

# BALANÇO ENERGÉTICO DE MOTORES-BOMBA PARA UNIDADE DE OSMOSE REVERSA ACIONADA POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS SEM BATERIAS

**Renato Sampaio Holanda de Oliveira** – renatosampaio@gmail.com

**Paulo Cesar Marques de Carvalho** – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

**Tiago Malveira Cavalcante** – tiagomall@yahoo.com.br

**Sandro César Silveira Jucá** – sandrojuca@cefet-ce.br

Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará, Laboratório de Microcontroladores

**Manuel Rangel Borges Neto** – rangel@cefetpet.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Petrolina, Coordenação de Eletrotécnica

## 3.5 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

**Resumo.** Na maioria das unidades de osmose reversa (OR) acionadas por painéis fotovoltaicos (FV) do mundo, armazenadores de energia (baterias) são utilizados para garantir tanto a boa qualidade da água potável obtida como a vida útil da membrana de OR utilizada. Dada a presença desses armazenadores, essas unidades apresentam um alto custo de operação e manutenção, além de diminuírem a vida útil da planta como um todo. Por outro lado, os sistemas de dessalinização que não utilizam baterias apresentam um baixo custo e uma vida útil maior. Em contrapartida, por não utilizar baterias, a potência entregue ao motor-bomba deve ser controlada, de modo que a membrana não receba uma pressão acima da especificada. Devido a essa restrição, há um potencial de excedente de energia durante a operação do sistema quando a radiação ultrapassa certo nível, que pode ser utilizado no bombeamento de água de um poço, através de um segundo motor-bomba, para armazenamento em um reservatório antes da dessalinização. O presente artigo objetiva analisar o balanço energético de um protótipo de uma unidade de OR acionada por painéis FV sem baterias, em desenvolvimento no Laboratório de Energias Alternativas – LEA da Universidade Federal do Ceará, com a finalidade de estabelecer o gerenciamento eficiente dos dois motores-bomba utilizados. Para efetuar essa análise de balanço de energia, curvas de potências dos motores, do sistema FV e de radiação são traçadas e confrontadas, definindo-se uma solução ideal para o gerenciamento dos dois motores.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Tecnologia Fotovoltaica, Osmose Reversa.

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de dessalinização de água se apresentam como uma solução alternativa para o problema da escassez de água potável em regiões áridas e semi-áridas. Dentre as tecnologias mais promissoras de dessalinização está a osmose reversa (OR) em conjunto com sistemas fotovoltaicos (FV). Os sistemas de dessalinização via OR acionados por painéis FV se adequam aos problemas dessas regiões, que geralmente possuem um abundante potencial de irradiação solar e baixo grau de eletrificação, por possuírem autonomia, confiabilidade, eficiência, baixo consumo específico e baixo custo de operação e manutenção.

No âmbito mundial, a maior parte das plantas de dessalinização via OR utilizam armazenadores de energia para garantir tanto a boa qualidade da água potável obtida como a vida útil da membrana de OR utilizada. No entanto, por utilizarem baterias, essas unidades apresentam um custo de operação e manutenção relativamente alto, além de diminuírem a vida útil da planta como um todo, considerando que os armazenadores se inutilizam em aproximadamente cinco anos. Por outro lado, as unidades de dessalinização que não utilizam baterias apresentam um baixo custo de operação e manutenção e uma vida útil maior (pela retirada das baterias e controladores) com a mesma eficiência dos outros sistemas. Como a potência fornecida pelos painéis FV varia de acordo com a radiação solar, não havendo baterias e nem controladores de carga, a potência entregue ao motor-bomba utilizado para aplicar a água salobra com alta pressão contra a membrana de OR também varia, o que prejudica a qualidade da água potável obtida (dada pelo nível de salinidade e contaminantes) e a vida útil da membrana (uma pressão acima da especificada compromete o material da membrana). Para evitar que uma pressão maior seja aplicada à membrana, seguidores dinâmicos de máxima potência são utilizados, vistos que esses conversores mantêm constante a potência de saída para a bomba de alta pressão, em certas horas do dia, quando a radiação solar atinge valores elevados. Devido a isto, há um excedente de energia que pode ser utilizado para bombear água de um poço, através de um segundo motor-bomba, para armazenar água em um tanque antes da dessalinização. Este potencial pode ser visto no gráfico da Fig. 1, que representa medições de um protótipo de planta de dessalinização, apresentado por Riffel (2005). A curva amarela (PMP) representa a potência teórica simulada que o sistema FV fornece no ponto de máxima potência. A curva marrom (Gerada) mostra a

potência gerada pelo sistema na saída do seguidor de máxima potência e a vermelha (Útil) a curva de potência utilizada pelo motor. Vê-se que, em boa parte deste dia, houve um excedente de energia.

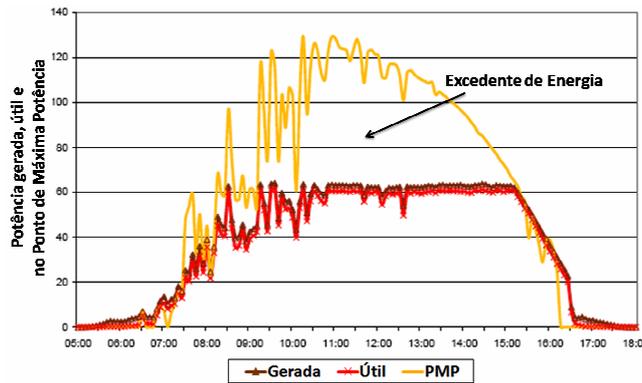


Figura 1- Excedente de Energia em 04/12/04, Fortaleza (Riffel, 2005).

Neste contexto, este artigo objetiva definir um eficiente gerenciamento dos dois motores presentes no protótipo de unidade de osmose reversa em desenvolvimento, através da análise do balanço energético obtido por curvas e dados coletados por um sistema de aquisição de dados comercial e outro desenvolvido pelo próprio grupo.

## 2. TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO ACIONADAS POR ENERGIAS ALTERNATIVAS: EXPERIÊNCIAS MUNDIAIS

A aplicação das fontes alternativas para acionamento de sistemas de dessalinização depende fortemente da disponibilidade local da fonte de energia e da qualidade da água a ser dessalinizada (Tzen e Morris, 2003). Além disso, experiências mundiais mostram que algumas combinações de fontes se adequam melhor a plantas de grande porte e outras a plantas menores.

