. } I_{\text{coll}})$ e $(\dot{V}_p \text{ vs. } I_{\text{coll}})$, requer simplesmente obter a nova relação entre potência elétrica de saída do gerador FV e a radiação solar. A segunda parte do procedimento envolve o método de utilizabilidade (Fraidenraich e Vilela, 2000) para calcular a volume médio diário de água do permeado (V_p) e o volume diário de água de alimentação (V_t), para cada mês do ano. Finalmente, o fator de recuperação mensal e anual (FR) pode ser calculado facilmente.

É importante observar que o desempenho do sistema OR depende fortemente da posição da válvula de descarga, que está localizada na saída do fluxo de concentrado da unidade de OR. Esta válvula regula a pressão de funcionamento do sistema OR e o fluxo de água de alimentação (\dot{V}_t) .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segue-se a apresentação dos resultados experimentais mostrando o fluxo de água do permeado e de alimentação em função da radiação solar e da potência elétrica para as concentrações de sais da água de alimentação de 2.000 mg/L e 5.000 mg/L.

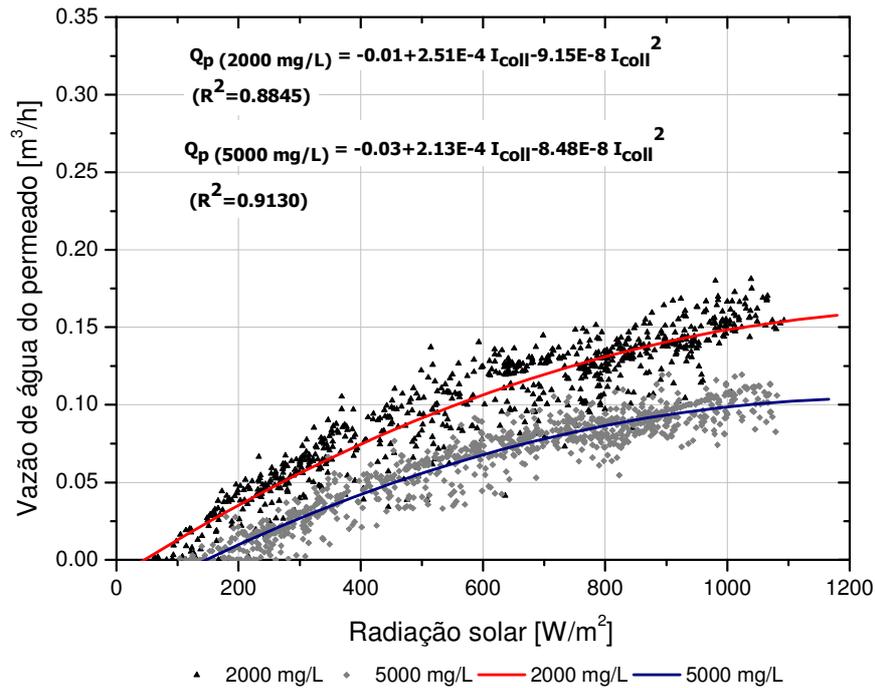


Figura 2 – Vazão de água do permeado em função da radiação solar (salinidade de entrada: 2.000 e 5.000 mg/L)

