



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT - 22  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO II  
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT**

**OPERAÇÃO DE UMA UNIDADE DE OSMOSE REVERSA  
ACIONADA POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SEM BATERIAS**

**Douglas Bressan Riffel\*    Paulo C.M. de Carvalho    Ricardo S.T. Pontes  
Demercil S. Oliveira Jr    Ricardo G.V. de Oliveira**

**Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Ceará**

**RESUMO**

Duas análises da operação de uma unidade de osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica sem baterias foram objeto de estudo deste artigo. Na região semi-árida nordestina, onde se localizou este estudo, a utilização da tecnologia fotovoltaica na produção de água potável é justificada pela complementaridade sazonal existente entre o regime pluviométrico e a energia solar. As bombas de diafragma se mostraram indicadas para aplicações em unidades de osmose reversa e os melhores resultados foram alcançados com um acréscimo na capacidade de geração e o emprego de seguidores de máxima potência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Energia Solar Fotovoltaica, Dessalinização, Osmose Reversa.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A disponibilidade de água potável em todo o mundo vem diminuindo, de forma a merecer atenção especial de entidades internacionais e da comunidade científica. Segundo estudo publicado pela UNESCO em 2003 (1), estima-se que na metade deste século, de 2 a 7 bilhões de pessoas, em mais de quarenta países, sofrerão de escassez de água. Esse assunto vem sendo debatido nos últimos anos em todo o mundo e alerta a humanidade para a necessidade da procura de novas formas de suprir a demanda de água potável. Embora o problema seja previsto tanto em países industrializados como em países em desenvolvimento, os efeitos da falta de água são mais sentidos nos últimos, onde a infra-estrutura é mais deficiente.

No Brasil, um exemplo desse problema é encontrado no Polígono das Secas, localizado preponderantemente na região semi-árida nordestina. A área afetada representa 60 % de todo território da região Nordeste, ou cerca de 950.000 km<sup>2</sup>. A problemática da seca no Nordeste não se restringe à baixa precipitação de chuva, mas uma irregular distribuição temporal e espacial. Para exemplificar, a Figura 1a mostra a precipitação média mensal no período 1974-2002 no Ceará, um dos estados nordestinos afetados. Essa figura revela que cerca de 85 % da chuva anual no território cearense ocorre durante o período de janeiro a maio e preferindo as regiões costeiras, deixando o sertão com uma quantidade ínfima de água no período de junho a dezembro (2). Somado a isso, ainda existe a variabilidade pluviométrica interanual, podendo ocorrer estiagens acentuadas, onde a população sertaneja, tipicamente carente, não consegue o mínimo de alimentos para o sustento no interior. Paralelamente, essa região apresenta uma temperatura média de 28 °C e um elevado potencial solar anual de aproximadamente 2000 kWh.m<sup>-2</sup>.

\*Rua Av. Gov. Argemiro de Figueiredo, 461 Ap 107 - Bessa - CEP: 58037-030 – João Pessoa - PB - BRASIL  
e-mail: dougbr@gmx.net

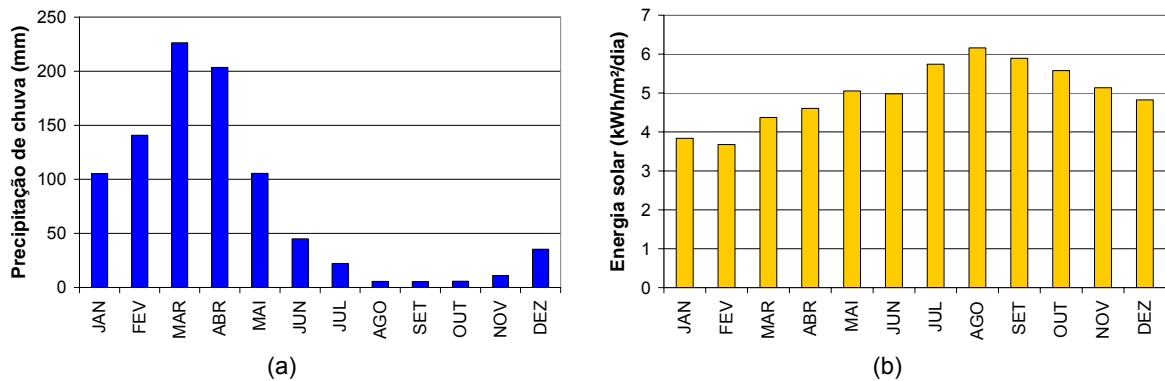


FIGURA 1 – Complementaridade sazonal entre o regime pluviométrico e a energia solar no estado do Ceará (2)

