

## AVANÇOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO PARA COMUNIDADES RURAIS

**Naum Fraidenraich e Olga de Castro Vilela**

UFPE - Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia  
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cid. Universitária - CEP 50740-540 Recife, PE  
Fone/Fax (81) 271-8250

### RESUMO

*Nas últimas duas décadas, a tecnologia de bombeamento fotovoltaico experimentou considerável progresso. Componentes como inversores, condicionadores de potência e moto-bombas foram aperfeiçoados e melhorada sua capacidade de adaptação. A queda no preço dos geradores, acompanhada pelo aumento da eficiência do conjunto de bombeamento fotovoltaico (gerador mais moto-bomba), fizeram com que esses sistemas se tornassem uma das opções mais viáveis para o atendimento a pequenas comunidades rurais. Este trabalho descreve sistemas de abastecimento de água, apresenta configurações de conjuntos de bombeamento fotovoltaico, mostra as características operacionais e aborda aspectos de projeto. O trabalho inclui expressões de cálculo, assim como informações sobre custos e confiabilidade dos sistemas de bombeamento.*

### INTRODUÇÃO

A continuidade da vida na terra depende, dentre outros elementos básicos, da disponibilidade de água potável. Em extensas regiões da superfície terrestre, habitadas por importantes contingentes populacionais, esse recurso é escasso ou de difícil acesso, seja devido à distância em que se encontra afastado dos locais onde residem as comunidades ou ao fato de se apresentar na forma de água subterrânea. No Nordeste do Brasil, os habitantes de pequenas vilas rurais, ainda hoje fazem uso do esforço humano ou animal para extrair e/ou transportar água de sua fonte até os locais de utilização.

As bombas manuais constituem uma das opções mais divulgadas para o abastecimento de água, especialmente para o consumo humano. Os sistemas diesel também são bastante utilizados para acionar sistemas de bombeamento. Quando se trata de pequenas comunidades, a potência dos sistemas diesel, ainda os de menor porte, resulta demasiado elevada para atender a demanda, devendo funcionar a nível parcial de potência e, por

consequente, de forma pouco eficiente. Por outro lado, as exigências de uma adequada manutenção dos sistemas diesel, em termos de custos e frequência de atendimento, faz com que esses sistemas se encontrem, muitas vezes, além das possibilidades dessas comunidades.

Nenhuma técnica de bombeamento, por si só é adequada para todas as aplicações existentes. Cada tipo de sistema de bombeamento tem um campo de aplicação para o qual resulta ser mais adequado. As bombas solares são especialmente úteis para demandas de quantidades medianas de água, tal como as requeridas por pequenos povoados de 100 a 1000 habitantes, e para o atendimento de necessidades agrícolas moderadas. A Tabela 1 apresenta as características das três opções disponíveis de bombeamento de água (manual, solar e diesel).

Apesar de ainda pouco difundidos, os sistemas de bombeamento fotovoltaico apresentam muitas vantagens sobre os sistemas convencionais. O fato de ser um equipamento modular, com módulos de potência bastante reduzida, por exemplo 50 Wp, permite acompanhar o crescimento da demanda de água do local com o aumento da potência do equipamento (Wp simboliza Watts pico e representa a potência máxima do módulo em condições padrão, ou seja, nível de radiação solar igual a 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura das células igual a 25 °C). O gerador fotovoltaico não possui partes móveis, o que facilita sua instalação e manutenção. Outra vantagem do sistema de bombeamento solar é o bom casamento entre o perfil temporal do recurso energético e a demanda de água, tanto do ponto de vista diário como sazonal, já que os períodos de elevada insolação coincidem com os de maior consumo.

Uma apreciável fração dos sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados no mundo, têm se concentrado no intervalo de potências de 1000 a 1500 Wp, onde apresentam maior competitividade. Porém, sistemas de maior potência foram instalados no mundo, ainda que em número bem mais reduzido (Barlow, 1993).

**Tabela 1. Comparação de sistemas de bombeamento de água.**

Tipo de bomba	Principais vantagens	Desvantagens
Bomba Manual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• baixo custo;</li> <li>• fácil manutenção;</li> <li>• não necessita de combustível;</li> <li>• pode ser usada com poços escavados manualmente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• manutenção freqüente;</li> <li>• baixo fluxo de água;</li> <li>• demanda tempo e energia que se poderia usar com mais produtividade em outras atividades.</li> </ul>
Bomba Solar (acionada por geradores fotovoltaicos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pouca manutenção;</li> <li>• não necessita combustível;</li> <li>• fácil de instalar;</li> <li>• confiável;</li> <li>• grande durabilidade;</li> <li>• funciona sem supervisão;</li> <li>• poucos custos repetitivos;</li> <li>• sistema modular, fácil de se adaptar à demanda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• investimento inicial elevado;</li> <li>• menor produção em climas com baixo recurso solar.</li> </ul>
Bomba Diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• inversão de capital moderada;</li> <li>• pode ser portátil;</li> <li>• tecnologia bem conhecida;</li> <li>• fácil de instalar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• manutenção inadequada reduz sua vida útil;</li> <li>• combustível caro e abastecimento irregular;</li> <li>• problema de ruído e poluição.</li> </ul>

## ANTECEDENTES DA TECNOLOGIA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Solomon de Caux (1576-1626), engenheiro francês, descreve no ano de 1615, a invenção de uma máquina de elevar água utilizando a expansão de ar aquecido mediante energia solar (Pytlinski, 1978). O século XIX foi pródigo em experiências de conversão de energia solar em energia mecânica via energia térmica, registrando os nomes de C. Guntner de Laibach, na Áustria, de 1854 a 1873, A. Mouchot e A. Pifre, na França de 1860 a 1878, J. Ericsson nos Estados Unidos e W. Adams na Índia, no período 1870 a 1885. Sem pretender esgotar a relação das importantes contribuições realizadas durante as primeiras décadas do século XX, cabe mencionar o trabalho de F. Shuman e C. Boys, que inauguraram um sistema de irrigação na localidade de Meadi, Egito, utilizando um campo de concentradores cilindro parabólicos de 1200 m<sup>2</sup> de superfície de captação. O projeto foi interrompido em 1915 devido ao início da 1ª guerra mundial.

