

## METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA UTILIZANDO FONTE DE ALIMENTAÇÃO CC

Olga de Castro Vilela – [ocv@ufpe.br](mailto:ocv@ufpe.br)

Naum Fraidenraich – [nf@ufpe.br](mailto:nf@ufpe.br)

Universidade Federal de Pernambuco – Grupo FAE/DEN

Marco Antonio Galdino – [marcoag@cepel.br](mailto:marcoag@cepel.br)

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

**Resumo.** Este artigo apresenta metodologia empregada para abreviar os tempos demandados em trabalhos experimentais de levantamento de curvas características (vazão vs. irradiância) de sistemas fotovoltaicos de bombeamento d'água com diferentes configurações. Propõe-se determinar as curvas características com base em dois tipos de curvas: vazão vs. potência CC - obtidas com uma fonte de alimentação ajustada de forma a simular o funcionamento do painel fotovoltaico, e potência CC vs. irradiância - obtidas com ensaios com módulos FV em condições reais. Mostra-se que é possível reduzir o número de dias necessários para realizar os ensaios para obtenção das curvas características quando as configurações ensaiadas apresentam os mesmos geradores FV ou as mesmas alturas de recalque. As vazões, e conseqüentemente os volumes diários d'água, calculados com base nas curvas obtidas consideram os limites superiores de desempenho dos sistemas.

**Palavras-chave:** sistemas fotovoltaicos de bombeamento d'água, sistemas fotovoltaicos, energia solar, eletrificação rural

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento d'água têm adotado tradicionalmente concepções diferentes no que se refere ao tipo de motobomba, bem como às características dos motores e sistemas de condicionamento de potência, resultando em uma variedade de tecnologias específicas de cada fabricante.

A avaliação do desempenho desses sistemas normalmente é feita a partir de trabalhos experimentais de levantamento de curvas características de operação na forma vazão versus irradiância coletada. Este tipo de trabalho é geralmente realizado em condições reais de operação (*outdoors*). Quanto maior o número de sistemas ou configurações propostas, maior o número de ensaios necessários. Com base no conjunto de dados medidos pode-se traçar curvas ou ajustar modelos computacionais para auxiliar o dimensionamento/otimização de uma família de sistemas similares.

Durante ensaios realizados com um conjunto grande de motobombas na área de testes do grupo FAE verificou-se que algumas unidades apresentavam comportamentos diferentes do esperado para aquele modelo de motobomba. Algumas motobombas apresentavam travamento e outras, um volume de água bombeado inferior ao esperado. Dessa forma, durante os ensaios foi necessário identificar as unidades que apresentavam esses problemas e separar as que apresentavam melhores condições de operação. Para reduzir o tempo de ensaio, evitando longas esperas para obtenção das curvas características realizadas em condições reais, foi utilizada uma fonte de alimentação CC para simular o gerador fotovoltaico. A partir dos ensaios realizados com esta fonte CC, é possível traçar curvas de vazão vs. potência elétrica CC, que indicam o comportamento do subsistema conversor-motobomba isoladamente. Dessa forma é possível realizar uma comparação entre esses subsistemas, sem a influência do gerador FV.

Além da comparação entre motobombas, verificou-se que os ensaios com a fonte de alimentação poderiam ser úteis para reduzir o número de ensaios *outdoors* utilizados para caracterizar sistemas de bombeamento com diferentes configurações.

No presente artigo apresentamos uma metodologia adotada na obtenção de curvas características vazão vs. irradiância de sistemas de bombeamento com o uso da fonte de alimentação. Resultados de ensaios realizados com sistemas de bombeamento de diferentes potências de gerador FV e alturas de recalque são utilizados para validar o procedimento proposto.

O procedimento baseia-se em dois conjuntos distintos de medidas instantâneas: valores de potência elétrica CC e vazão de água bombeada para sistemas operando com a fonte de alimentação e valores de irradiância solar e potência elétrica CC para sistemas operando com geradores fotovoltaicos. Esse tipo de trabalho é normalmente realizado com o intuito de conhecer a produção diária de água ( $m^3/dia$ ) dos sistemas, dadas as condições de irradiação solar ( $kWh/m^2.dia$ ), a altura manométrica(m) e a potência do painel fotovoltaico (Wp).

## 2. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS E DA BANCADA DE ENSAIOS

O diagrama dos sistemas ensaiados é apresentado na Fig. 1.