Estudo realizado pelo Ministério de Minas e Energia - MME em 2003 (3), intitulado “Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste”, cadastrou todos os poços, fontes naturais, barragens subterrâneas e reservatórios superficiais significativos em uma área de 225.000 km<sup>2</sup> da região semi-árida brasileira. Os resultados preliminares mostraram que 55% dos poços se encontram em funcionamento, 34% estão paralisados devido à salinidade e/ou não foram instalados por falta de energia elétrica e os 11% restantes foram abandonados, por estarem secos ou obstruídos. Desse universo foram coletadas 15.338 amostras de água e realizada medida da condutividade elétrica, resultando que aprox. 75% dos poços apresentam sólidos totais acima de 500 mg.L<sup>-1</sup>, ou seja, produzem água inadequada ao consumo humano. O estudo revela ainda que mais de 70% dos sistemas de bombeamento de água acionados por módulos fotovoltaicos instalados no Nordeste apresentam-se em operação. Uma das opções para dessalinizar essa água salobra é através de membranas de osmose reversa (OR).

O processo de osmose reversa consiste, basicamente, no bombeamento de água com alta concentração de sais contra membranas seletivas; sendo necessário uma pressão superior à pressão osmótica,  $\Delta\pi$ , para reverter o processo natural da osmose, como pode ser visto na Figura 2. Essas membranas permitem o fluxo da água através delas, ao mesmo tempo em que barram a passagem da maior parte dos sais, assim como os vírus e bactérias presentes na água original (alimentação).

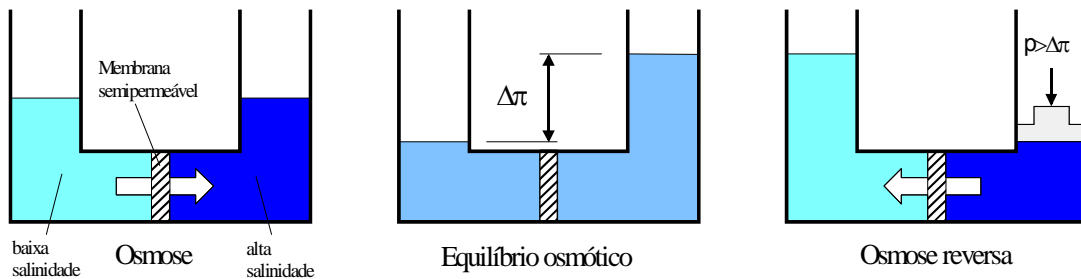


FIGURA 2 – Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa

Para que o processo da osmose reversa aconteça, uma pressão, superior à pressão osmótica,  $\Delta\pi$ , precisa ser exercida sobre a água de alimentação. A magnitude desta pressão influi diretamente na vazão de água potável e na qualidade (salinidade) da água produzida.

O processo da osmose reversa apresenta algumas vantagens em relação aos demais processos de dessalinização, sendo elas: relativo baixo consumo específico; operação utilizando somente energia elétrica; relação direta entre o consumo de energia e a qualidade da água; operação ininterrupta mesmo com flutuação da fonte de energia; construção modular; sistemas de recuperação de energia podem ser conectados ao rejeito da unidade de OR para reaproveitar a energia remanescente, apresentando um impacto positivo em grandes unidades; economia de escala; purificação da água.

A complementaridade sazonal entre o regime pluviométrico e a energia solar, mostrada na Figura 1, aponta para a racionalização dos recursos locais, quando se utiliza a energia solar na produção de água potável. Observa-se que o mês com o menor índice pluviométrico, agosto, possui o maior potencial de energia solar. Isso indica uma adequação da utilização da tecnologia fotovoltaica (FV) para o acionamento de unidades de dessalinização de água.