Outra via de conversão de energia solar, neste caso em energia elétrica, é a materializada pelas células solares. Suas origens remontam à primeira metade do século XIX com os trabalhos de E. Becquerel em células eletrolíticas, quando foi observado, pela primeira vez em 1839, o efeito fotovoltaico. Os progressos na física do estado

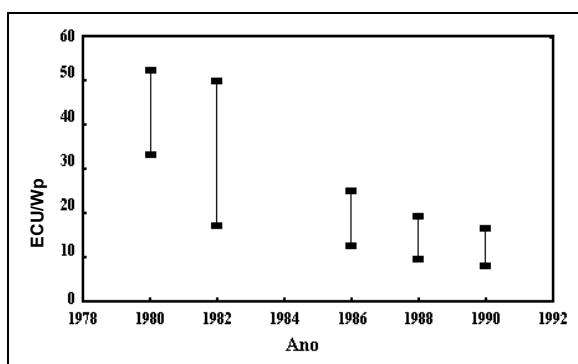
sólido no início deste século, abriram caminho para o desenvolvimento das células solares em diversos materiais, em especial o silício monocristalino. Em 1958, a nave espacial Skylab levou consigo um transmissor de rádio de 5 W alimentado com energia de origem fotovoltaica. Inaugurou-se dessa forma a era espacial da tecnologia fotovoltaica, que foi sucedida, nos últimos 25 anos e com especial êxito, pelas células solares para aplicações terrestres.

Associada a programas visando a melhoria das condições de vida em países do Terceiro Mundo, a tecnologia de bombeamento fotovoltaico iniciou seu desenvolvimento a partir dos anos 70. Os primeiros sistemas implantados foram desenvolvidos por firmas francesas (Pompes Guinard). Eram constituídos por motores elétricos de magneto permanente, instalados na superfície do poço, e bombas submersas acopladas através de um eixo vertical.

A evolução experimentada ao longo da década de 80, possibilitou a produção de equipamentos de tecnologia simples e confiável. Um total de dez mil sistemas de bombeamento foram instalados no mundo até o início da década de 90, sendo 30 a 40% deles em países em desenvolvimento.

A aplicação dos sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água tem recebido especial atenção nos últimos tempos devido à drástica queda no preço dos conversores fotovoltaicos que, em

meados de 1976, custavam US\$ 20/Wp e, nos dias de hoje, encontram-se em torno de US\$ 5/Wp. A redução nos custos dos módulos fotovoltaicos foi acompanhada de uma redução no custo dos sistemas de bombeamento que, em 1980, eram da ordem de US\$ 50/Wp e em 1990, encontravam-se já na faixa de 10 a 20 US\$/Wp (Figura 1). Deve acrescentar-se ainda o aumento na eficiência máxima dos sistemas de bombeamento fotovoltaico, que em 1981, situava-se entre 1 e 3% e em 1990 atingia valores entre 3,5 e 5% (Figura 2). A significativa redução de custos de investimento e o importante aumento na eficiência dos sistemas, têm tornado esses equipamentos mais competitivos perante as opções tradicionais, e estimulado consideravelmente os estudos nesta área.

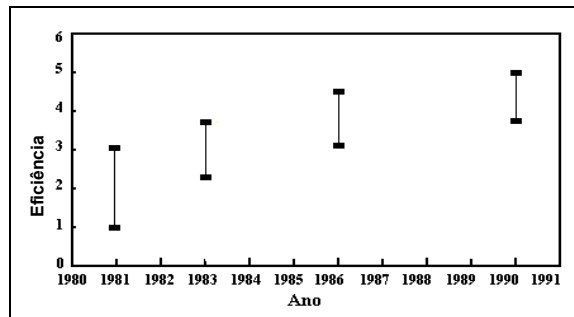


**Figura 1. Evolução dos preços de sistemas de bombeamento fotovoltaico (1ECU = US\$ 1,26) (Barlow, 1993).**

## SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico podem ser utilizados para abastecer de água as comunidades rurais e para fins de irrigação. O abastecimento de água a comunidades rurais inclui usos como horticultura e criação de pequenos animais.

A grande demanda de água dos sistemas de irrigação em contraste com o pequeno número de pessoas que podem usufruir dos mesmos, faz com que o bombeamento fotovoltaico para o abastecimento de água seja considerado prioritário do ponto de vista das necessidades humanas. A demanda de populações bastante numerosas pode ser atendida com volumes relativamente pequenos de água. Um sistema de bombeamento de 1 kWp, destinado ao abastecimento de água, pode atender tipicamente as necessidades de 500 pessoas, enquanto que para irrigação esse número seria dras-



**Figura 2. Variação da eficiência dos sistemas de bombeamento fotovoltaico (Barlow, 1993).**

ticamente menor (10 a 20 pessoas). Neste trabalho, portanto, analisaremos sistemas de bombeamento fotovoltaico destinados ao abastecimento de água e a pequenas aplicações produtivas, como horticultura e criação de pequenos animais.

Estes sistemas são constituídos por uma fonte de água, conjunto de bombeamento fotovoltaico, tanque de armazenamento e sistema de atendimento à demanda. O recurso solar e as precipitações, em conjunto com a fonte de água, integram o recurso natural do sistema. A seguir serão analisadas cada uma de suas partes.

## Fonte de água

A qualidade das águas subterrâneas está relacionada com a natureza do ambiente geológico de armazenamento. As águas provenientes das províncias sedimentares, principalmente as aluviais são, em geral, de boa qualidade. São águas moles, normalmente alcalinas ou neutras ( $\text{pH} \geq 7$ ), bicarbonatadas ou bicarbonatadas-cloretadas, pouco sulfatadas, sulfatadas-cloretadas ou mistas. No entanto, na região do semi-árido Pernambucano por exemplo, recursos hídricos dessa natureza são escassos. A maior parte do recurso subterrâneo provem da província hidrogeológica cristalina. Os recursos hídricos do cristalino se caracterizam pela sua baixa qualidade, além de se apresentarem de forma descontínua e armazenados em aquíferos fissurais. São águas bastante cloretadas, com altos teores de sólidos totais dissolvidos. Nas Tabelas 2 e 3 são mostradas as principais características químicas e físicas de poços localizados no sertão de Pernambuco.

As águas provenientes de fontes superficiais, sejam elas cursos de água ou açudes, podem ser extraídas mediante bombas de sucção ou bombas flutuantes. Quando os rios são temporários, como acontece em muitos casos, tornam-se

**Tabela 2. Principais características de águas do Cristalino, região semi-árida de Pernambuco; percentual de ocorrência dos diversos tipos.**

Tipo de água	Local	
	Ouricuri (%)	Petrolina (%)
Cloretadas ( $Cl \geq 60\%$ do total de ânions)	70	60
Bicarbonatada ( $HCO_3 + CO_3 \geq 60\%$ do total de ânions)	10	18
Bicarbonatadas-Cloretadas ( $20\% \leq Cl + HCO_3 \leq 60\%$ , $SO_4 \leq 20\%$ e $\% Cl \cong \% HCO_3$ )	16	20
Sulfatadas ( $SO_4 \geq 60\%$ )	4	2

Fonte: Cruz, 1968.