Figura 1 – Diagrama em blocos do sistema ensaiado

O gerador fotovoltaico é formado por 8 módulos em série, de diferentes potências de pico (Tab. 1).

O conversor de potência é específico para o sistema em questão sendo compatível apenas com o motor empregado (não funciona com motores elétricos convencionais). O conversor pode operar efetuando o seguimento de ponto de máxima potência (MPPT – *maximum power point tracking*), ou mantendo fixa a tensão do painel fotovoltaico, sendo que o número de módulos em série a ser utilizado deve ser configurado previamente (*dip switch*) no conversor.

O motor elétrico é de corrente contínua pulsada, um tipo não convencional, com rotor dotado de imã permanente.

O fabricante não fornece maiores informações sobre detalhes de construção e/ou funcionamento do conjunto motor-conversor, de forma que as características aqui descritas são aproximadas.

A bomba é de deslocamento positivo com rotor helicoidal e estator de borracha. Trata-se de uma motobomba submersível, para utilização em poços artesianos de diâmetro de 4”

Um conjunto de 6 configurações, escolhidas para apresentar a metodologia desenvolvida, é mostrado na Tab. 1.

Tabela 1 - Configurações dos sistemas ensaiados

	Configuração painel FV	altura manométrica (mca)
C1	8s x 50Wp	40
C2	8s x 50Wp	60
C3	8s x 55Wp	40
C4	8s x 55Wp	60
C5	8s x 75Wp	40
C6	8s x 75Wp	60

Além das configurações apresentadas acima, foi ensaiado um sistema com uma motobomba de menor altura de recalque, que difere da descrita anteriormente apenas por apresentar um rotor com maior passo. Esse sistema é composto por 8 módulos de 50Wp (painel idêntico ao das configurações (C1 e C2) e foi testado para uma altura de recalque de 30m. Os ensaios com esse sistema foram realizados para fins de verificação do procedimento proposto. Essa configuração extra é referida como (CE).

Os ensaios foram feitos nos laboratórios da UFPE, utilizando uma bancada para ensaios de sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Esta bancada implementa alturas manométricas reais de 10m, 20m, 30m e 40m por meio de tubulações de 2” instaladas em uma torre. A motobomba em teste é instalada em uma cisterna de 10.000L (simulando um poço com vazão ilimitada), e a água bombeada é desviada por meio de um conjunto de registros para a tubulação da altura manométrica desejada, retornando posteriormente à cisterna.

Para as alturas superiores a 40m, não disponíveis na torre, utiliza-se uma motobomba de contrapressão, instalada em paralelo com a motobomba ensaiada (Brito et al., 2007). Para isso, é utilizada uma motobomba submersível convencional DANCOR 3.2 SSR09, do tipo centrífugo dotada de motor 220VCA de indução trifásico. Esta bomba auxiliar é acionada por um inversor de frequência convencional Siemens modelo MM420 para acionamento em velocidade variável, por sua vez controlado a partir de um sensor de pressão Druck modelo PTX, instalado na saída da moto-bomba em teste, a qual se conecta à coluna de 40m da torre. O sinal elétrico do sensor, conectado a uma entrada analógica do conversor, é comparado com um nível pré-programado, aumentando ou diminuindo a rotação da bomba DANCOR, de forma a regular pressões equivalentes às alturas de recalque desejadas.

O sistema de monitoração é baseado em um *datalogger* (Campbell CR1000), o qual registra a cada minuto valores médios para as seguintes grandezas:

**Corrente CC (A)** - corrente na entrada do conversor, medida por meio de resistor *shunt* 150mV x 10A;

**Tensão CC (V)** – tensão na entrada do conversor, medida por meio de divisor de tensão 89:1;

**Vazão ( $m^3/h$ )** – vazão produzida pela moto-bomba sob ensaio, medida por meio de sensor hidromagnético KOHNE CONAUT – IFC 010-K;

**Irradiância ( $W/m^2$ )** – irradiância no plano do painel fotovoltaico, medida com auxílio de piranômetro semiconductor LI-COR LI-200SA;

**Temperatura painel ( $^{\circ}C$ )** – temperatura medida com um sensor LM35.

Os ensaios efetuados correspondem a dois tipos: i) com painéis fotovoltaicos; ii) com fonte de alimentação CC dotada de tensão e corrente ajustáveis (Agilent 6675A).