A instalação de pequenos dessalinizadores em comunidades isoladas pode ajudar a amenizar os problemas da seca no Nordeste brasileiro. Esses locais, devido a dificuldades de manutenção, requerem uma instalação confiável, simples e robusta. A tecnologia FV apresenta todas essas características e, ainda, se torna viável, técnica e economicamente, em locais sem acesso à rede elétrica convencional. Essa tecnologia é

apontada como uma das mais confiáveis formas de geração de energia elétrica, fato comprovado pelo extenso período de garantia fornecido pelos fabricantes de módulos FV, 25 anos.

O caráter inovador do presente estudo é confirmado pelo fato de não haver no Brasil experiências de unidades de osmose reversa com pressão variável acionadas por módulos fotovoltaicos sem o uso de baterias. A ausência de um banco de baterias para o armazenamento da energia gerada traz como vantagens a redução de custos totais para execução do projeto e de manutenção, fatores de importância para a viabilidade de projetos no semi-árido nordestino.

O estado da arte mundial de unidades de osmose reversa acionadas por energia solar fotovoltaica (OR-FV) e os relatos da primeira instalação no Brasil com baterias foram descritos em artigo anterior (4).

## 2.0 - COMPONENTES PRINCIPAIS DA UNIDADE OR-FV SEM BATERIAS



FIGURA 3 – Unidade OR-FV sem baterias

Um método para se projetar unidades OR-FV sem baterias foi elaborado e apresentado em (5). Esse método prevê a utilização da complementaridade sazonal observada na Figura 1 e é capaz de estimar as condições mínimas mensais de funcionamento. Trabalhando dados estatísticos, com médias a cada 10 minutos, da radiação solar e da temperatura ambiente foi possível gerar gráficos para facilitar a visualização dos resultados, sendo eles: histogramas da distribuição mensal nas diversas faixas de radiação solar, período contínuo máximo que a radiação solar ficou acima de um determinado valor ( $300 \text{ W.m}^{-2}$ ) e a quantidade de minutos acumulados nessas condições no mês. Dois sistemas foram encontrados como resultado da aplicação desse método:

- Sistema 1: utiliza 2 módulos FV de 55 Wp para, diretamente, acionar o motor-bomba;
- Sistema 2: um conversor CC-CC abaixador, implementado com seguidor de máxima potência (SMP), é inserido entre o arranjo de 3 módulos FV de 55 Wp e a carga.

O conversor CC-CC abaixador, projetado para o Sistema 2, foi descrito em (6). O algoritmo de SMP desenvolvido utiliza os dados estatísticos, necessários para encontrar a melhor tensão fixa (MTF) de operação, na qual o motor-bomba acoplado ao arranjo FV opere próximo ao ponto de máxima potência. A base do algoritmo MTF é justamente manter a tensão fixa na carga, no caso da potência gerada ser superior à demanda da carga, ou no módulo FV, em caso contrário. As principais vantagens do algoritmo desenvolvido são: a possibilidade de se controlar a potência entregue à carga; a simplicidade e a facilidade de implementação. Essas vantagens, unidas à boa eficiência obtida em regiões próximas à linha do Equador, demonstram que o sistema possui um bom custo-benefício. Outra característica que o sistema apresenta, devido ao reduzido número de componentes eletrônicos, é a alta confiabilidade e conseqüentemente reduzida necessidade de manutenção.

Como índice de comparação com outros algoritmos, o controle, utilizando o algoritmo de MTF, segue o ponto de máxima potência em 80,5 % do tempo, um valor comparável aos demais algoritmos. Esse índice varia conforme as estações do ano e depende de uma boa pesquisa estatística para encontrar a melhor tensão fixa de operação do arranjo FV. A eficiência média medida do conversor CC-CC abaixador se mostrou próxima a 93 %.

A Figura 3 mostra os principais equipamentos utilizados neste estudo, sendo eles: 3 módulos FV de 55 Wp, 1 conversor CC-CC abaixador com SMP, 1 motor-bomba CC de diafragma e 1 válvula para simular a membrana de OR. Na atual fase do projeto, a membrana foi simulada por uma válvula. Os valores medidos (pressão e vazão) são submetidos a um modelo matemático, desenvolvido no Matlab<sup>®</sup>. Desse modelo se obtêm a vazão e a concentração de sais da água permeada. Detalhes sobre o modelo matemático desenvolvido podem ser encontrados em (7).