**Tabela 3. Exemplos de poços e águas do Cristalino, região semi-árida de Pernambuco.**

Municípios	Profundidade (m)	Características do poço		
		Vazão (l/h)	Total de sólidos solúveis (ppm)	Potabilidade (s/Schoeller)
Serra Talhada	50	500	5500	Inadequada
Sertânia	50	1000	3200	Inadequada
Águas Belas	50	200	27860	Inadequada
Mirandiba	36	2500	348	Boa
Mirandiba	80	6000	523	Passável
Inajá	100	4000	1523	Medíocre

Fonte: CISAGRO/CELPE

necessários sistemas de acumulação. As águas de fontes subterrâneas (aqüíferos), podem ser extraídas com bombas superficiais no caso de pequenas profundidades ( $H_m \leq 6m$ ) e com bombas submersas no caso de médias e grandes profundidades.

Do ponto de vista hidráulico, interessa considerar as seguintes características dos poços de água: nível estático, nível dinâmico e vazão disponível. Mesmo sem extração de água, o poço apresenta um nível (nível estático) que pode experimentar importantes variações durante o ano. As diferenças entre nível estático e dinâmico (o nível dinâmico é a soma do nível estático e a diferença de pressão necessária para que a água possa escoar da reserva aqüífera através do solo e ingressar na região de recalque) podem ser consideráveis e ainda variar ao longo do ano em função das precipitações, do clima (evapotranspiração), das condições do solo e do estado do poço. Por exemplo, um poço com nível estático de 20 m pode ter uma diferença de 23 m (rebaixamento ou *draw-down*) operando com uma vazão de  $6.5 m^3/hora$ , de forma que o nível de água desce para uma profundidade de 43 m. A esse valor deve ser somada a altura do tanque de água (2 a 4 m) mais as perdas na tubulação. As perdas por fricção normalmente não devem exceder 10% do nível estático, para o qual recomenda-se o uso de tubulações

com diâmetros superiores aos usados nos sistemas convencionais.

A vazão bombeada não deve superar, em nenhum caso, a máxima vazão disponível ou capacidade do poço. Nem sempre um poço tem capacidade de suprir a demanda requerida (muitos deles só aceitam o bombeamento manual). Uma correta utilização da fonte de água exige o conhecimento de suas características principais, ou seja, profundidade estática e dinâmica e máxima vazão disponível, que podem ser determinadas mediante procedimentos relativamente simples (com bomba portátil e acessórios).

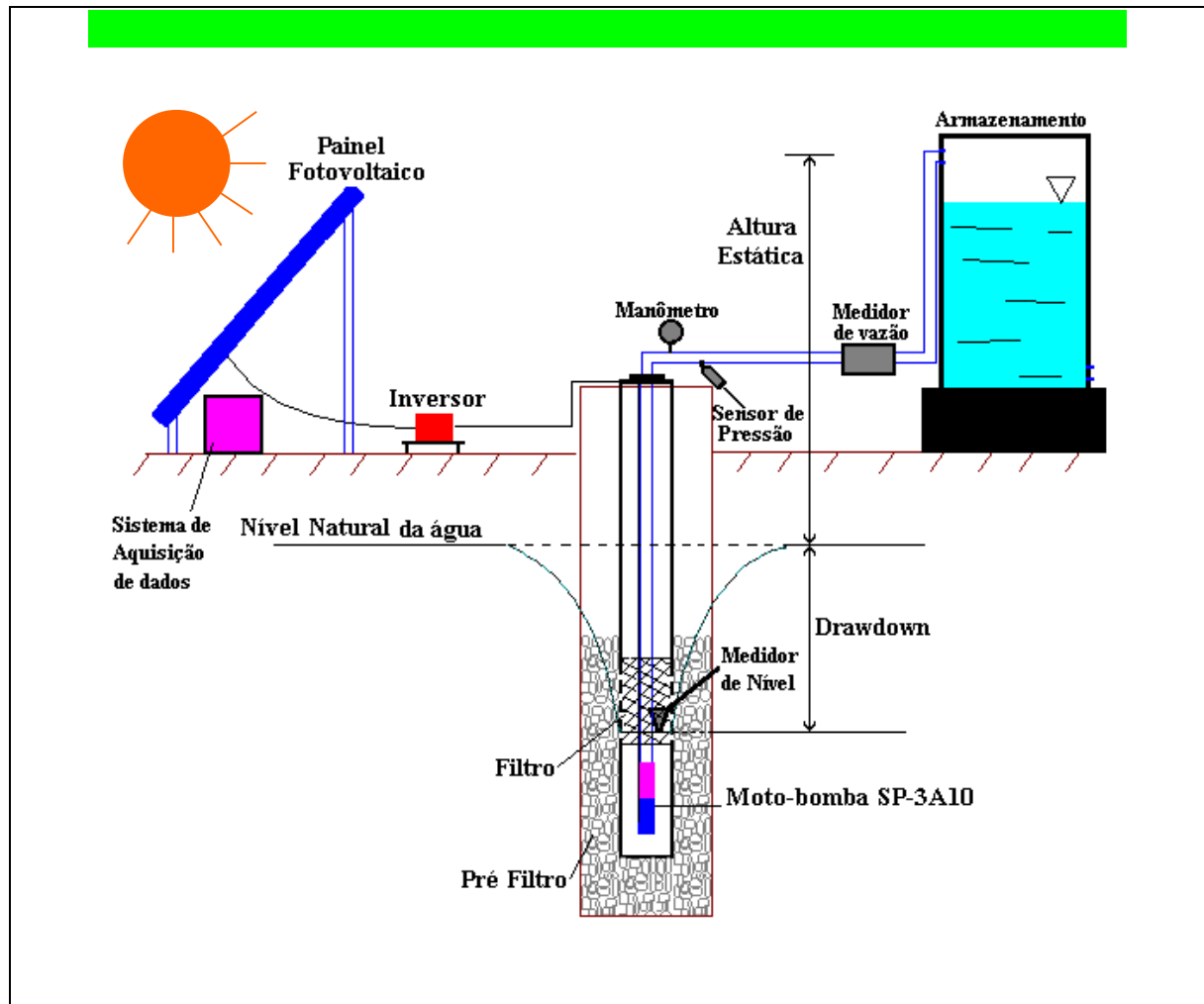
### Sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento consiste de:

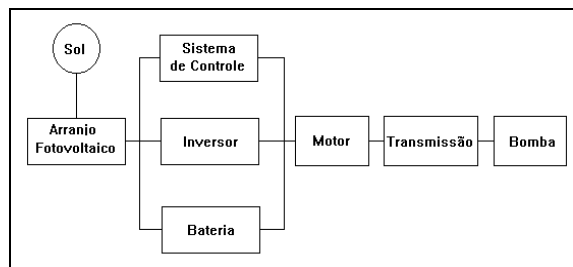
- Arranjo fotovoltaico;
- Acoplamento gerador-carga;
- Conjunto moto-bomba.

O esquema de uma instalação usual pode ser visto na Figura 3.

Diversas configurações podem ser adotadas, de acordo com as necessidades de bombeamento e os recursos disponíveis, como por exemplo, as indicadas na Figura 4.