### 2.1 Tecnologias de dessalinização acionadas por energias alternativas

Existem basicamente duas categorias de tecnologias de dessalinização acionadas por energias alternativas. A primeira inclui a dessalinização por destilação através de calor produzido por fontes alternativas. A segunda categoria inclui a dessalinização por membrana acionada através de energia elétrica produzida pelas energias renováveis. A combinação de tecnologia mais comum é a utilização de painéis FV em sistemas de dessalinização via OR. Essa tecnologia é ideal para sistemas autônomos em áreas ensolaradas, enquanto que, para grandes unidades, a energia eólica se torna mais atrativa.

Tzen e Morris (2003) apresentam um levantamento de instalações de dessalinização acionadas por energias renováveis (ER) na Europa. Através da Fig. 2, observa-se que a OR é a tecnologia de dessalinização mais utilizada, desde a aplicação em pequenas unidades de dessalinização de água salobra, como em Maagan Michel na Espanha (0,4 m<sup>3</sup>/dia), à aplicação em grandes plantas de dessalinização da água do mar, como na Ilha Syros na Grécia (900 m<sup>3</sup>/dia). A Fig. 3 mostra o percentual de utilização das fontes alternativas de energia em sistemas de dessalinização instalados na Europa em 2003.

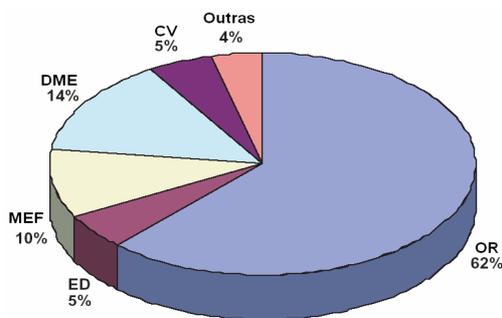


Figura 2- Tecnologias de dessalinização utilizadas com energias renováveis. OR: osmose reversa; ED: eletrodialise; MEF: destilação multi-estágio *flash*; DME: destilação multi-efeito; CV: compressão a vapor (Tzen e Morris, 2003).

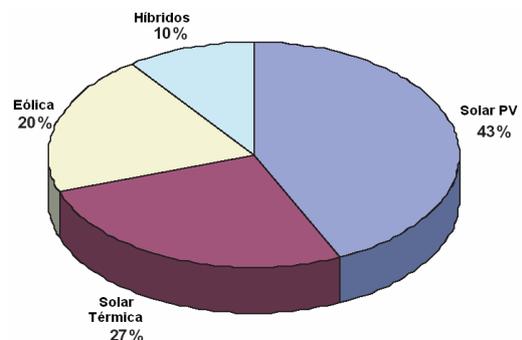


Figura 3- Fontes renováveis de energia utilizadas com plantas de dessalinização na Europa (Tzen e Morris, 2003).

De acordo com a Fig. 4, apresentada por Tzen, Theofilloyianakos e Kologios (2008), a combinação mais utilizada em plantas mundiais de dessalinização em 2008 é a OR com sistemas FV, seguida da OR com energia eólica.

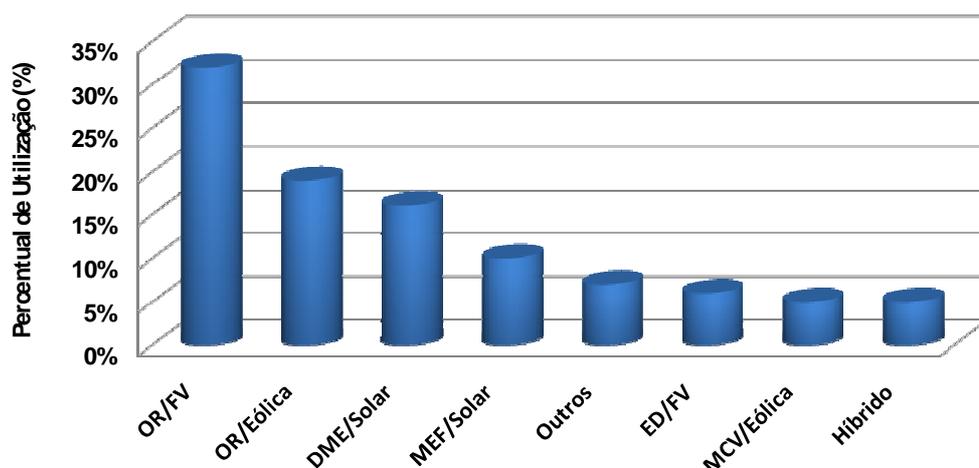


Figura 4- Processos de dessalinização em conjunto com energias renováveis no mundo. OR: osmose reversa; DME: destilação multi-efeito; MEF: destilação multi-estágio *flash*; ED: eletrodíálise; MCV: compressão a vapor (Tzen, Theofilloyianakos e Kologios, 2008).

## 2.2 Experiências mundiais

Unidades de OR em conjunto com sistemas FV representam uma solução para prover água potável a comunidades em áreas áridas, isoladas, com alta radiação solar e disponibilidade de água do mar ou água salobra de um poço (Helal, Al-Malek e Al-Katheeri, 2008). Neste contexto, García-Rodríguez (2003), Riffel (2005) e Carvalho (2004) apresentam, na Tab. 1, as principais experiências mundiais em unidades de osmose reversa acionadas por painéis fotovoltaicos.

Tabela 1. Experiências mundiais em unidades OR/FV (García-Rodríguez, 2003, Riffel, 2005 e Carvalho, 2004).

Localização da Planta	Tipo de Alimentação	Capacidade da Planta	Sistema FV
Oeste Cítuis, Jawa, Indonésia	Água Salobra	1,5 m <sup>3</sup> /h	25 kWp
Concepción del Oro, Mexico	Água Salobra	1,5 m <sup>3</sup> /dia	2,5 kWp
Doha, Qatar	Água do Mar	5,7 m <sup>3</sup> /dia	11,2 kWp
Eritrea	-	3,0 m <sup>3</sup> /dia	2,4 kWp
Flórida, EUA	Água do Mar	2 x 0,3 m <sup>3</sup> /dia	2,7 kWp + Diesel
Hassi-Khebi, Argélia	Água Salobra	0,95 m <sup>3</sup> /h	2,59 kWp
INETI, Lisboa, Portugal	Água Salobra	0,1 – 0,5 m <sup>3</sup> /dia	0,10 – 0,15 kWp
Jeddah, Arábia Saudita	Água Salobra	3,2 m <sup>3</sup> /dia	8,0 kWp
Ilha de Lampedusa, Itália	Água do Mar	3 + 2 m <sup>3</sup> /h	100 kWp
Ilha de Lipari, Itália	Água do Mar	2,0 m <sup>3</sup> /h	63 kWp
Norte de Jawa, Indonésia	Água Salobra	12,0 m <sup>3</sup> /dia	25,5 kWp
Noroeste de Cecília, Itália	Água do Mar	-	9,8 kWp + Diesel
Perth, Austrália	Água Salobra	0,5 – 0,1 m <sup>3</sup> /h	1,2 kWp
Gran Canaria, Espanha	Água do Mar	3,0 m <sup>3</sup> /dia	4,8 kWp
Mar Vermelho, Egito	Água Salobra	50 m <sup>3</sup> /dia	19,84 kWp
Deserto Thar, Índia	Água Salobra	1,0 m <sup>3</sup> /dia	0,45 kWp
Almería, Espanha	Água Salobra	2,5 m <sup>3</sup> /h	23,5 kWp
Vancouver, Canadá	Água do Mar	0,5 – 1,0 m <sup>3</sup> /dia	4,8 kWp
Wanoo RoadHouse, Austrália	Água Salobra	-	6,0 kWp
Ceará, Brasil	Água Salobra	0,25 m <sup>3</sup> /h	1,1 kWp

