



**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 km². 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⁻².

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

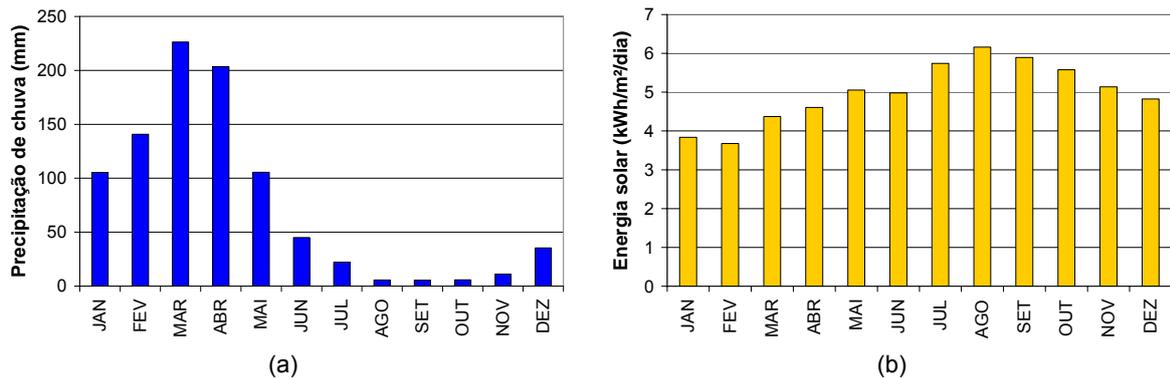


FIGURA 1 – Complementaridade sazonal entre o regime pluviométrico e a energia solar no estado do Ceará (2)

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 km² 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⁻¹, 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).

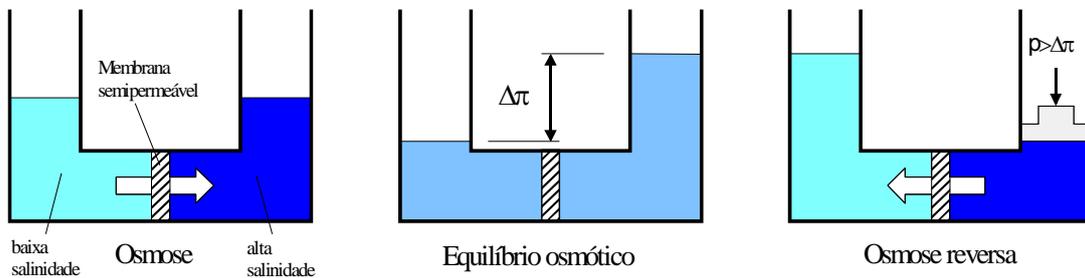


FIGURA 2 – Processos de osmose, equilíbrio osmótico e osmose reversa

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 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[®]. 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.

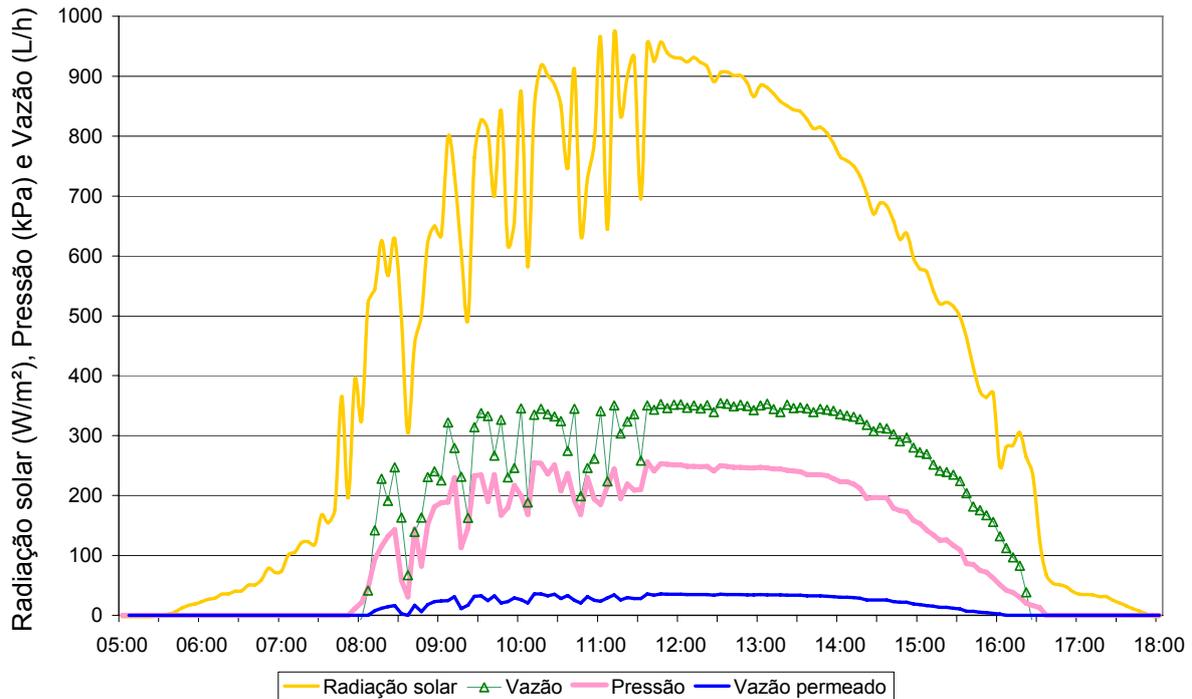


FIGURA 4 – Sistema 1: Operação da unidade sem SMP dia 07/01/05

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.