**Figura 3. Esquema de um sistema de bombeamento fotovoltaico (laboratório do grupo de pesquisas FAE).**



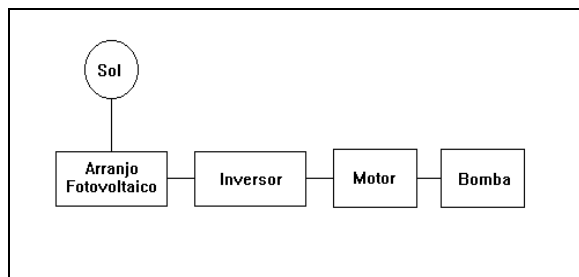
**Figura 4. Configurações do sistema de bombeamento fotovoltaico.**

Cabe mencionar que os geradores fotovoltaicos produzem potência elétrica na forma de corrente contínua. Quando as moto-bombas são acionadas por corrente alternada é necessário o

uso de dispositivos, denominados inversores, que fazem a conversão de corrente.

Nas duas últimas décadas, alguns dispositivos como os inversores, foram aperfeiçoados e outros componentes, como os sistemas de transmissão mecânica, descartados, devido às inúmeras dificuldades operacionais (redução drástica do tempo de vida; necessidade de manutenção constante). As configurações mais simples tendem, portanto, a serem favorecidas (Figura 5).

Alternativamente ao uso do inversor, existem motores elétricos de corrente contínua (DC), com e sem escovas, cuja tecnologia tem sido bastante aperfeiçoada e que podem ser utilizados para bombeamento de águas superficiais. O uso de motores de corrente contínua convencionais para bombear água de poços, está restrito a pequenas



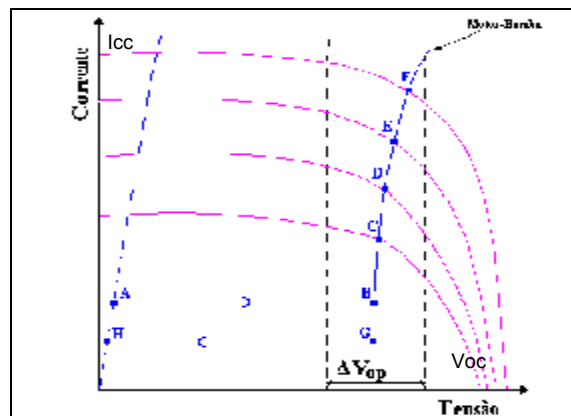
**Figura 5. Configuração usual do sistema de bombeamento fotovoltaico.**

potências devido a que, para potências elevadas, o diâmetro dos motores pode chegar a ser superior ao diâmetro do poço (habitualmente 4") (Servant, 1994). Quando os motores utilizam escovas, deve-se acrescentar a exigência de sua reposição periódica. Entretanto, motores de corrente contínua, submersos, de tipo tubular e potências na faixa de 1000 W, com comutação eletrônica, são cada vez mais freqüentemente utilizados. Dado que o acoplamento da moto-bomba ao gerador fotovoltaico nem sempre é o mais adequado às características do gerador, esses sistemas usam conversores DC-DC, dispositivos que tem a função de deslocar o ponto de operação do conjunto gerador-carga para regiões em que a transferência de energia do gerador fotovoltaico é realizada de forma mais eficiente. Tudo indica que a tecnologia de moto-bombas de corrente contínua acopladas a dispositivos DC-DC poderá se desenvolver tanto quanto os motores de corrente alternada com inversores.

**Arranjo fotovoltaico** - O gerador fotovoltaico é o componente mais confiável do sistema de bombeamento de água, com previsões de vida média de 20 a 25 anos. As potências de sistemas de bombeamento instalados no mundo, com maior freqüência encontram-se na faixa de 500 W a 1500 W, bombeando água de poços com níveis de 20 a 50 m de profundidade.

A previsão do comportamento do arranjo fotovoltaico é feita utilizando-se as curvas características do módulo fotovoltaico (corrente vs. tensão). Cada curva é traçada para valores diferentes de irradiância em condições padrão de temperatura, tendo como parâmetros básicos a corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e o ponto de máxima potência (Figura 6).

Os pontos de máxima potência (PMP) se encontram sobre uma linha quase vertical (pontos C, D, E e F na Figura 6). Isto permite definir como região de operação mais conveniente, a indicada na figura com o intervalo de tensão ( $\Delta V_{op}$ ).



**Figura 6. Curvas características de módulos fotovoltaicos e de uma moto-bomba com seguidor do ponto de máxima potência (pontos C, D, E e F).**

Os módulos fotovoltaicos são dispostos em painéis com ligações em série e em paralelo, de forma que a corrente e a tensão do gerador estejam corretamente adaptadas às características da moto-bomba.

As ligações em paralelo, somam os valores das correntes dos módulos, deslocando a curva característica resultante para cima. Já o arranjo em série soma os valores das tensões produzidas, deslocando a curva resultante para a direita.

A inclinação do plano dos módulos fotovoltaicos deve também ser cuidadosamente estudada, já que esse ângulo permite adaptar a energia solar coletada ao perfil de demanda de água da comunidade a ser abastecida. De maneira geral pode-se dizer que existe um bom sincronismo entre demanda e oferta de água. O aumento da demanda de água durante o verão coincide com a maior disponibilidade do recurso solar e vice-versa, no período de inverno.

### Configurações disponíveis para o acoplamento gerador-carga

O acoplamento do gerador fotovoltaico ao conjunto moto-bomba pode ser feito diretamente, como no caso de motores de corrente contínua, ou através de sistemas de condicionamento de potência, utilizados tanto para motores de corrente contínua como de corrente alternada. De maneira geral, é conveniente que o conjunto moto-bomba seja "visto" pelo gerador fotovoltaico como uma tensão fixa ou seguindo o ponto de máxima potência cujo locus, como foi comentado, coincide com uma linha de tensão aproximadamente constante. Utilizam-se para esta finalidade, dispositivos de seguimento do

ponto de máxima potência ou de regulação de tensão. Baterias também podem ser utilizadas para adaptar a curva de demanda às características do gerador fotovoltaico, mantendo aproximadamente constante a tensão produzida. O diagrama da Figura 7 mostra diversas configurações disponíveis para o acoplamento entre o gerador fotovoltaico e o conjunto moto-bomba.

Salvo o sistema de acoplamento direto entre gerador e moto-bomba, as outras opções indicadas se propõem adaptar as características das moto-bombas às características do gerador, de forma que o processo de transferência de energia seja o mais eficiente possível. Trata-se de operar a moto-bomba com a máxima potência elétrica compatível com a radiação solar que incide no gerador fotovoltaico.