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Descrição geral do protótipo

O protótipo de unidade de dessalinização via OR acionada por painéis FV sem baterias, em desenvolvimento no Laboratório de Energias Alternativas – LEA, da Universidade Federal do Ceará, está descrito resumidamente no

esquemático da Fig. 5. As setas em azul claro representam o fluxo permeável (água potável), as em azul escuro indicam o fluxo concentrado (água mais salobra) e as em azul médio a água salobra de entrada. As partes pretas representam o suprimento de energia elétrica, enquanto que as cinzas demonstram os sinais coletados.

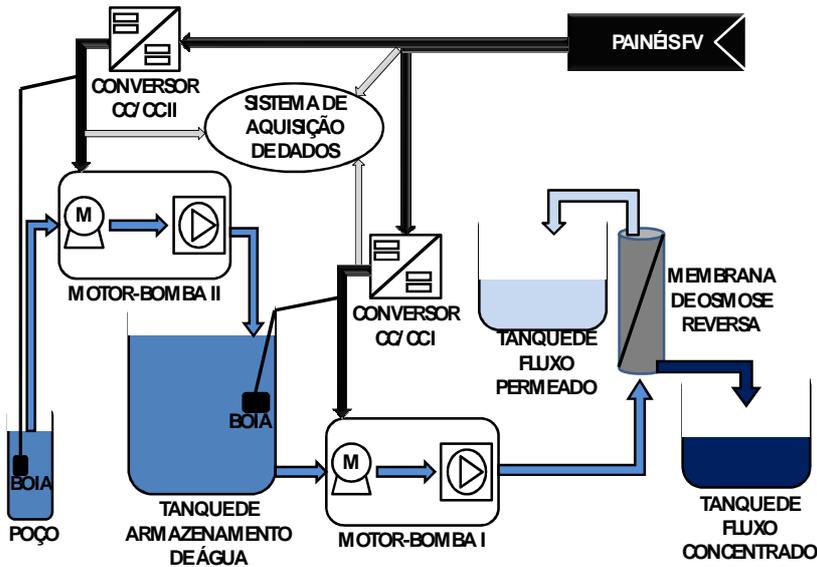


Figura 5- Esquemático geral da planta de dessalinização em desenvolvimento.

Na atual fase, o sistema está composto por cinco painéis FV (Fig. 6), cujas principais características estão descritas na Tab. 2; dois conjuntos motor-bomba (motor-bomba I e motor-bomba II), apresentados na Fig. 7 e descritos resumidamente na Tab. 3; dois conversores *Buck* CC/CC em desenvolvimento (seguidores dinâmicos de máxima potência), mostrados na Fig. 8; um sistema de aquisição de dados comercial (Fig. 9) e outro desenvolvido (Fig. 10), os quais coletam dados a serem confrontados e analisados; um piranômetro (Fig. 11), quatro tanques de armazenamento de água com válvulas esféricas (Fig. 12), duas chaves-bóia elétricas (Fig. 13), além de sensores (resistores *Shunt* 30 A / 60 mV) para medir corrente (Fig. 14) e disjuntores termomagnéticos para proteção.



Figura 6- Painéis FV.



Figura 7- Motor-bomba.



Figura 8- Conversor *Buck* CC/CC em desenvolvimento.

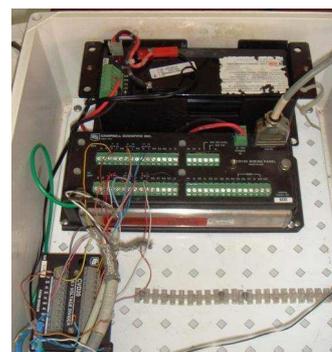


Figura 9- Datalogger comercial.

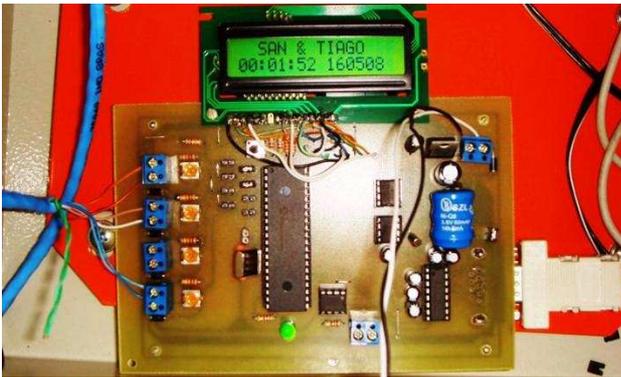


Figura 10- Datalogger desenvolvido.



Figura 11- Piranômetro CM3.

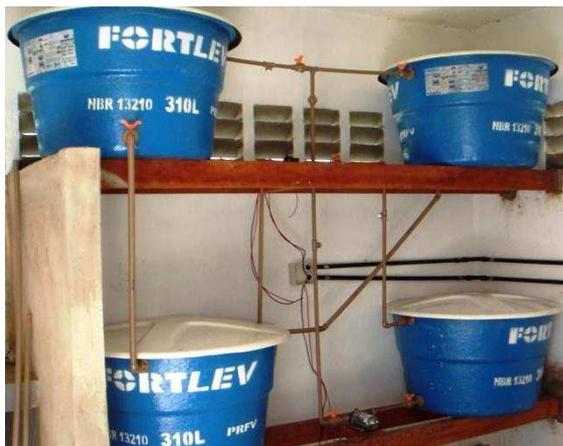


Figura 12- Tanques de água.



Figura 13- Chave-bóia elétrica.