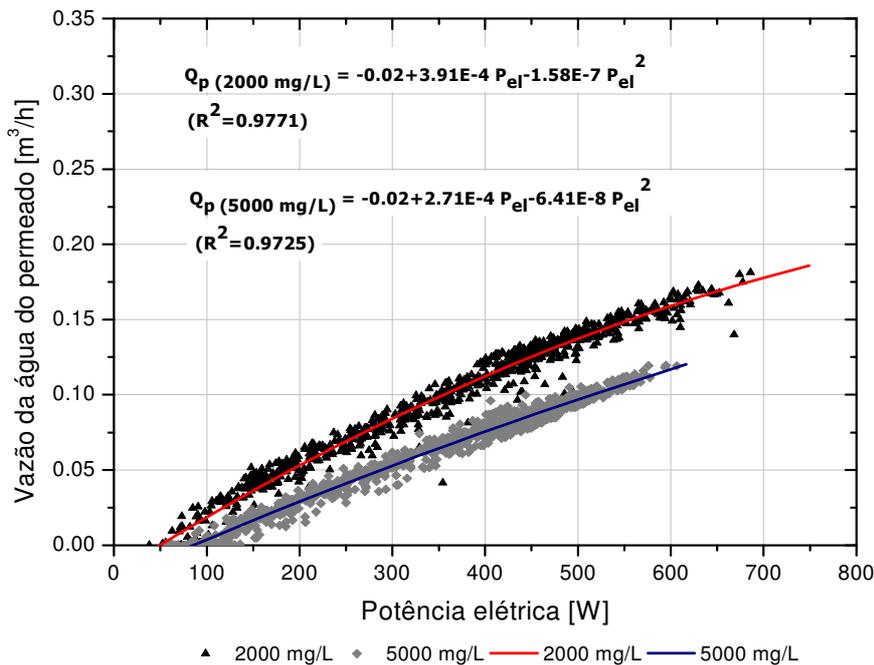


Figura 3 – Vazão de água do permeado em função da potência elétrica (salinidade de entrada: 2.000 e 5.000 mg/L)

Todas as curvas das Figs. 2 e 3 foram aproximadas por um polinômio de segundo grau que representa os resultados experimentais com coeficientes de determinação compreendidos entre 0,88 e 0,98. Para uma radiação de 1.000 W/m² o sistema de osmose reversa produz 0,15 e 0,10 m³/h, para salinidade de entrada de 2.000 e 5.000 mg/L, respectivamente. Isto significa uma produção diária, para um radiação de 5 kWh/m², i.e., de 750 e 600 litros por dia.

Isto é apenas uma estimativa da ordem de grandeza da produção diária de água. Como será mostrado, podem ser esperados valores mais altos do volume de água do permeado para a cidade do Recife, uma vez que durante alguns meses, a radiação apresenta valores mais elevados.

A vazão de água de alimentação é mostrada nas Figs. 4 e 5, para ambos os níveis de salinidade da água de alimentação (2.000 e 5.000 mg/L).

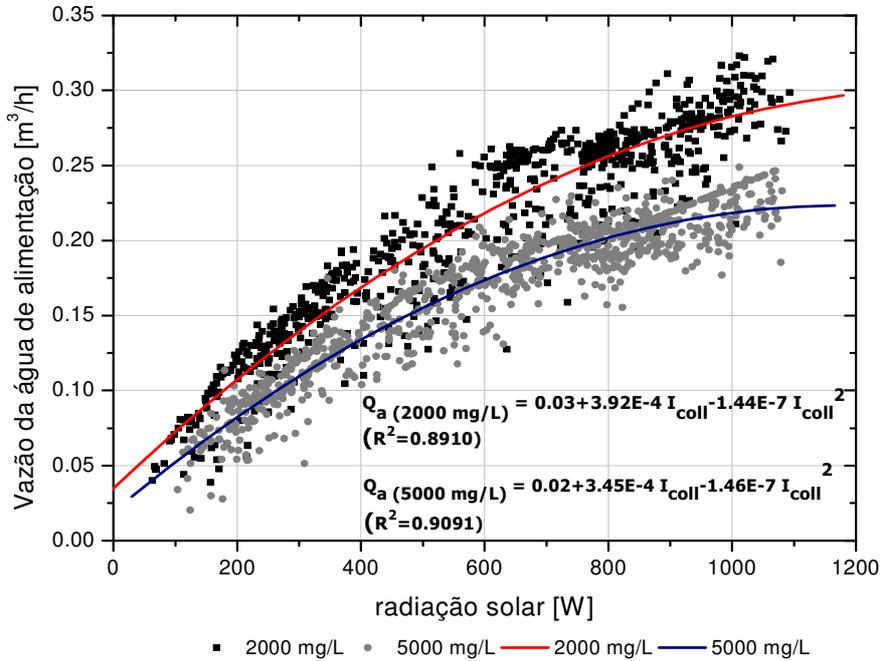


Figura 4 – Vazão de água de alimentação em função da radiação solar (salinidade de entrada: 2.000 e 5.000 mg/L)