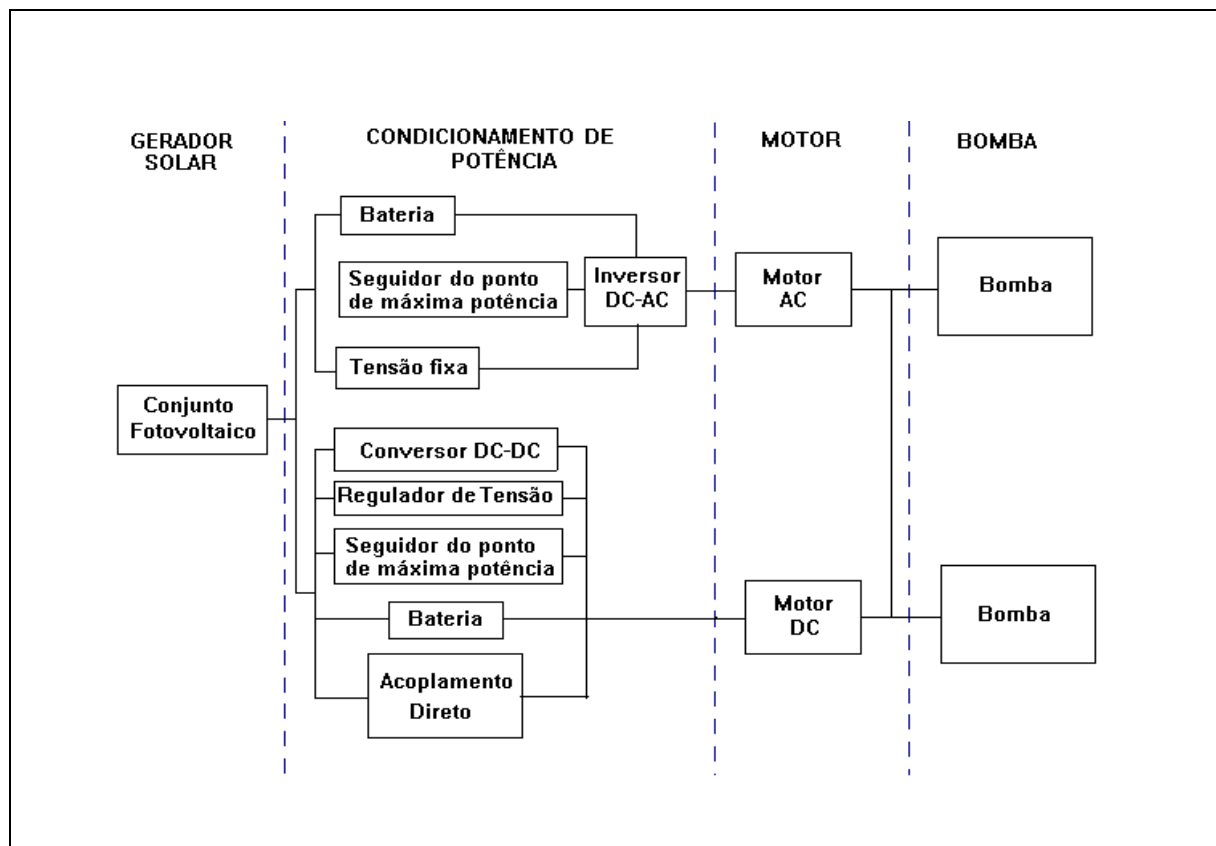
**Seleção do conjunto moto-bomba** - A seleção de uma unidade moto-bomba acionada por sistemas fotovoltaicos deve levar em consideração fatores como: a) as condições do local onde será instalado; b) a necessidade ou não de trabalhar com o motor submerso e; c) a disponibilidade de

dispositivos eletrônicos para impulsioná-lo. Os tipos de motor mais utilizados são os motores DC de magneto permanente com escovas, motor DC de magneto permanente sem escovas e motores AC. No que se refere às bombas, as de tipo centrífugo prevalecem amplamente, apesar de que, para certas aplicações, as bombas de deslocamento positivo são indispensáveis (grandes profundidades de poço e vazões pequenas ou moderadas).

Dado que os conversores fotovoltaicos geram corrente contínua, o uso de motores DC torna-se atrativo. No entanto o casamento de impedância entre gerador e moto-bomba não é muito adequado, o que requer o uso de sistemas de condicionamento de potência.

O uso generalizado de motores AC se deve a sua ampla disponibilidade, em uma larga faixa de potências, e baixos custos. Porém, torna-se necessário o uso de inversores, o que se traduz em uma redução da eficiência total do sistema.

Em resumo, os critérios para a seleção de um conjunto moto-bomba são: eficiência, preço, confiabilidade e disponibilidade. Normalmente, a potência requerida define a escolha. Para potên-



**Figura 7. Configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico.**

cias menores que 500 watts é recomendado o uso de motor DC com magneto permanente (com ou sem escovas). Para potências até 1000 W, podem-se utilizar motores AC ou DC sem escovas, ambos com condicionamento de potência. Para potências maiores que 1000 W utilizam-se motores AC.

A seguir, serão descritos os tipos de moto-bombas de uso mais freqüente.

#### Sistemas DC

**Bombas volumétricas** - Os projetos realizados utilizando bombas volumétricas não dedicaram a atenção necessária ao acoplamento entre as características elétricas do grupo moto-bomba e o arranjo fotovoltaico, resultando em sistemas de baixa eficiência, que foram abandonados.

**Bombas submersas com motores de superfície** - São sistemas simples e largamente utilizados na África. Possuem eficiências relativamente baixas devido às perdas nas transmissões mecânicas. Os motores com comutação por escovas tornam o sistema inviável devido à grande necessidade de manutenção. Por esse motivo, têm sido freqüentemente trocados por sistemas AC com moto-bombas submersas.

**Moto-bombas submersas** - Neste sistema são utilizados motores tubulares de magneto permanente, sem escovas, de 4 polegadas de diâmetro, acoplados a bombas centrífugas multiestágio.

#### Sistemas AC

**Inversor de freqüência fixa** - Utilizados em sistemas de corrente alternada de baixo custo. A freqüência mais comum é de 50 Hz. Este sistema tem sido implantado na Polinésia Francesa.

**Inversor de freqüência variável** - É usado em sistemas de alta eficiência. Os dispositivos eletrônicos produzem pulsos de comprimento modulado na conversão DC-AC, utilizando ainda seguimento dos pontos de máxima potência. As tensões DC requeridas são 60 a 140 V e a conversão para AC trifásico ocorre com altos valores de eficiência (90 a 95%).

### Armazenamento

A variabilidade do recurso solar torna necessário o uso de sistemas de armazenamento. Em um clima idealizado, que apresenta o mesmo nível de irradiância todos os dias, o volume do

tanque de água poderia ser projetado para distribuir ao longo de 16 horas, a água bombeada durante 8 horas. Na prática, o volume bombeado deverá ser, em média, superior à demanda de água para oferecer um serviço de abastecimento com um razoável grau de segurança. Como regra prática recomenda-se, em bons climas, volumes de água da ordem de três dias de consumo.