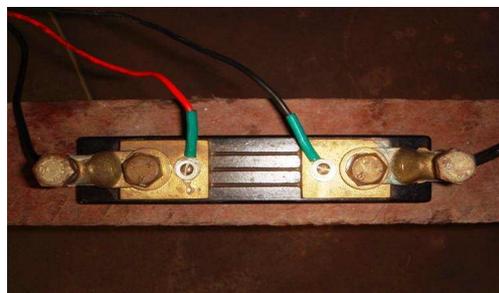


Figura 14- Resistor *shunt*.

Tabela 2. Descrição geral dos painéis FV.

Descrição dos painéis FV (unidade)	
Potência Nominal (Wp)	87,00
Tensão Nominal (V)	17,40
Corrente Nominal (A)	5,02
Tensão de Circuito-Aberto (V)	21,70
Corrente de Curto-Circuito (A)	5,34

Tabela 3. Características dos motores-bomba.

Características	Motor-bomba I	Motor-bomba II
Tipo de Bomba	Diafragma com 3 câmaras	Diafragma com 3 câmaras
Tensão Nominal (V)	12 VDC	12 VDC
Corrente Máxima (A)	7,00	10,00
Vazão (l/h)	490	800
Pressão Nominal (BAR)	4,08	3,06

**Painéis fotovoltaicos.** O protótipo desenvolvido utiliza, como suprimento de energia, quatro módulos FV (Fig. 6) com características descritas na Tab. 2. Estes módulos FV são conectados em paralelo, servindo como fonte única para os dois motores-bomba, com uma tensão nominal de 17,40 V, uma corrente total disponível de 20,80 A e uma potência nominal total de 348 Wp. Um quinto painel visualizado na Fig. 6 serve para testes e alimentação dos sistemas de aquisição de dados. É importante ressaltar que a quantidade de painéis escolhida para o projeto foi superdimensionada, com o intuito de se estudar, posteriormente, uma relação custo-benefício apropriada.

**Motores-bomba.** Nota-se, através da Tab. 3, que os motores-bomba (Fig. 7) possuem características diferentes. Devido a isto, a bomba que trabalha a uma pressão maior foi escolhida para ser o motor-bomba I (bomba para dessalinizar) e a bomba que trabalha a uma pressão menor e vazão maior, foi escolhida para ser a bomba que alimenta o tanque de armazenamento.

**Conversores CC/CC.** O protótipo pretende utilizar dois conversores *Buck* CC/CC, em desenvolvimento, como seguidores dinâmicos de máxima potência. Como já citado anteriormente, quando a radiação estiver alta, os conversores devem manter a saída para os motores em 12 V, com o intuito de não prejudicar a membrana de osmose reversa e de preservar a vida útil das bombas. Por outro lado, quando a radiação estiver baixa, os conversores devem buscar o ponto de máxima potência em sua entrada. Para isso, o algoritmo utilizado pelos seguidores dinâmicos de máxima potência do protótipo é o “MELHOR TENSÃO FIXA”, desenvolvido pelo próprio grupo. Foi concluído, após vários estudos de radiação e máxima potência nos painéis, que uma tensão de 14,9 V é ideal como *offset* para a entrada dos conversores. Portanto, com a radiação baixa, os seguidores devem buscar a tensão de 14,9 V para trabalharem no ponto de máxima potência. Em contrapartida, em altas radiações, os conversores devem manter a tensão de saída em 12 V, fazendo com que a potência dos motores fique constante.

Nesta primeira etapa do projeto, apenas o *hardware* dos seguidores foi feito (Fig. 8), faltando o controle. Devido a este fato, o presente artigo mostra, na segunda parte dos resultados (Fig. 20 e Fig. 21), gráficos com dados de tensão simulando o controle dos conversores. Para tanto, foram mantidas as tensões dos motores em 12 V quando os dados medidos apresentaram tensões fornecidas maiores que este valor.

**Membrana de osmose reversa.** Uma membrana de osmose reversa consiste, basicamente, de um filme que separa duas soluções de diferentes concentrações de sólidos dissolvidos (Riffel, 2005). Para tanto, necessita de uma pressão externa superior à osmótica natural, que é aplicada por um motor-bomba, por exemplo. Devido ao fato de o protótipo desenvolvido ainda não possuir a membrana de osmose reversa, válvulas esféricas simulam a perda de carga apresentada pela membrana.

**Sistemas de aquisição de dados e sensores.** A fim de coletar os dados para os estudos propostos neste artigo, um *Datalogger* comercial foi utilizado (Fig. 9). Para se conseguir uma análise detalhada, o *Datalogger* efetuou medições de tensões e correntes dos motores e radiação global a cada segundo, armazenando médias a cada minuto. Paralelamente, um sistema de aquisição de dados foi desenvolvido pelo grupo (Fig. 10), servindo de suporte para comparações de valores.

Para medir a radiação global, foi instalado um piranômetro próximo aos painéis (Fig. 11). Com relação às correntes dos motores, dois resistores shunts 30 A / 60 mV (Fig. 14) foram acoplados no neutro da saída de cada bomba para efetuar as medições.

**Tanques de armazenamento e chaves-bóia.** Foram utilizados quatro tanques de 310 L cada (Fig. 12). Devido à dificuldade de se obter um poço em laboratório, um dos tanques foi utilizado como poço, enquanto que os outros foram utilizados como armazenamento da água antes de dessalinizar, armazenamento da água potável e armazenamento da água concentrada, conforme esquemático da Fig. 5.

Para atender às estratégias de operação, explicadas a seguir, e para proteger as bombas, duas chaves-bóia elétricas foram utilizadas (Fig. 13). Estas chaves possuem três contatos (sendo um comum e dois independentes), que ligam ou desligam as bombas conforme o nível da água desejado (regulado por um contrapeso).

### 3.2 Estratégias de operação do sistema

Com a finalidade de atender aos objetivos deste artigo, ou seja, analisar o balanço energético de um protótipo de uma unidade de dessalinização via OR acionada por painéis FV sem baterias para estabelecer o gerenciamento eficiente dos dois motores utilizados, duas estratégias de operação do sistema foram adotadas.

Na primeira estratégia, resumida na Tab. 4 e representada na Fig. 15, os motores-bomba trabalham alternadamente, ou seja, uma bomba só liga quando a outra desliga e vice-versa. Para isso, uma das chaves-bóia foi instalada no tanque de armazenamento e conectada em série com o cabo positivo tanto do motor-bomba I como do motor-bomba II. A outra chave foi instalada no tanque do poço, em série com o cabo positivo do motor-bomba II, evitando que esta bomba trabalhe sem água. Dessa forma, quando o nível da água no tanque do poço está baixo ou quando o tanque de armazenamento está cheio o motor-bomba II se desliga, ou seja, a bomba de armazenamento (motor-bomba II) é acionada somente quando o poço está cheio e quando o tanque de armazenamento está seco. Alternadamente, basta que o tanque de armazenamento esteja cheio para o motor-bomba I de dessalinização ser

acionado, sendo desligado apenas quando este tanque seca. Nesta estratégia, em nenhum momento os motores trabalham ao mesmo tempo.