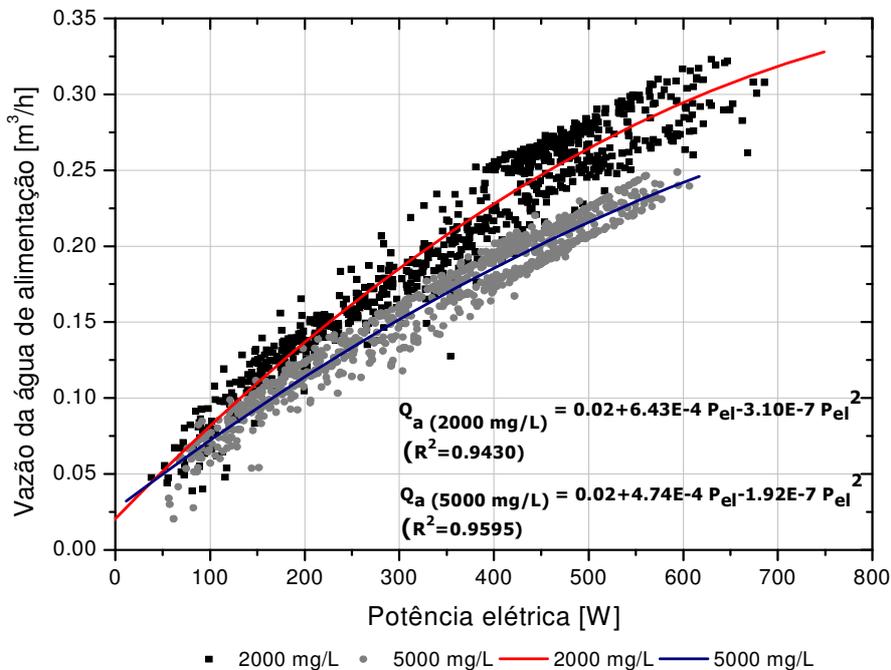


Figura 5 – Vazão de água de alimentação em função da potência elétrica (salinidade de entrada: 2.000 e 5.000 mg/L)

Analogamente ao que ocorre com a vazão de água do permeado, essas curvas são bem representadas por polinômios de segundo grau. Nas Figs. 2 a 5 pode ser observado também que a dispersão das curvas quando representadas em função da potência elétrica (Figs. 3 e 5) é muito menor que a dispersão das curvas quando representadas em função da radiação solar (Figs. 2 e 4).

Estimativas do consumo de água podem ser realizados. Para uma radiação de 1.000 W/m² a vazão de água de entrada do sistema de osmose reversa (vazão da água de alimentação) é igual a 0,27 m³/h e 0,22 m³/h com 2.000 e 5.000 mg/L, respectivamente. Isto significa um consumo diário de 1.350 e 1.100 litros por dia, para uma radiação de 5 kWh/m². Este é o volume a ser bombeado para se obter 750 e 600 litros de água do permeado por dia.

Cabe chamar a atenção para o fato de que a produção de um dado volume de água de permeado requer do bombeamento de um volume consideravelmente maior de água de alimentação. Isto se traduz em um custo de energia mais elevado, quando comparado com o custo do processo em que a quantidade de água a ser bombeada é apenas a água do permeado.

4. ESTIMATIVA A LONGO PRAZO DA ÁGUA DO PERMEADO E ALIMENTAÇÃO

As curvas da vazão de água do permeado e de alimentação em função da radiação solar caracterizam, na forma de uma relação “input-output”, o comportamento do sistema. Como mostrado por Fraidenraich e Vilela (2000), a estimativa a longo prazo do volume de água bombeada por um sistema de bombeamento pode ser calculada pelo método de utilizabilidade. O procedimento pode ser generalizado para calcular, neste caso, o valor médio a longo prazo dos volumes de água do permeado e de alimentação. Como já foi mencionado, ambos os volumes são necessários para calcular o fator de recuperação mensal e anual.

As curvas características da vazão de água do permeado e de alimentação são expressadas, primeiro, como função da variável adimensional (X), igual a

$$X = \frac{I_{coll}}{\bar{I}_{coll}} \tag{1}$$

onde I_{coll} é igual a, H_{coll} , a estimativa a longo prazo da radiação solar diária coletada, dividido pelo tempo de coleta (τ_{col}) do dia médio do respectivo mês.