**Demanda de água** - De acordo com recomendações da Organização Mundial de Saúde o abastecimento de água nas regiões rurais para bebida, cocção, higiene pessoal e usos sanitários deve ser, na sua totalidade, da ordem de 40 lts/pessoa/dia. Levantamentos realizados em vários países mostram que consumos entre 25-30 lts/pessoa/dia são freqüentes. Para a realização de projetos, normalmente adota-se a taxa de consumo existente em regiões rurais abastecidas de água e de características similares à região analisada. Na ausência dessa informação, deve-se adotar valor de 40 lts/pessoa/dia.

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico têm condições de atender perfeitamente essa demanda. Por exemplo, uma comunidade de 500 pessoas com um consumo diário de 40 lts/pessoa.dia tem uma demanda total de 20.000 lts/dia. Assumindo um nível dinâmico do poço de 30 m, o produto altura-demanda situa-se na faixa dos 600 m<sup>4</sup>/dia, o que requer um sistema fotovoltaico da ordem de 1 kW de potência pico (vide Anexo). Assim, um equipamento relativamente modesto (1 kWp) pode atender a demanda de uma comunidade de 500 pessoas, de acordo com os padrões da OMS.

É importante considerar que a instalação de um sistema de abastecimento de água pode provocar mudanças importantes nos padrões de consumo da comunidade. Um estudo realizado em Zimbabwe, sob os auspícios do "Energy Program Zimbabwe" e do Ministério de Saúde e Bem Estar das Crianças (MoHCW), verificou que antes da instalação do sistema de abastecimento de água, 60% das famílias utilizavam o rio como fonte principal de suprimento de água. Três anos depois, o estudo mostrava que esse percentual havia diminuído para 34% (Mushamba, 1996). Paralelamente, o consumo diário dos usuários conectados à rede de abastecimento domiciliar (em oposição ao abastecimento comunitário) aumentou significativamente, assim como o consumo nos postos de saúde e comércio. Por exemplo, o consumo diário dos usuários conectados ao sistema comunitário, que era de 124 litros/dia antes da instalação da rede, passou a 463 litros/dia após a instalação da rede de atendimento domiciliar.



## CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA

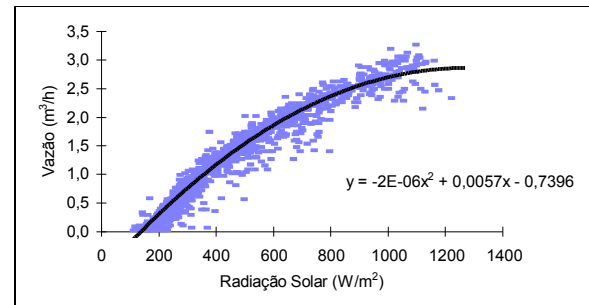
Incluído o sistema de bombeamento, o poço de água, pode ser caracterizado pela relação existente entre radiação solar (ingresso de energia, *input*) e vazão de água bombeada (produto do sistema, *output*), relação que pode ser obtida experimentalmente ou extraída de catálogos de equipamentos. Nesse último caso, a curva característica é parametrizada pela altura manométrica.

Um exemplo de curva característica do sistema de bombeamento pode ser visto na Figura 8, onde está mostrada a relação operacional entre vazão e irradiância ( $V$  vs  $I_c$ ), obtida experimentalmente para um sistema instalado no município de Inajá-PE, na localidade de Tear. O sistema consiste de um gerador de 21 módulos (1113 Wp), um inversor (1500 W) e uma moto-bomba AC trifásica de 10 estágios que opera na região de máxima potência do gerador, bombeando água de um poço com 23,3 m de nível estático e 22 m de rebaixamento máximo. O sistema conta ainda com um reservatório de 14 m<sup>3</sup>, localizado a 3 m de altura. As curvas de catálogo fornecidas para o conjunto moto-bomba encontram-se na faixa de alturas manométricas compreendidas entre 30 e 70 m. Em condições operacionais e em presença de baixos níveis de radiação (200 a 400 W/m<sup>2</sup>), a altura manométrica corresponde ao nível estático do poço (rebaixamento pequeno ou nulo) e, portanto, o comportamento da curva tende a coincidir com a curva de catálogo de menor altura (30 m). Para níveis elevados de radiação, a relação  $V$  vs  $I_c$  aproxima-se da curva de maiores alturas manométricas (50 m).

Conhecida a serie temporal do nível de radiação, horária por exemplo, a capacidade de bombeamento do sistema pode ser estimada de forma bastante simples calculando, a partir da curva característica do sistema (Figura 7), o volume bombeado durante pequenos intervalos de tempo e somando as contribuições ao longo de um determinado período. Por exemplo, o volume médio bombeado pelo sistema instalado em Tear, no período do 8 de março a 14 de abril e 4 de julho a 31 de julho do ano 1997, foi de 14,0 m<sup>3</sup>/dia.

Observa-se na Figura 7 que o sistema começa a bombear água a partir de níveis de radiação maiores que 170 W/m<sup>2</sup>. Este valor, denominado nível crítico, tem influência determinante na eficiência média de operação do sistema,

que em muitos casos, resulta ser significativamente menor que a eficiência nominal (igual ao produto das eficiências dos diversos subsistemas que compõem o conjunto e determinada operacionalmente para baixos níveis de radiação). Quanto maior o nível crítico menor será a eficiência média do sistema. No exemplo anterior, constatamos que a eficiência máxima encontra-se na faixa de 4,5 a 5,2% e a eficiência média durante o período mencionado foi igual a 2,9%.



**Figura 8. Vazão em função da radiação solar coletada - local: Inajá-Pernambuco.**

## CUSTOS E CONFIABILIDADE

Excluindo custos de armazenamento e distribuição, uma instalação típica de 1500 W fornecendo 25 m<sup>3</sup> de água por dia a uma altura manométrica de 30 m, custa em torno de US\$ 20.000. Quando se adiciona o custo do poço, o custo de um pequeno sistema de armazenamento (atendendo um dia de armazenagem) e a tubulação para três pontos de distribuição, o preço total do sistema duplica. Em particular, o custo do gerador fotovoltaico, que é aproximadamente igual à metade do custo do sistema de bombeamento, passa a representar 25% do custo total (Servant, 1994). Essa composição de custos determina que o custo total do sistema de abastecimento de água seja pouco sensível aos custos dos conversores fotovoltaicos, e que futuras reduções destes não venham a ter uma incidência muito grande no custo final da água produzida. As considerações que antecedem, explicam porque não existem diferenças expressivas entre o custo da água produzida mediante grupos diesel ou mediante sistemas fotovoltaicos (na faixa de 0,5 a 1,0 US\$/m<sup>3</sup>).