Tabela 4. Tabela-verdade para os motores-bomba trabalhando alternadamente.

Chave-bóia I (TANQUE)	Chave-bóia II (POÇO)	Motor-bomba I	Motor-bomba II
NI (está no nível inferior)	NI (está no nível inferior)	DESLIGADO	DESLIGADO
NI (está no nível inferior)	NS (está nível no superior)	DESLIGADO	LIGADO
NS (está no nível superior)	NI (está nível no inferior)	LIGADO	DESLIGADO
NS (está no nível superior)	NS (está nível no superior)	LIGADO	DESLIGADO

Na segunda estratégia resumida na Tab. 5 e representada na Fig. 16, os motores-bomba trabalham simultaneamente. O motor-bomba I somente se desliga quando o tanque de armazenamento está seco e o motor-bomba II só deixa de funcionar quando o tanque do poço está com pouca água. Desta forma, as chaves-bóias servem apenas para proteger as bombas, as quais trabalham em simultaneidade, a menos que os tanques estejam secos.

Tabela 5. Tabela-verdade para os motores-bomba trabalhando simultaneamente.

Chave-bóia I (TANQUE)	Chave-bóia II (POÇO)	Motor-bomba I	Motor-bomba II
NI (está no nível inferior)	NI (está no nível inferior)	DESLIGADO	DESLIGADO
NI (está no nível inferior)	NS (está nível no superior)	DESLIGADO	LIGADO
NS (está no nível superior)	NI (está nível no inferior)	LIGADO	DESLIGADO
NS (está no nível superior)	NS (está nível no superior)	LIGADO	LIGADO

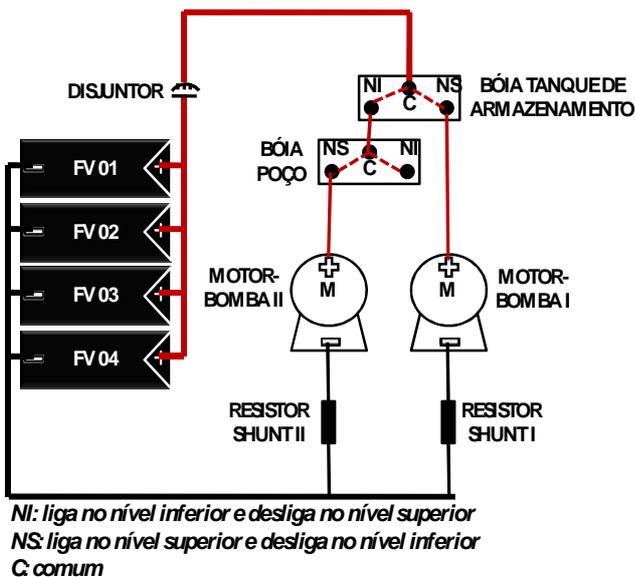


Figura 15- Bombas trabalhando alternadamente.

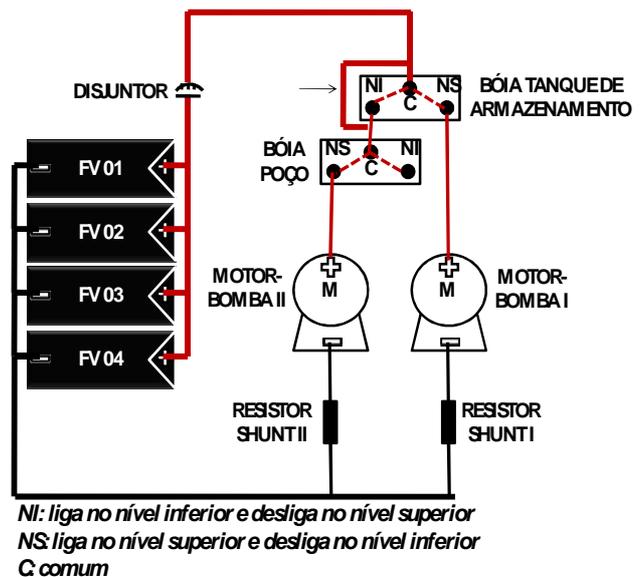


Figura 16- Bombas trabalhando simultaneamente.

Na Fig. 16, a seta indica a conexão do positivo da fonte FV diretamente à bóia que protege o motor-bomba II, visando à operação simultânea. Os resultados e conclusões de ambas as estratégias serão vistas a seguir, a partir de informações advindas dos dados coletados pelos *Dataloggers*.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a obtenção das informações necessárias à construção deste artigo, foram selecionados dados coletados pelo *Datalogger* comercial no Laboratório de Energias Alternativas – LEA, situado na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza. Os dados constam de tensões e correntes dos motores e radiação, coletados durante dois dias típicos com radiação boa e poucas nuvens.

Seguindo às estratégias de operação adotadas, no primeiro dia, sábado 24 de maio de 2008, obtiveram-se dados com as bombas trabalhando alternadamente, enquanto que, no segundo dia, domingo 25 de maio de 2008, foram obtidos dados com as bombas trabalhando simultaneamente.

#### 4.1 Verificação das estratégias de operação

Os gráficos da Fig. 17 e da Fig. 18 representam uma amostragem das duas horas de maior radiação verificada na coleta de dados (de 10:30h às 12:30h), contendo quatro curvas com dados a cada minuto. As curvas “MOTOR-BOMBA I” e “MOTOR-BOMBA II” representam, respectivamente, a potência do motor-bomba I (dessalinização) e do motor-bomba II (armazenamento); as curvas pontilhadas “PAINÉIS FV” mostram a potência total fornecida pelo sistema FV; e as curvas tracejadas “RADIACÃO” são a radiação global. É importante ressaltar que as três curvas de potência estão traçadas com relação ao eixo vertical do lado esquerdo, enquanto que a radiação está traçada com relação ao eixo do lado direito.

**Bombas trabalhando alternadamente.** O primeiro gráfico, visualizado na Fig. 17, representa valores reais para a primeira estratégia de operação, ou seja, com os motores trabalhando alternadamente, de acordo com o esquemático da Fig. 15. Devido a isto, a potência total fornecida pelos painéis fotovoltaicos acompanha sempre as curvas de potência dos motores. Percebe-se ainda que todas as curvas de potência acompanham o perfil de curva da radiação (tracejado), como era de se esperar.