Para os ensaios realizados com a fonte, é escolhida uma tensão da mesma ordem que a tensão que o conversor estabelece automaticamente nos ensaios com geradores fotovoltaicos (~120V – 8 módulos). Após estabelecer a tensão, varia-se a corrente para obter uma curva de vazão em função da potência elétrica CC na entrada do conversor. Essa potência seria o equivalente à potência gerada pelo arranjo fotovoltaico sob diferentes níveis de irradiância.

### 3. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE OBTENÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

Para obtenção de curvas características (vazão vs. irradiância) que permitam uma boa representação das configurações listadas na Tab. 1 da forma convencional, são necessários no mínimo 3 dias de ensaios para cada configuração com o sistema operando em condições reais. Considerando-se as seis configurações mostradas na Tab. 1 verifica-se que, em condições usuais, seriam necessários no mínimo de 18 dias de ensaios.

A metodologia proposta parte do seguinte pressuposto: dado um conjunto de painéis e uma motobomba que devem operar a diversas alturas, se

(a) para uma **certa altura manométrica** são obtidas as curvas de comportamento do sistema com painéis fotovoltaicos, pode-se afirmar que

(b) utilizando as informações geradas em (a), uma **fonte de alimentação CC** de características apropriadas pode substituir os geradores fotovoltaicos para **determinar** o comportamento com **qualquer outra altura**.

Uma análise das configurações listadas na Tab. 1 mostra que são utilizados três arranjos de módulos: 8x50Wp (configs. C1, C2), 8x55Wp (configs. C3 e C4) e 8x 75Wp (configs. C5 e C6). Ou seja, a relação entre potência CC gerada e irradiância coletada ( $P_{CC}$  vs.  $I_{col}$ ) para as seis configurações pode ser representada apenas por três curvas obtidas com ensaios *outdoors*. Isso se explica pelo fato de que a carga que o gerador fotovoltaico vê está estabelecida pelo conversor de frequência e independe da altura de recalque utilizada. Na prática, ao estabelecer a tensão de operação, o conversor determina a corrente a ser gerada pelo painel FV. Independente da motobomba alimentada pelo conversor ou da altura de recalque, a potência gerada seguirá o comando do conversor. Lembramos que estas afirmações valem apenas para o sistema em questão.

Considera-se também que a curva vazão vs. potência CC teoricamente independe do gerador (fonte de alimentação ou painel FV), e que a mesma só será diferente para diferentes motobombas e diferentes alturas de recalque. Essa afirmação parte do pressuposto de que o conversor de frequência não identifica a fonte geradora de potência, ou seja, não reconhece se a corrente fornecida provém de um gerador FV com determinada configuração ou de uma fonte de alimentação CC.

Verifica-se, na Tab. 1 que existem duas alturas de recalque: 40m (C1, C3, C5) e 60m (C2, C4, C6). Os dois conjuntos, representados por suas respectivas curvas de vazão vs. potência CC ( $\dot{V}$  vs.  $P_{CC}$ ) descrevem todas as configurações apresentadas na Tab. 1.

O procedimento proposto consiste em realizar ensaios *outdoors* para a obtenção das três curvas de potência CC vs. irradiância descritas anteriormente e a seguir ensaios com a fonte de alimentação para obter as duas curvas de vazão de água bombeada vs. potência CC correspondentes às alturas de 40m e 60m. Essas curvas geradas são utilizadas para obter as curvas vazão de água bombeada vs. irradiância ( $\dot{V}$  vs.  $I_{col}$ ) para todas as configurações da Tab. 1 como descrito a seguir.

Utiliza-se a potência CC como interface entre os valores da curva de regressão de vazão vs. potência CC, obtidas com a fonte, e os valores de irradiância versus potência CC obtidos com o gerador FV. A cada valor de potência CC medido corresponde um valor de irradiância e um valor de vazão. Pode-se determinar, portanto, os valores de vazão correspondentes a cada valor de irradiância de um conjunto de dados medidos (Fig. 2) (Vilela et al., 2001).