O polinômio de segundo grau, que representa qualquer uma das curvas características (\dot{V}_i vs. I_{coll}) e (\dot{V}_p vs. I_{coll}), é escrito como

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \cdot (X - X_c) \frac{X_M - X}{X_M - X_c} \tag{2}$$

Onde (X_C) e (X_M) são as duas raízes reais da equação de segundo grau e \dot{V}_0 um parâmetro da curva.

Finalmente, a estimativa a longo prazo do volume de água mensal (\bar{V}) é dado por

$$\bar{V} = \dot{V}_0 \cdot H_{coll} \cdot \Phi(X_C) \cdot \left(1 - \frac{2}{X_M - X_C} \cdot \frac{X_{coll,max} - X_C}{X_{coll,max} + 1} \right) \tag{3}$$

onde $X_{coll,max}$ é definida como $(0,864I_{oeff,coll} / \bar{I}_{coll})$, e $I_{oeff,coll}$ é a radiação solar extraterrestre coletada ao meio-dia, para o dia médio de um determinado mês. O número 0.864 é um coeficiente recomendado por Hollands e Huget (1982) para calcular a radiação solar máxima para uma determinada localidade. $\Phi(X_C)$ é a função utilizabilidade. Representa-se por uma expressão simples proposta por Zarmi (1987), escrita como

$$\Phi(X_C) = \left(1 - \frac{X_C}{X_{coll,max}}\right)^{X_{coll,max}} \tag{4}$$

que representa bem o comportamento da função utilizabilidade para valores pequenos e intermediários de X_C .

4.1 Resultados do método de utilizabilidade

Foram estimados os valores mensais e anuais dos volumes de água do permeado e da alimentação para a cidade de Recife (Figs. 6 e 7).

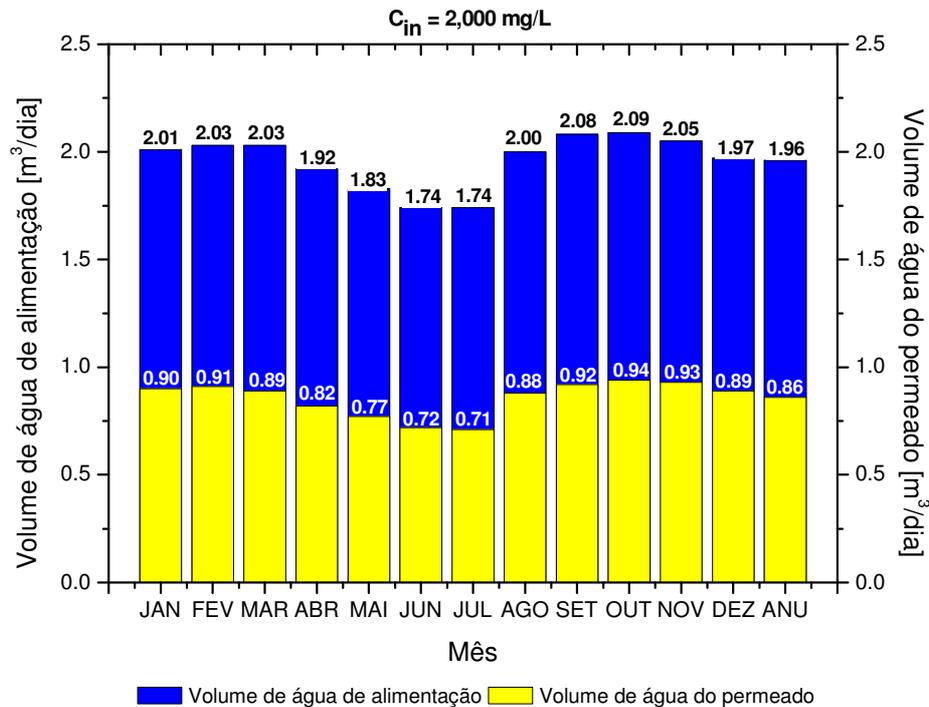


Figura 6 – Estimativa diária a longo prazo do volume de água do permeado e da alimentação, valores mensais e anuais (salinidade de entrada: 2.000 mg/L)