### 3.0 - COMPARAÇÕES ENTRE OS SISTEMAS

A comparação entre os sistemas começa pela escolha do dia a ser comparado. Como a radiação solar possui uma característica aleatória, diversas possibilidades se abrem. Procura-se, entretanto, um dia que apresente uma vantagem acentuada para o Sistema 1 – OR-FV sem SMP, isso porque o intuito é provar justamente o contrário. Dois dias foram escolhidos, dia 04/12/04 e 07/01/05, por apresentarem perturbações mais amenas e elevados índices de radiação solar, o que resulta em uma estabilidade da operação. No dia 04/12/04 o sistema operava com o SMP (Sistema 2) e no dia 07/01/05, sem (Sistema 1). As Figuras 4 e 5 mostram a alteração da vazão de permeado em função da pressão e vazão de alimentação, utilizando o Sistema 1 e 2, respectivamente.

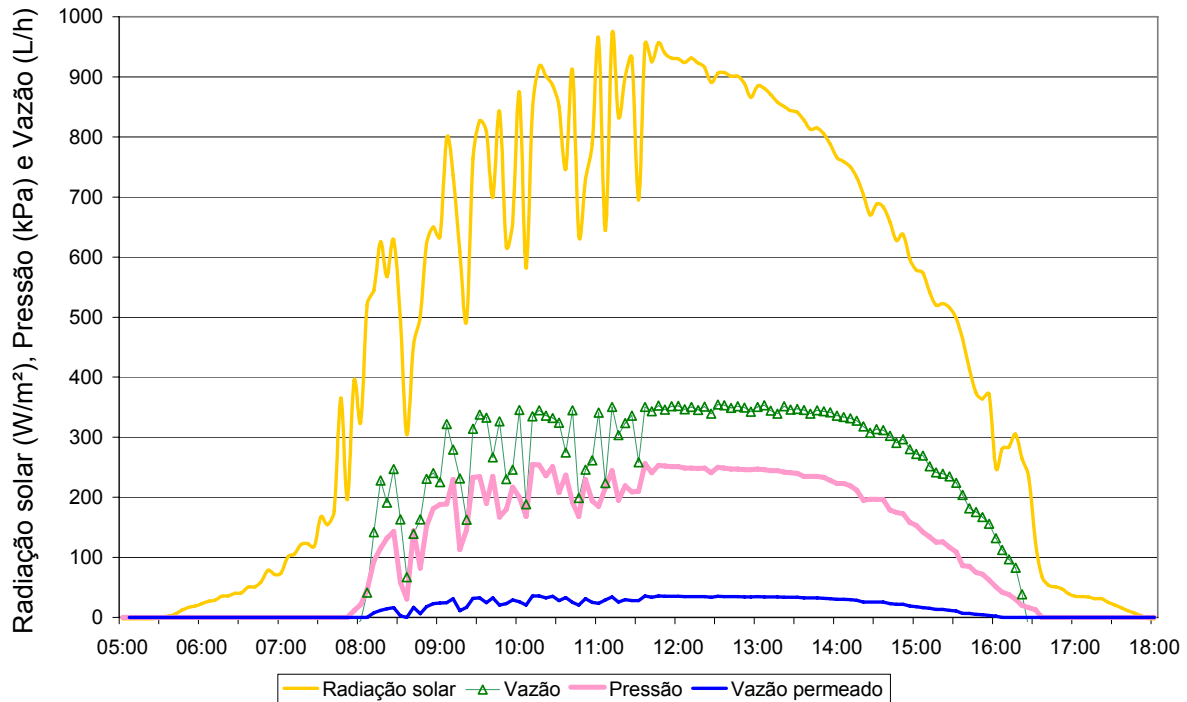


FIGURA 4 – Sistema 1: Operação da unidade sem SMP dia 07/01/05

Uma primeira impressão dos dois gráficos, observando a variação da pressão em função da radiação solar, aponta para uma operação mais estável e intensa no Sistema 2. Sabe-se que a seleção de componentes nas membranas de osmose reversa é proporcionada pela pressão; nesse sentido, sistemas que operem com pressões mais elevadas e estáveis produzirão mais água. Outro ponto importante na operação de unidades de OR é a taxa de recuperação, calculada pela razão entre a vazão de alimentação e de permeado. As membranas se tornam mais susceptíveis à incrustação, reduzindo sua vida útil, quanto operam