O custo da água produzida depende da altura manométrica e do tamanho do equipamento, que naturalmente será função do número de pessoas atendidas. Por exemplo, para uma altura manométrica de 25 m e população de 200 habitantes, o custo da água é da ordem de US\$ 0,8/m<sup>3</sup>. Para

1000 habitantes e mesma altura, o custo se reduz a 0,4 US\$/m<sup>3</sup>. Alturas manométricas maiores (50 m) resultam em custos mais elevados: 0,8 e 0,6 US\$/m<sup>3</sup>, para populações de 200 e 1000 habitantes, respectivamente.

O fator que definitivamente outorga uma nítida superioridade aos sistemas de bombeamento fotovoltaico com relação a outras opções é sua confiabilidade. A confiabilidade de um sistema pode ser avaliada através da medida do tempo médio entre falhas (TMEF). Em um trabalho realizado em Malí (Billerey, 1991), foram monitorados durante 4 anos 116 sistemas (bombas submersas). Foram necessárias 139 intervenções para manutenção e um tempo médio entre falhas de 6000 horas de operação. Este valor pode ser considerado bastante satisfatório quando comparado com sistemas diesel ou bombas manuais que requerem operações de manutenção com uma frequência bastante maior. Das falhas observadas, 90% foram atribuídas a limpezas das bombas e a problemas no sistema de distribuição. Apenas 10% foram relacionadas a defeitos no inversor (7%), motor (2%) e bomba (1%).

Em um trabalho publicado pelo Banco Mundial (Barlow, 1993) registraram-se TMEF de 30.000 horas para sistemas fotovoltaicos, enquanto que para bombas diesel e manuais mencionam-se valores de 1500 horas. Pode-se concluir, portanto, que os sistemas de abastecimento de água com geradores fotovoltaicos são altamente confiáveis.

## **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA INSTALADOS NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

No âmbito de um programa de colaboração entre Brasil e Alemanha, denominado Programa Eldorado, foram instalados, ao longo de 1997, 15 sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico no interior do Estado de Pernambuco. Os sistemas instalados através do Programa Eldorado (Tabela 4) podem ser considerados típicos da tecnologia de bombeamento fotovoltaico, tanto no que se refere a sua configuração quanto às dimensões.

Os critérios estabelecidos para a instalação dos sistemas foram os seguintes:

1. A qualidade da água a ser fornecida atende as normas brasileiras (ABNT PB-19) em termos de salinidade, dureza, pH, turbidez, cor, presença de nitritos, nitratos, amônia e metais pesados.
2. Os poços estão situados em lugares públicos, para evitar restrições ao acesso aos mesmos.
3. O número de habitantes residentes numa área distante de 4 a 5 km do local do poço deve ser suficientemente grande como para justificar sua instalação.
4. A produção da fonte de água deve ser suficiente para atender o consumo humano e animal dessa comunidade.
5. A distancia do local escolhido para a instalação do sistema de abastecimento de água à rede de energia elétrica deve ser igual ou maior que 3 km e a rede não deverá ser estendida em um futuro próximo.

No presente, o programa de instalação de bombas fotovoltaicas continua com mais vigor que na época dos projetos originais (1990–1996). Aspectos como a continuidade de operação dos equipamentos e a qualidade do serviço que eles prestam passam, portanto, a ser uma preocupação fundamental.

## **SUSTENTABILIDADE DOS PROGRAMAS DE INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO - COMENTÁRIOS FINAIS**

Além do Programa Eldorado, diversas iniciativas tem sido tomadas para promover a difusão dos sistemas de bombeamento fotovoltaico em pequenas comunidades rurais. Os programas de empresas estatais (concessionárias e companhias de abastecimento de água), prefeituras dos municípios bem como programas federais contribuem para um aumento considerável do número de sistemas instalados no país.

O grande número de instalações e a constatação de que a tecnologia de bombeamento fotovoltaico oferece hoje, um dos meios mais eficientes e confiáveis para atender a demanda de água de comunidades afastadas da rede elétrica, são razões para iniciar ações que visem dar sustentabilidade aos mesmos.

Tendo em vista a experiência com as instalações existentes, podem-se estabelecer alguns critérios no processo de implantação desses sistemas, que ajudem a viabilizar um serviço de boa qualidade. Esses critérios são basicamente:

**Tabela 4. Características dos sistemas de abastecimento de água instalados no estado de Pernambuco (dados de 11 sistemas).**

Município	Capacidade do reservatório (m <sup>3</sup> )	Volume diário para 6 kWh/m <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /dia)	Altura estática (m)	Carga hidráulica (m <sup>4</sup> /dia)	Tipo de módulo	Potência instalada (Wp)	Tipo de inversor	Tipo de bomba
Inajá	14	47	7,3	343	SM55	1113	SA 1500	SP5A-7
Inajá	14	26	23,3	606	SM55	1113	SA 1500	SP3A-10
Inajá	14	31	26,1	809	SM55	1113	SA 1500	SP5A-7
Inajá	14	45	19,9	896	SM55	742	SA 1500	SP5A-7
Inajá	14	42	19,7	827	SM55	742	SA 1500	SP5A-7
Inajá	14	32	23,7	758	SM55	1113	SA 1500	SP5A-7
Inajá	20	25	73	1825	SM55	1272	SA 1500	SP3A-10
Mirandiba	14	52	7,54	392	SM55	742	SA 1500	SP5A-7
Mirandiba	14	45	17,6	792	SM55	1113	SA 1500	SP5A-7
Mirandiba	14	53	10	530	SM55	742	SA 1500	SP5A-7
S. J. do Belmonte	14	25	28,7	718	SM55	1272	SA 1500	SP3A-10

- divulgação de informações e intercâmbio de opiniões com a comunidade sobre a nova fonte de energia a ser utilizada;
- estudo prévio das características de consumo da população local;
- caracterização do poço e análise da água;
- incentivo à estruturação ou criação de associações comunitárias nas regiões a serem atendidas.

Antes da instalação do sistema, é importante informar à comunidade sobre a nova tecnologia, como funciona, suas vantagens e limitações. Cursos básicos e cartilhas são alguns dos recursos que podem ser utilizados. Acredita-se que o ponto de partida seja sempre a vontade e as necessidades da comunidade. A dissociação do trabalho técnico das questões sociais envolvidas, através da imposição da tecnologia, pode comprometer todo o processo de implantação da mesma.

O diálogo com a comunidade permitirá também conhecer os hábitos de consumo e a quantidade real ou potencial de demanda de água, parâmetro este fundamental para o dimensionamento do sistema.

Um aspecto central do processo de implantação do sistema está associado à fonte de água. A qualidade da água, as características físicas e operacionais do poço (diâmetro, profundidade, nível estático e dinâmico), obtidas através de relatórios de perfuração, constituem parâmetros essenciais no projeto dos sistemas. Em casos de poços já existentes, muitas vezes as informações não estão disponíveis ou são ultrapassadas (as características dos aquíferos podem variar com o tempo). Nesses casos será necessária a participação de hidrogeólogos para a realização de testes de caracterização das possíveis fontes de água.