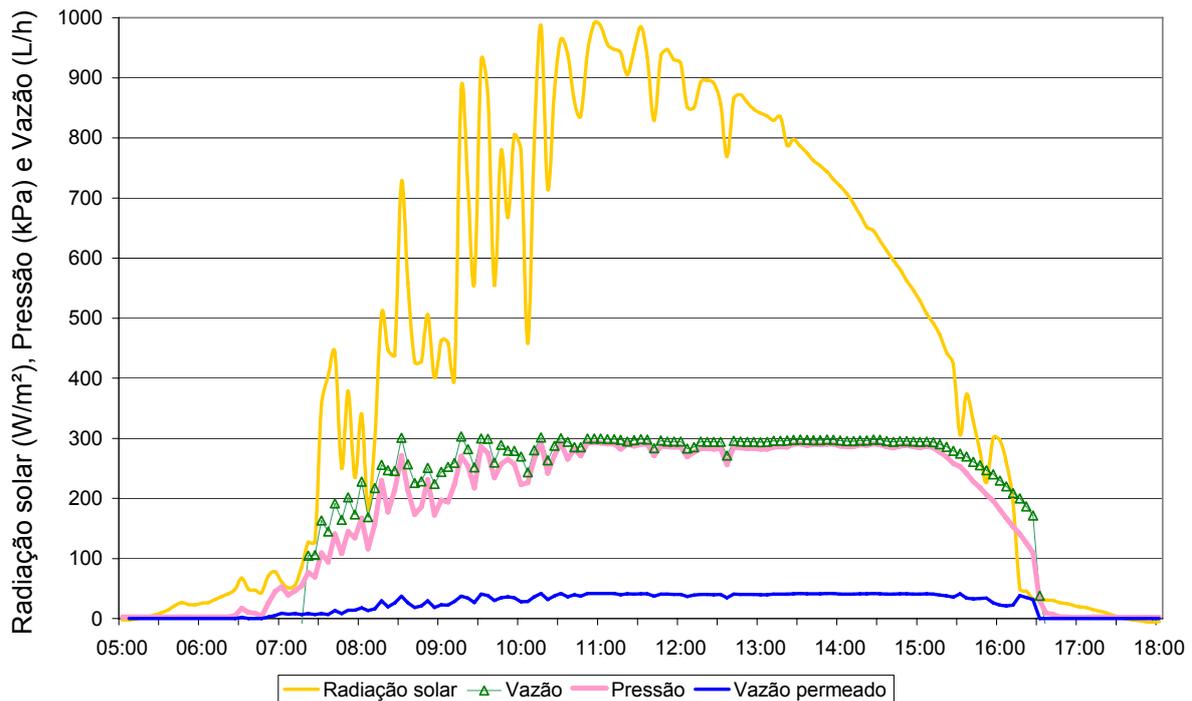
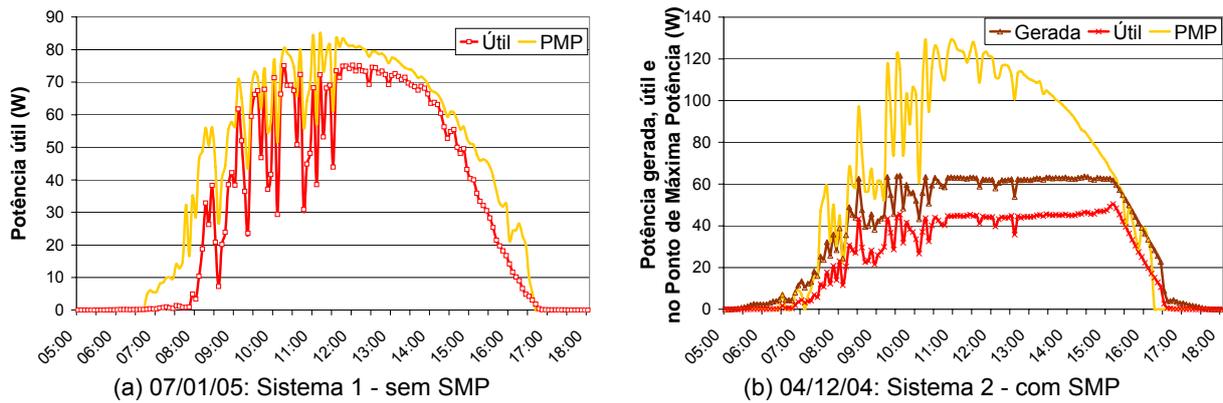


FIGURA 5 – Sistema 2: Operação da unidade com SMP dia 04/12/04



(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
Produção diária de permeado	195,1 L	305,2 L
Salinidade do permeado (STD)	37,5 mg.L ⁻¹	32,5 mg.L ⁻¹
Pressão média de operação	207 kPa	249 kPa
Taxa de recuperação média	8,09 %	12,86 %
Período diário de operação	7,08 h	8,66 h
Consumo específico médio	2,34 kWh.m ⁻³	1,21 kWh.m ⁻³
Relação potência-produção	0,56 Wp.L ⁻¹	0,54 Wp.L ⁻¹
Eficiência média em seguir o PMP	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⁻³; Relação potência-produção: 2,20 Wp.L⁻¹; 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/>. 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