por muito tempo com essa taxa acima de 15 % (para membranas de 40 polegadas de comprimento). Essa taxa acaba limitando a operação das unidades OR-FV sem baterias, uma vez que os sistemas precisam ser projetados para momentos de maior radiação, o que ocorre durante um curto período, normalmente ao meio-dia. O Sistema 2, como apresenta um circuito de controle (Conversor CC-CC) capaz de limitar a potência entregue à carga, obteve uma taxa de recuperação média de 12,86 %, valor superior aos 8,09 % encontrados no Sistema 1. Essa limitação (15 %) imposta pela taxa de recuperação também explica porque a pressão de operação do Sistema 2 é superior ao 1.

A Figura 6 mostra a potência gerada, útil e no ponto de máxima potência (PMP) dos dois sistemas. Nela pode-se observar que o Sistema 2 apresenta valores absolutos de potência útil menores e um período de 5 h em que o sistema permanece operando próximo à 300 kPa. Uma colocação cabível é que, apesar do Sistema 2 possuir valores absolutos menores de potência útil, esse sistema alcança valores de pressão e vazão superiores ao Sistema 1. Isso se deve a atuação do Conversor CC-CC que disponibiliza uma relação tensão-corrente mais adequada à carga. Ressalta-se ainda que a energia não produzida no Sistema 2, área do gráfico compreendida entre a potência gerada e no PMP, pode ser utilizada para outras aplicações, como o bombeamento de água do poço.

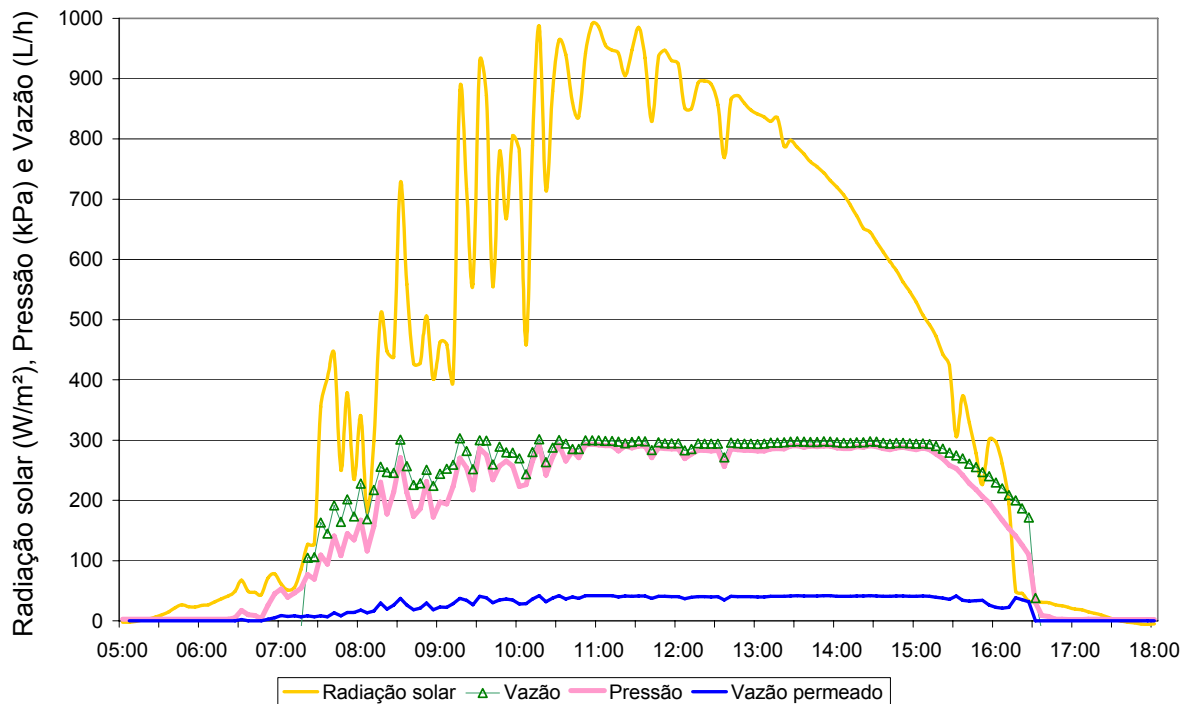
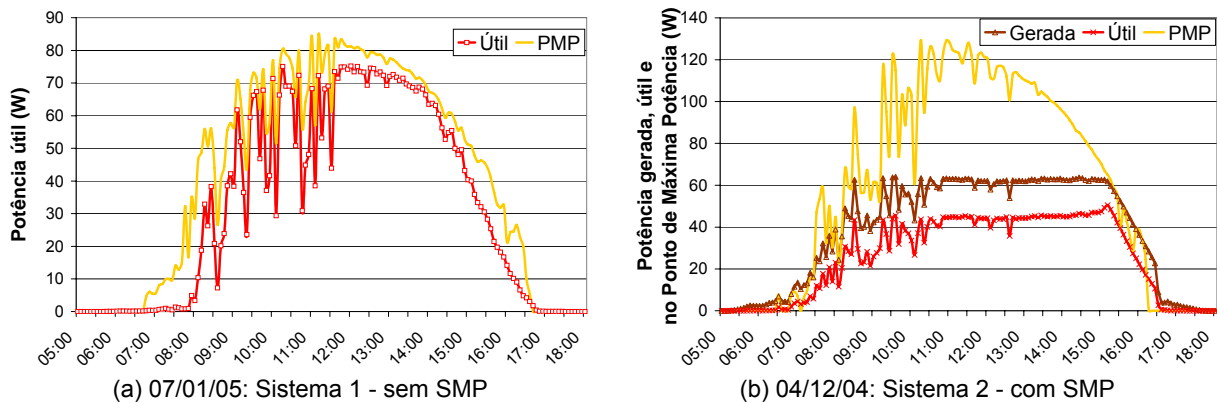