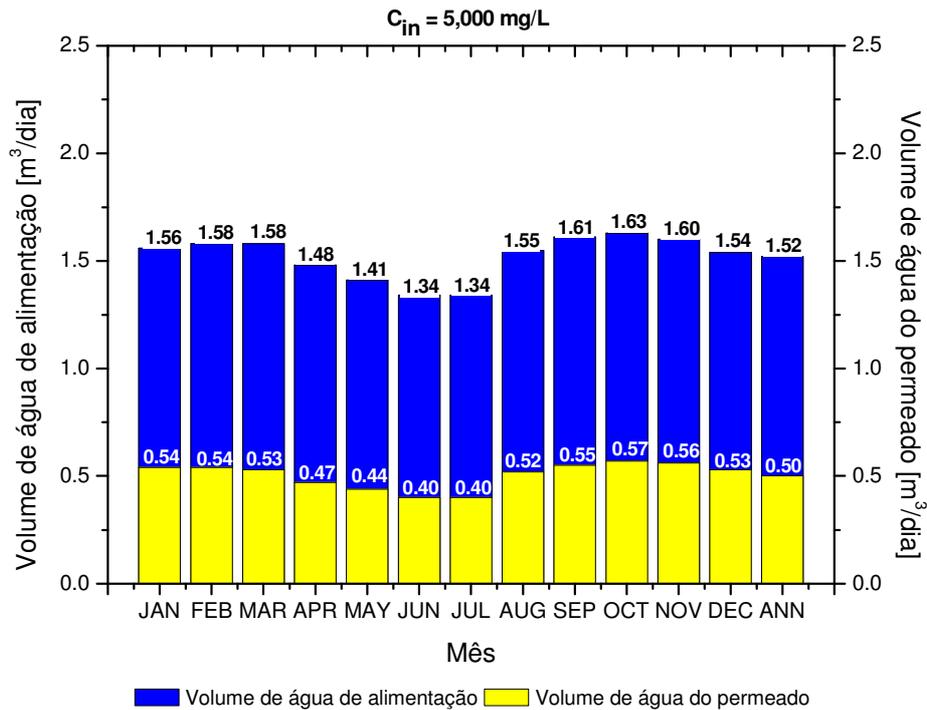


Figura 7 – Estimativa diária a longo prazo do volume de água do permeado e da alimentação, valores mensais e anuais (salinidade de entrada: 5.000 mg/L)

A produção diária, média anual, de água do permeado, 860 L/dia para 2.000 mg/L e 500 L/dia para 5.000 mg/L podem satisfazer a demanda da população de uma aldeia rural de 200 a 400 pessoas, dependendo do nível de salinidade da água de alimentação.

A relação entre os volumes de água do permeado e da alimentação, denominado fator de recuperação (FR) pode ser calculado para cada mês do ano. Um bom indicador desse parâmetro é o valor anual, que tem como resultado 0,40 e 0,33 para 2.000 e 5.000 mg/L, respectivamente. O primeiro valor é um pouco maior que o valor recomendado pelo fabricante das membranas (FR=0,38). Para diminuir este valor seria suficiente reduzir a pressão na saída do concentrado dos módulos de OR. Isto pode ser facilmente obtido pela abertura da válvula de descarga do concentrado na saída da unidade OR.

5. OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE OSMOSE REVERSA E OS CUSTOS DA ÁGUA DO PERMEADO

Uma proposta de funcionamento de um sistema de dessalinização por osmose reversa acionado por gerador fotovoltaico requer algumas operações básicas e providencias, no sentido de proteger e garantir a vida útil das membranas.

- A) Embora com um determinado grau de concentração salina, é essencial uma boa qualidade da água na entrada do sistema de osmose reversa. Isso significa que, dependendo das características da fonte de água local, poderá ser necessário preceder o equipamento de osmose reversa de um equipamento de pré-tratamento de água.
- B) Ao término da operação com o equipamento, diariamente, as membranas têm que ser limpas com água permeada.
- C) Uma vez por ano as membranas devem ser sujeitas a uma limpeza profunda para remover os depósitos sobre sua superfície e poros.

- D) As membranas têm que ser substituídas periodicamente de acordo com especificações dos fabricantes.
- E) Adequar o destino dado a água do concentrado que normalmente contém sais a níveis elevados de concentração (rejeito).