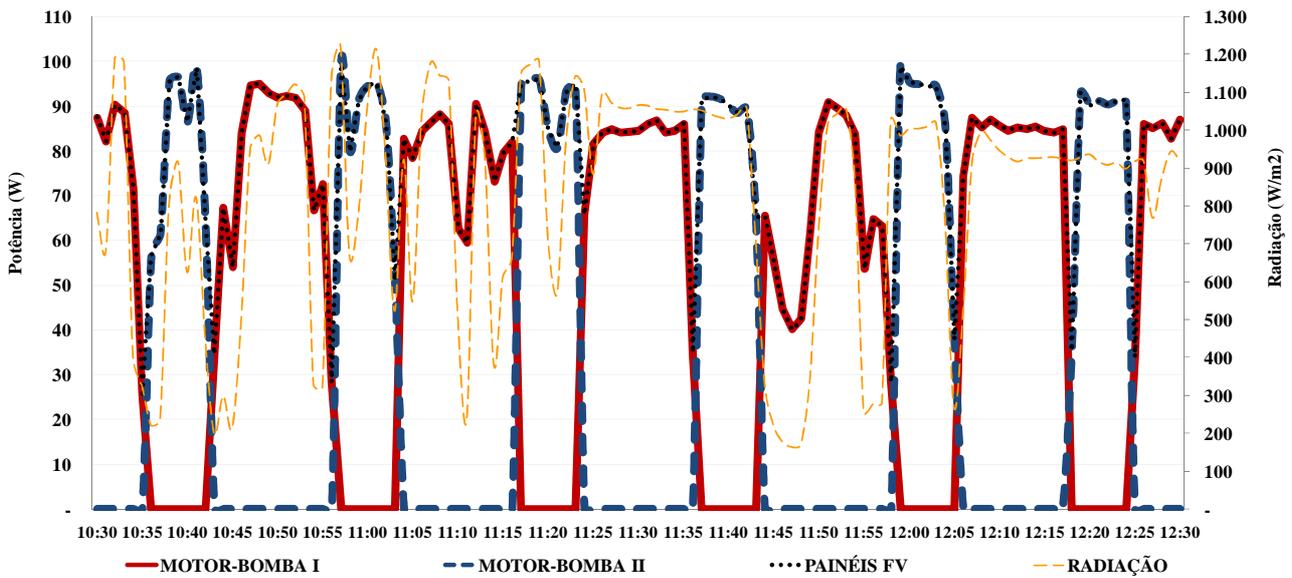


Figura 17- Curvas de potência dos motores, dos painéis FV e de radiação em Fortaleza, 24/05/2008, com as bombas trabalhando alternadamente.

Para essa primeira estratégia de operação, foram obtidos os seguintes valores apresentados na Tab. 6:

Tabela 6. Valores médios obtidos de 10:30h às 12:30h do dia 24/05/2008 para os motores trabalhando alternadamente.

Consumo Energético (Wh)			Quantidade de Litros (L)			Consumo Específico (kWh/m <sup>3</sup> )		
MB I	MB II	TOTAL	MB I	MB II	TOTAL	MB I	MB II	TOTAL
98,60	59,85	158,45	575	399	974	0,1714	0,1500	<b>0,1626</b>

Portanto, o consumo específico da unidade como um todo para esta primeira estratégia com as bombas trabalhando alternadamente foi de **0,1626 kWh/m<sup>3</sup>**.

**Bombas trabalhando simultaneamente.** O segundo gráfico, visualizado na Fig. 18, representa valores reais para a segunda estratégia de operação, ou seja, com os motores trabalhando simultaneamente, de acordo com o esquemático da Fig. 16. É importante observar, através das curvas deste segundo gráfico, que as bombas trabalham simultaneamente. No entanto, nota-se que o motor-bomba II é desligado em alguns instantes. Este desligamento se deve ao fato de que o tanque que serve como poço ficou com seu nível de água abaixo do limite mínimo, conforme já demonstrado na Tab. 5. Desta forma, evita-se que a bomba trabalhe sem água.

Diferentemente da primeira estratégia, observa-se que a potência total fornecida pelos painéis FV é praticamente o dobro de cada potência dos motores, visto que estes possuem características semelhantes e estão trabalhando simultaneamente.

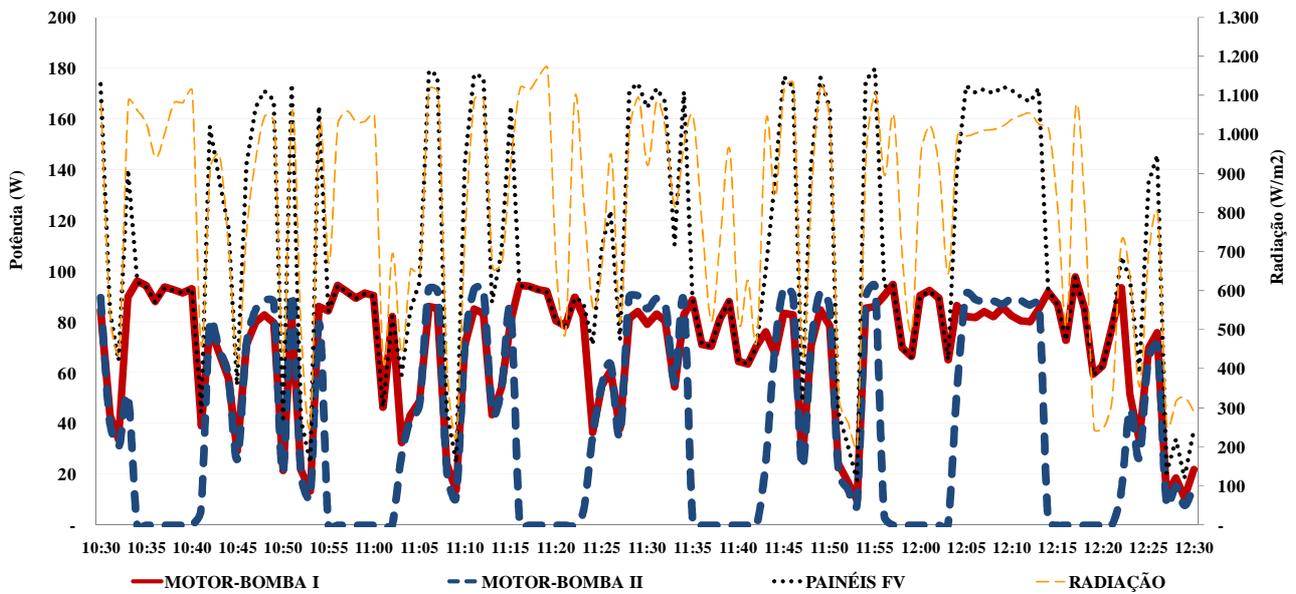


Figura 18- Curvas de potência dos motores, dos painéis FV e de radiação em Fortaleza, 25/05/2008, com as bombas trabalhando simultaneamente.