FIGURA 5 – Sistema 2: Operação da unidade com SMP dia 04/12/04



(a) 07/01/05: Sistema 1 - sem SMP

(b) 04/12/04: Sistema 2 - com SMP

FIGURA 6 – Potência gerada, útil e no ponto de máxima potência (PMP)

Tabela 1 – Resultados da comparação dos sistemas

Índice	Sistema 1 07/01/05	Sistema 2 04/12/04
<b>Produção diária de permeado</b>	195,1 L	305,2 L
<b>Salinidade do permeado (STD)</b>	37,5 mg.L <sup>-1</sup>	32,5 mg.L <sup>-1</sup>
<b>Pressão média de operação</b>	207 kPa	249 kPa
<b>Taxa de recuperação média</b>	8,09 %	12,86 %
<b>Período diário de operação</b>	7,08 h	8,66 h
<b>Consumo específico médio</b>	2,34 kWh.m <sup>-3</sup>	1,21 kWh.m <sup>-3</sup>
<b>Relação potência-produção</b>	0,56 Wp.L <sup>-1</sup>	0,54 Wp.L <sup>-1</sup>
<b>Eficiência média em seguir o PMP</b>	62,7 %	66,3 %

Diversos outros índices, utilizados na comparação de unidades de OR-FV, foram calculados e apresentados na Tabela 1. Nessa tabela pode-se notar uma extensa vantagem do Sistema 2, ou da unidade utilizando o SMP. Um ponto importante a ser ressaltado é que, o Sistema 2 não apresentou grandes variações de seus índices em todos os dias ensaiados, o que não ocorre no Sistema 1. Para exemplificar, através de simulações, foi realizada uma comparação dos dois sistemas no dia 27/11/04, dia em que a radiação solar apresentou significativas perturbações. Os resultados encontrados pelo Sistema 2 foram semelhantes ao apresentado na Tabela 1, já no Sistema 1, todos os índices apresentaram significativa queda, sendo eles:

Produção diária de permeado: 49,93 L, 5 vezes menor que o outro sistema; Taxa de recuperação média: 3,38 %; Período diário de operação: 2 h; Consumo específico médio: 14,6 kWh.m<sup>-3</sup>; Relação potência-produção: 2,20 Wp.L<sup>-1</sup>; Eficiência em seguir o PMP: 62,61 %. Essa grande variação encontrada entre os dias ensaiados no Sistema 1 - sem SMP, demonstram a condição conservadora que os sistemas foram comparados.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que as bombas volumétricas, no caso de diafragma, possuem a relação pressão-vazão indicada para aplicações em unidades de osmose reversa. No entanto, para virem a ser alimentadas via arranjos FV sem baterias, torna-se necessária a adoção de seguidores de máxima potência (Sistema 2). Salienta-se, ainda, que um acréscimo na capacidade de geração FV pode melhorar muito a performance do sistema. Com todos esses cuidados, as unidades OR-FV sem baterias tornam-se viáveis tecnicamente em comunidades sem acesso à rede elétrica convencional.

Analisando os resultados que a eliminação do banco de baterias proporcionou à unidade, pode ser citado o acréscimo na robustez, conseqüentemente na confiabilidade, e a redução de custos e da necessidade de manutenção. Esses pontos são considerados, muitas vezes, decisivos na sustentabilidade de um projeto deste porte.

Ressalta-se que as análises e os resultados deste artigo podem servir de base para outras aplicações de bombeamento que utilizem motor-bomba de diafragma alimentado por energia solar fotovoltaica sem baterias.

Algumas considerações podem ser feitas a respeito da inserção das tecnologias de osmose reversa e de geração fotovoltaica no Nordeste, visto que essa região apresenta condições ambientais favoráveis. Entretanto, o custo desses equipamentos ainda representa um gasto acima da capacidade financeira dos municípios. Salientando-se que as localidades mais necessitadas dessas tecnologias são justamente as mais pobres. Um passo importante para a redução desses custos seria a nacionalização das tecnologias envolvidas. Diversos grupos de pesquisa se esforçam para tanto, em especial pode-se citar o esforço de grupos de pesquisa no Rio Grande do Sul na produção de módulos fotovoltaicos e, na área de desenvolvimento de membranas de osmose reversa, pelo Instituto Nacional de Tecnologia – INT.

#### 5.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) UNESCO; Water for people - water for life - the United Nations world water development report; UNESCO Publishing / Berghahn Books, 2003. Disponível em: <[http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex\\_summary/](http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex_summary/)>. Acesso em: 11 mai. 2004
- (2) FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos: Dados pluviométricos do Ceará, 2002
- (3) MME – Ministério de Minas e Energia; Projeto Cadastro da Infra-estrutura Hídrica do Nordeste – Relatório Preliminar; 2003. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/rehi/projeto.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2004
- (4) Carvalho P.C.M., Freire C., Montenegro F.F.D., Riffel D.B., agosto de 2004. The brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant, Progress in Photovoltaics: Research and Applications; vol. 12, nº 5, agosto de 2004.
- (5) Carvalho, P.C.M.; Pontes, R.S.T.; Oliveira Jr, D.S.; Riffel, D.B.; Oliveira, R.G.V.; Mesquita, S.B.; 2004. Estudo Estatístico de Radiação Solar visando o Projeto de Unidades de Dessalinização acionadas por Painéis Fotovoltaicos sem Baterias. In: Proceedings of Agrener GD 2004, Campinas, Brazil, CD-ROM.
- (6) Carvalho, P.C.M.; Pontes, R.S.T.; Oliveira Jr, D.S.; Riffel, D.B.; Oliveira, R.G.V.; Mesquita, S.B.; 2004. Control method of a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis plant without batteries based on Maximum Power Point Tracking. In: Proceedings of IEEE/PES T&D 2004 Latin America, São Paulo, Brasil, CD-ROM.
- (7) Carvalho, P.C.M.; Pontes, R.S.T.; Oliveira Jr, D.S.; Riffel, D.B.; Oliveira, R.G.V.; Mesquita, S.B.; 2004. Mathematical Model of a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant without Batteries In: Proceedings of RIO 5 - World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, Brasil, CD-ROM