Naturalmente, essas providências resultarão em um aumento do custo final da água permeada. Uma estimativa para o custo de água potável, considerando o custo do investimento, duplicado por causa do custo adicional de manutenção, operação e salário de um técnico de meio período, resulta em valores de 6 a 10 US\$/m³ para salinidades de 2.000 e 5.000 mg/L, respectivamente. Esses custos são da ordem dos valores citados na literatura técnica.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

O sistema de osmose reversa formado por três cartuchos de membranas acionados por um gerador fotovoltaico (0,88 kWp) pode produzir 860 e 500 L/dia de água permeada com níveis de salinidade de 2.000 e 5.000 mg/L, respectivamente.

A produção de água do permeado pode satisfazer a demanda de uma população de 200 a 400 pessoas, dependendo do nível de salinidade da água de alimentação. Os fatores de recuperação são iguais a 0,44 e 0,33 para 2.000 e 5.000 mg/L, respectivamente. O primeiro valor deve ser ligeiramente reduzido para atender as especificações de fabricantes.

Custos da água do permeado, levando em consideração a manutenção e operação, se encontram entre 6 e 10 US/m³. Esses custos são da ordem dos valores citados na literatura técnica.

REFERÊNCIAS

- Carvalho, P. C. M., Riffel, D. B., Freire, C., Montenegro, F. F. D. 2004. The Brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant. *Progress in Photovoltaics*, 12, pp. 373 - 385.
- Fraidenraich, N., 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, pp. 131-137.
- Holland, K. G. T., Huget, R. G. 1982. A Probability Density Function for the Clearness Index, with Applications. *Solar Energy*, 30, pp. 235- 253.
- Joyce, A., Loureiro, D., Rodrigues, C., Castro, S. 2001. Small reverse osmosis units using PV systems for water purification in rural places. *Desalination*, 137, pp. 39-44.
- Laborde, H. M., França, K. B., Neff, H., Lima, A. M. N. 2001. ,*Desalination*, 133 (2001), 1-12
- Mohsen, M. S., Jaber, J. O. 2001. A photovoltaic-powered system for water desalination. *Desalination*, 138, pp. 129-136.
- Thomson, M., Infield, D. 2002. A photovoltaic-powered seawater reverse osmosis system without batteries, *Desalination*, 153, pp 1-8.
- Thomson, M., Miranda, M.S., Infield, D. 2002. A wind-powered seawater reverse osmosis system without batteries. *Desalination*, 153, pp. 229-236.
- Zarmi, Y. 1987. *Solar Energy*, 38, pp. 323-326.

PHOTOVOLTAIC-POWERED REVERSE OSMOSIS PLANT WITH FREQUENCY CONVERTER

Abstract. *An important fraction of the aquifers of the Northeast of Brazil present high salinity water (concentration larger than 3,000 mg/L). In some places, the inhabitants don't have access to water supply nor conventional electricity, to drive water pumping systems and desalination equipment. Largely used all over the world, reverse osmosis equipment (RO) driven by photovoltaic systems,*

can be used in a reliable way to provide drinking water for the populations of remote areas. In this work we study the operational conditions of a reverse osmosis systems with 3 membranes units in series and water with salinity levels with 2,000 and 5,000 mg/L. The RO system is coupled to a photovoltaic generator (0,88 kWp) with a frequency converter as an interface. We determine the experimental information necessary to simulate the whole system behavior, either with the utilizability method or with solar irradiance time series. Using the utilizability method we estimate the monthly and annual volume of permeated water. The daily production, annual average, of permeated water, is equal to 860 L/day for 2,000 mg/L and 500 L/day for 5,000 mg/L, able to meet the demand of a population of 200 to 400 people, depending on the water concentration level. It was also calculated the recovery factor (RF), it means the relation between permeated and total water. The operational conditions defining it have to be such that this factor it is not larger than the value specified by the manufacturers, in order to guarantee the lifetime of the membranes. We also describe some operational routines and maintenance precautions, to be adopted while running the OR equipment. Approximate figures for the cost of drinkable water are given.

Key-words: *Photovoltaic generation, Reverse Osmosis, Brackish Water Desalination*