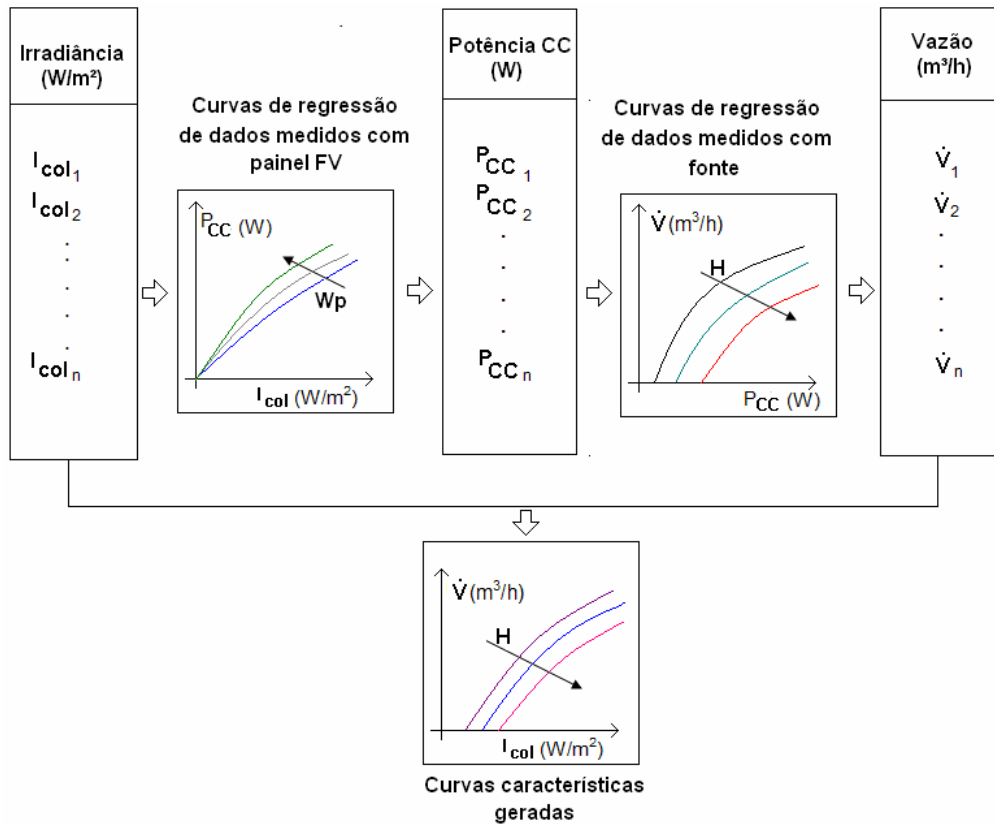


Figura 2 - Diagrama de procedimento de obtenção das curvas características utilizando curvas de e potência CC vs. irradiância coletada e curvas de vazão vs. potência CC.

### 3.1 Ensaios com painel fotovoltaico

Os sistemas descritos nas configurações C1, C3 e C5 (correspondentes a diferentes geradores e mesma altura de recalque de 40m) foram montados na bancada e ensaiados com os respectivos módulos fotovoltaicos durante vários dias, considerando-se um mínimo de 3 dias de ensaios para cada sistema. Para essas configurações as curvas características ( $\dot{V}$  vs.  $I_{col}$ ) são diretamente obtidas utilizando-se as medidas de vazão de água bombeada e irradiância solar coletada, restando obter as curvas características para as demais configurações (C2, C4, e C6), (altura de recalque de 60m).

As medidas de potência elétrica CC e irradiância coletada obtidas durante os mesmos ensaios são utilizadas para gerar três curvas de potência CC vs. irradiância (uma para cada configuração).

Considera-se que a curva de potência CC vs irradiância gerada pela configuração (C1) - painel 8x50Wp - é a mesma que se obteria com a configuração (C2) - painel 8x50Wp. Da mesma forma, as curvas geradas com as configurações (C3) - painel 8x55Wp e (C5) - painel 8x75Wp correspondem às configurações (C4) - painel 8x55Wp e (C6) - painel 8x75Wp respectivamente (Fig 3).