Para essa segunda estratégia de operação, foram obtidos os seguintes valores apresentados na Tab. 7:

Tabela 7. Valores médios obtidos de 10:30h às 12:30h do dia 25/05/2008 para os motores trabalhando simultaneamente.

Consumo Energético (Wh)			Quantidade de Litros (L)			Consumo Específico (kWh/m <sup>3</sup> )		
MB I	MB II	TOTAL	MB I	MB II	TOTAL	MB I	MB II	TOTAL
140,11	73,34	213,45	820	493	1.313	0,1708	0,1488	<b>0,1625</b>

Portanto, o consumo específico da unidade como um todo para esta segunda estratégia com as bombas trabalhando simultaneamente foi de **0,1625 kWh/m<sup>3</sup>**, praticamente igual ao consumo específico da primeira estratégia.

Vê-se que o consumo energético da segunda estratégia aumenta bastante. Porém, a quantidade de volume de água também aumenta, pois os motores trabalham sem pausas (a menos quando o tanque do poço seca). Este crescimento no consumo de energia e na quantidade de água é praticamente proporcional, visto que o consumo específico diminuiu muito pouco em relação à primeira estratégia. Isto pode ser visualizado no gráfico da Fig. 19.

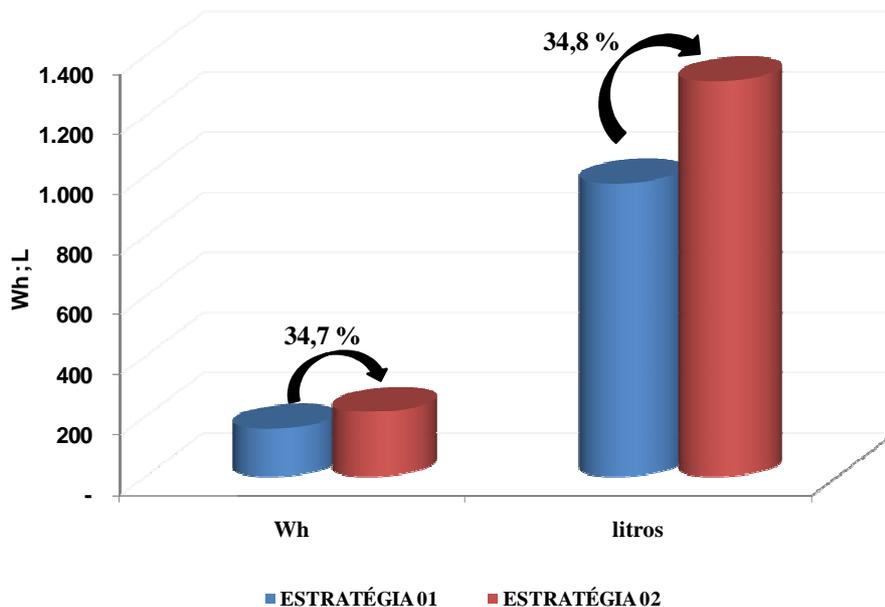


Figura 19- Gráfico comparativo do consumo energético e da quantidade de água do sistema como um todo.

#### 4.2 Verificação do excedente de energia

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através dos dados medidos, porém simulando o controle do conversor *Buck* CC/CC. Para isso, todas as tensões acima de 12 V foram ajustadas para este nível de tensão, fazendo o papel do controle.

Objetivando demonstrar o excedente de energia disponível devido ao controle dos conversores (mantendo a potência de saída constante para altas radiações), foram traçados dois gráficos mostrados na Fig. 20 e na Fig. 21. As curvas “POTÊNCIA DISPONÍVEL” representam a potência que os painéis fotovoltaicos poderiam disponibilizar se não houvesse o controle, curva esta exatamente igual às curvas pontilhadas “PAINÉIS FV” dos gráficos das Fig. 17 e Fig. 18. As curvas “POTÊNCIA ÚTIL” representam a potência total requisitada pelos dois motores com o controle do conversor simulado. As curvas tracejadas “RADIAÇÃO” mostram a radiação.

**Bombas trabalhando alternadamente.** O gráfico da Fig. 20 representa o excedente de energia encontrado devido ao controle simulado, em altas radiações, para os motores trabalhando alternadamente. Este excedente pode ser claramente encontrado como sendo a diferença entre a curva “POTÊNCIA DISPONÍVEL” (potência que os painéis FV podem disponibilizar) e a curva “POTÊNCIA ÚTIL” (potência utilizada pelos motores com a simulação do controle).

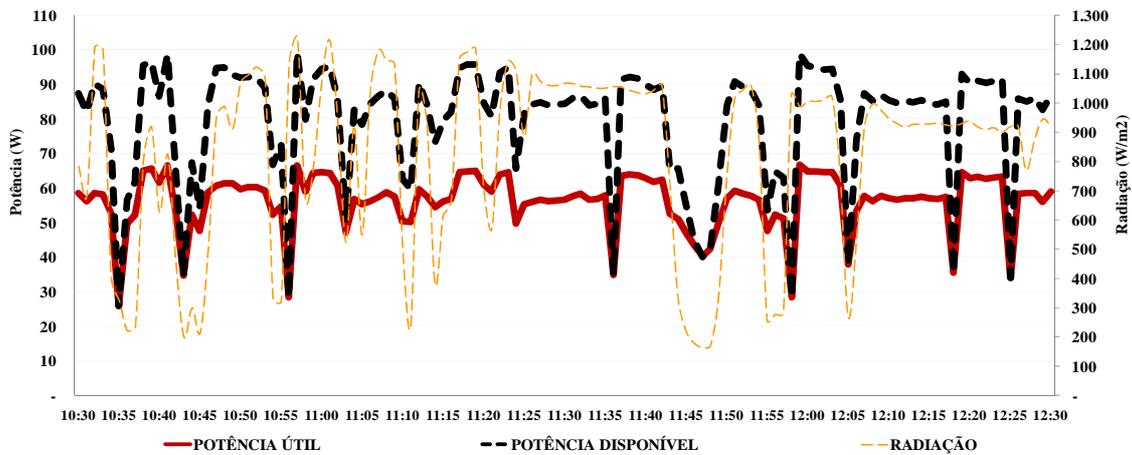


Figura 20- Simulação do excedente de energia para os motores trabalhando alternadamente.