Os dados necessários, mencionados anteriormente, juntamente com informações climáticas sobre o local de instalação, permitem determinar as características do sistema a ser utilizado e, eventualmente, a necessidade de outros dispositivos acoplados ao de bombeamento, como por exemplo, um dessalinizador, no caso de água salobra.

O estabelecimento de uma infra-estrutura que proveja assistência técnica, manutenção e reposição de peças é imprescindível para garantir o funcionamento dos sistemas a longo prazo. Essa infra-estrutura pode ser organizada por instituições que atuem diretamente na comunidade, tais como associações de moradores, Organizações Não Governamentais (ONGs) ou prefeituras locais.

Finalmente, uma vez instalados e em operação, a monitoração do desempenho desses sistemas é uma importante fonte de informações sobre a qualidade da configuração escolhida. Metodologias de processamento de dados desenvolvidas em laboratório, permitem identificar os méritos e os pontos de estrangulamento do projeto, subsidiar a elaboração de modelos de simulação e sugerir as configurações de menor custo e mais adequadas para cada localidade (Vilela & Fraidenraich, 1997; Vilela & Fraidenraich, 1998).

Essas considerações sugerem a conveniência de uma atuação de caráter global, para viabilizar e consolidar o processo de difusão da tecnologia de bombeamento fotovoltaico no país.

## REFERÊNCIAS

- BARLOW, R., McNELIS, B. & DERRICK, A. (1993). "Solar pumping. An introduction and update on the technology, performance, costs and economics". World Bank, Relatório Técnico n°168.

- BILLEREY, J., AFME, (1991). *“Le pompage solaire photovoltaïque: 13 années d’expérience et de savoir-faire au Mali”*. DNHE-Bamako - Paris.
- MUSHAMBA, P. (1996). “Photovoltaic water pumping. From demonstration to dissemination”. *Energy Bulletin*, v.6, n°2. Publicado pelo Ministério de Transporte e Energia de Zimbabwe.
- PYTLINSKI, J. T. (1978). *“Historical development of the use of solar energy for pumping irrigation water”*. Alternative Energy Sources, Solar Energy 3, p1191-1206.
- SERVANT, J. M. et al. (1994). *“Recent developments in PV pumping applications and research in European Community”*. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, Holanda.
- VILELA, O. C. & FRAIDENRAICH N. (1997). *“Methodology of analysis of photovoltaic pumping systems. Example for a system installed in the Northeast of Brazil.”* Proceedings of 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, p2284-2287.
- VILELA, O. C. & FRAIDENRAICH N. (1998). *“Performance and Evaluation of PV Water Supply Systems.”* Documento interno, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

## ANEXO

### PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

A seguir são apresentadas expressões de cálculo e um exemplo relativo a sistemas de abastecimento de água.

A potência hidráulica produzida pela bomba pode ser escrita em função da radiação solar coletada, como segue:

$$P_h = A_G I_{col} \eta_{FV} \eta_{mb} = \rho g H_m V_b \quad (A1)$$

onde:  $P_h$  é a potência hidráulica produzida (W);  $A_G$  é a área do módulo fotovoltaico ( $m^2$ );  $I_{col}$  é a radiação solar horária coletada ( $W/m^2$ );  $\eta_{FV}$  é a eficiência do gerador fotovoltaico;  $\eta_{mb}$  é a eficiência do conjunto moto-bomba;  $\rho$  é a densidade da água ( $Kg/m^3$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $H_m$  é

a altura manométrica (m) e;  $V_b$  é a vazão de água bombeada ( $m^3/s$ ).

Por outro lado, a potência do gerador fotovoltaico pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_{FV} = A_G I_{col} \eta_{FV} \quad (A2)$$

Considerando-se  $P_{FV,nom}$  a potência nominal do gerador fotovoltaico correspondente a uma radiação solar ( $I_{col, nom}$ ) igual a  $1000 W/m^2$ , pode-se dizer que:

$$A_G \eta_{FV} = \frac{P_{FV,nom}}{1000} \quad (A3)$$

Substituindo-se (A3) em (A1) e integrando-se a equação resultante ao longo de todo o dia, teremos uma equação que relaciona a energia solar coletada  $H_{col}$  (Joule/ $m^2$ ) com a energia hidráulica:

$$\frac{H_{col} P_{FV,nom} \eta_{mb}}{1000} = \rho g H_m V_b \quad (A4)$$

A máxima vazão que o sistema de bombeamento fotovoltaico irá bombear será atingida quando o sistema operar com a potência nominal do gerador. A Equação (A5) permite obter essa vazão.

$$P_{FV,nom} \eta_{mb} = \rho g H_m V_b \quad (A5)$$

Cabe mencionar que os resultados obtidos a partir das Equações (A1) a (A5) são válidos apenas em ordem de grandeza.

### Exemplo de cálculo

A energia hidráulica fornecida por um gerador de 1 kW de potência nominal em uma região onde a energia diária coletada é igual a  $21,6 MJ/m^2$  ( $6 kWh/m^2$ ), considerando a eficiência do conjunto moto-bomba igual a 30%, pode ser obtida a partir da Equação (A4):

$$H_m \cdot V_b = 660 m^4$$

se  $H_m = 30 m$ , então o volume bombeado resulta:

$$V_b = 22 m^3$$

Assim, nas condições de bom clima ( $6 \text{ kWh/m}^2$ ), um conjunto de bombeamento fotovoltaico de 1 kW de potência nominal pode produzir  $660 \text{ m}^4$  de potência hidráulica por dia ( $\text{m}^4$  é utilizado como unidade de energia hidráulica).

A Equação (A5) possibilita o cálculo da máxima vazão que o sistema fotovoltaico pode bombear nas horas de irradiância máxima ( $I_{\text{col}} = 1 \text{ kW/m}^2$ ) e sua comparação com a capacidade do poço (máxima vazão admissível), que não deve ser excedida. Adotando para  $H_m$  e  $\eta_{mb}$  os valores do exemplo anterior, a vazão bombeada nas horas de pico será igual a  $3,67 \text{ m}^3/\text{h}$ . Este valor deve ser menor que a máxima vazão admissível (valores típicos se encontram na faixa de 2 a  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

## **Progress in Photovoltaic Pumping Systems for Water Supply in Rural Communities**

### **ABSTRACT**

*There has been remarkable progress in photovoltaic pumping technology over the last two decades. The efficiency of inverters, power conditioning devices and motor-pumps has improved and their adaptation capacity has been enhanced. Due to decreased cost of photovoltaic modules and increased efficiency of photovoltaic pumping equipment, those systems are a good choice to provide water supply to rural communities. This paper describes water supply systems and, presents the most common configurations of photovoltaic pumping units, and their operational characteristics, besides analyzing aspects of system design. Information about costs and reliability of PVP systems is also included.*