O excedente de energia apresentado na Fig. 20, de aproximadamente 29 %, sugere a elaboração de um controle para otimizar o acionamento dos motores quando a radiação estiver alta, a possibilidade de utilização de uma outra carga (bomba, baterias, etc.) ou ainda a redução no número de painéis fotovoltaicos.

**Bombas trabalhando simultaneamente.** Da mesma forma, o gráfico da Fig. 21 representa o excedente de energia encontrado devido ao controle simulado, em altas radiações, para os motores trabalhando simultaneamente.

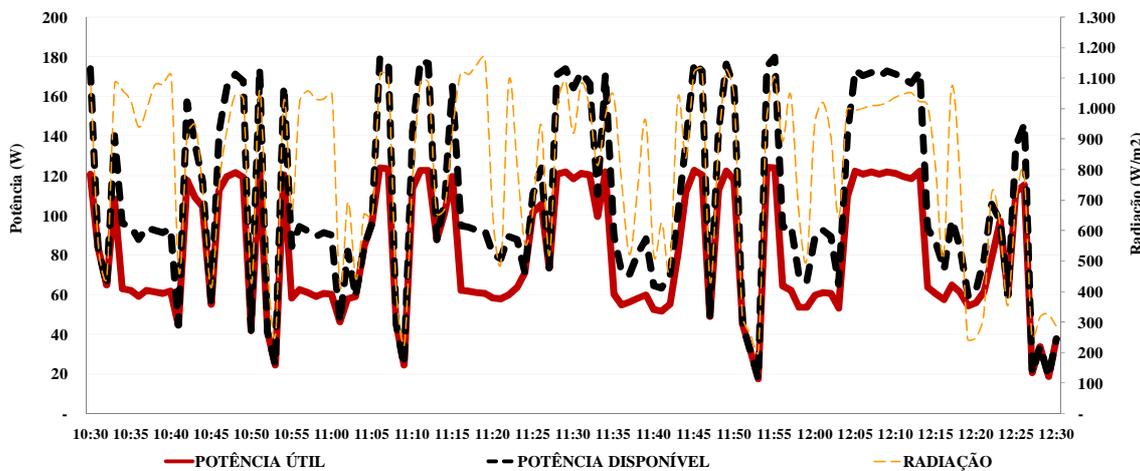


Figura 21- Simulação do excedente de energia para os motores trabalhando simultaneamente.

Analogamente, o excedente de energia apresentado na Fig. 21, de aproximadamente 24 %, sugere a elaboração de um controle para otimizar o acionamento dos motores quando a radiação estiver alta, a possibilidade de utilização de uma outra carga (bomba, baterias, etc.) ou ainda a redução no número de painéis fotovoltaicos.

## 5. CONCLUSÕES

A utilização de dois motores-bomba em uma futura unidade de osmose reversa acionada por painéis fotovoltaicos sem baterias de forma alternada ou simultânea possui características diferentes. Enquanto que o uso alternado dos motores apresenta valores reduzidos de volume de água e consumo de energia, o uso simultâneo das bombas apresenta uma quantidade bem maior de volume de água, porém consumindo bem mais energia, o que leva a valores de consumo específico de energia muito próximos (0,1626 e 0,1625 kWh/m<sup>3</sup>).

Em uma situação real, considerando um poço com capacidade de atender, sem restrições, à demanda da unidade de osmose reversa, o volume de água disponibilizado pela estratégia com os motores trabalhando simultaneamente seria maior ainda. Este fato torna esta segunda estratégia mais atraente, visto que, em uma situação real, a água a ser bombeada do poço poderia ser destinada a outros fins (banho, lavagem de louças, animais, etc.).

O controle proporcionado por conversores CC/CC, que mantêm a potência dos motores constantes para altas radiações, faz com que haja um excedente de energia em relação à potência total que o sistema fotovoltaico pode fornecer e à potência realmente utilizada pelas bombas. Este excedente de energia, em altas radiações, é um importante parâmetro a ser utilizado na elaboração de controles que gerenciem a alternância ideal dos motores, na utilização de outras cargas ou ainda em uma possível redução do sistema FV utilizado, reduzindo o custo de investimento total do projeto.

### *Agradecimentos*

Ao Banco do Nordeste, pelo financiamento do projeto. À FUNCAP, pela disponibilização de bolsa de iniciação científica ao primeiro autor deste artigo. Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, pela cessão do espaço necessário à construção do Laboratório de Energias Alternativas. A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram e contribuem para o desenvolvimento do projeto.

## REFERÊNCIAS

- Carvalho, P. Freire, C. Montenegro, F. Riffel, D. 2004. The Brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 12, n. 5.
- García-Rodríguez. 2003. Renewable energy applications in desalination: state of the art, *Solar Energy*, vol. 75 (2003), pp. 381-393.
- Helal, A. M. Al-Malek, S. A. Al-Katheeri, E. S. 2008. Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates, *Desalination*, vol. 221 (2008), pp. 1-16.
- Oliveira, R.G.V. Oliveira, R.S.H. Carvalho, P.C.M. Riffel, D.B. 2007. Avaliação de métodos de seguimento do ponto de máxima potência para sistemas fotovoltaicos aplicados em unidades de dessalinização, I-CBENS, CD-ROM.
- Riffel, D. B., 2005. Unidade de Osmose Reversa Acionada por Energia Solar Fotovoltaica sem Baterias: Simulação, Projeto e Validação Experimental, Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFC, Fortaleza.
- Tzen, E. Morris, R. 2003. Renewable energy sources for desalination, *Solar Energy*, vol. 75 (2003), pp. 375-379.
- Tzen, E. Theofilloyianakos, D. Kologios, Z. 2008. Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned, *Desalination*, vol. 221 (2008), pp. 29-36.

### **ENERGY BALANCE OF PUMP-MOTORS FOR A BATTERYLESS REVERSE OSMOSIS DESALINATION UNIT POWERED BY PHOTOVOLTAIC PANELS**

**Abstract.** *The purpose of this article is to analyze the energy balance of a prototype of a photovoltaic powered batteryless reverse osmosis plant, under development in the Laboratory of Renewable Energies at the Universidade Federal do Ceará, aiming to establish the efficient management of the two used motor-pumps. Powers curves of the motors, photovoltaic modules and radiation are shown and confronted to define an ideal solution for the motors management.*

**Key words:** *Solar Energy, Photovoltaic Technology, Reverse Osmosis.*