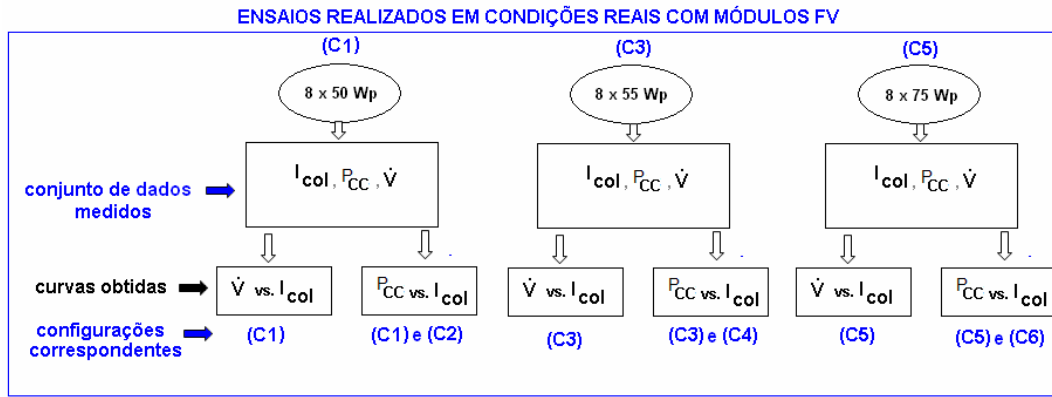


Figura 3 - Diagrama dos ensaios em condições reais, com módulos FV, realizados com as configurações (C1, C3 e C5) para obtenção direta das curvas ( $\dot{V}$  vs.  $I_{col}$ ) dessas configurações e das curvas ( $P_{cc}$  vs.  $I_{col}$ ) que correspondem às configurações (C2, C4, e C6).

No diagrama da Fig. 3 é mostrada a obtenção das três curvas características ( $\dot{V}$  vs.  $I_{col}$ ) determinadas diretamente (C1, C3 e C5) além das curvas ( $P_{cc}$  vs.  $I_{col}$ ) que correspondem às configurações (C2, C4 e C6) todas obtidas com o mesmo conjunto de ensaios.

### 3.2 Ensaios com fonte de alimentação e determinação das curvas características

Como mencionado, com duas configurações de ensaios com a fonte (C1) -40m, e (C2) - 60m, por exemplo, é possível obter as curvas ( $\dot{V}$  vs.  $P_{cc}$ ) de todas as configurações da Tab. 1 (Fig. 4).

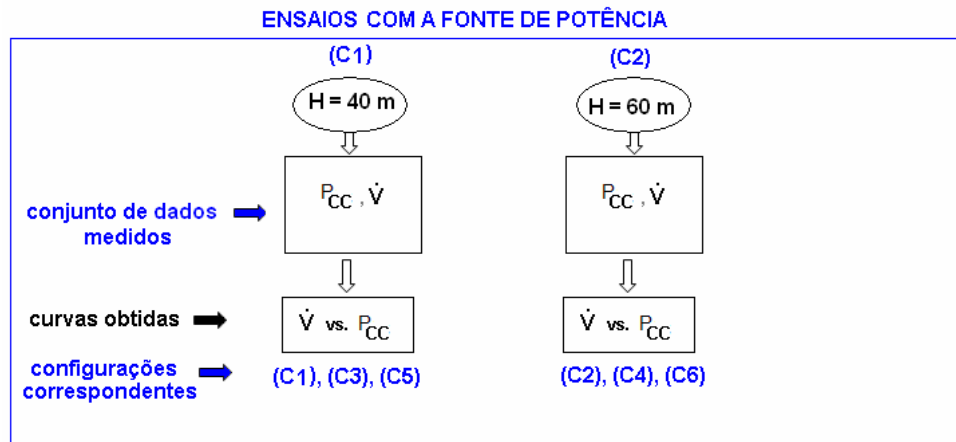


Figura 4 - Diagrama dos ensaios realizados com a fonte de alimentação para as configurações (C1 - 40m e C2 - 60m), para obtenção das curvas ( $\dot{V}$  vs.  $P_{DC}$ ) das configurações (C1, C2, C3, C4, C5, C6).

A configuração (C1) gera a curva ( $\dot{V}$  vs.  $P_{cc}$ ) para (C1, C3 e C5), todas com recalque de 40m, e a configuração (C2) gera ( $\dot{V}$  vs.  $P_{cc}$ ) que corresponde às configurações (C2, C4 e C6), todas com 60m de recalque. Entretanto, os ensaios anteriores realizados com o gerador FV já disponibilizam as curvas características das três primeiras, sendo necessário apenas um ensaio com a configuração (C2) para gerar as curvas ( $\dot{V}$  vs.  $P_{cc}$ ) para (C2, C4 e C6).

Aplicando-se o procedimento mostrado na Fig. 2 são geradas as curvas características ( $\dot{V}$  vs.  $I_{col}$ ) para as configurações (C2, C4, e C6) (H=60m).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para conferir o grau de fidelidade com que as curvas vazão ( $\dot{V}$  vs.  $P_{DC}$ ), obtidas com a fonte de tensão, representam a relação das mesmas grandezas, obtidas com o gerador fotovoltaico, a Configuração (C1) foi testada com a fonte e com o gerador. Os resultados são mostrados na Fig. 5.

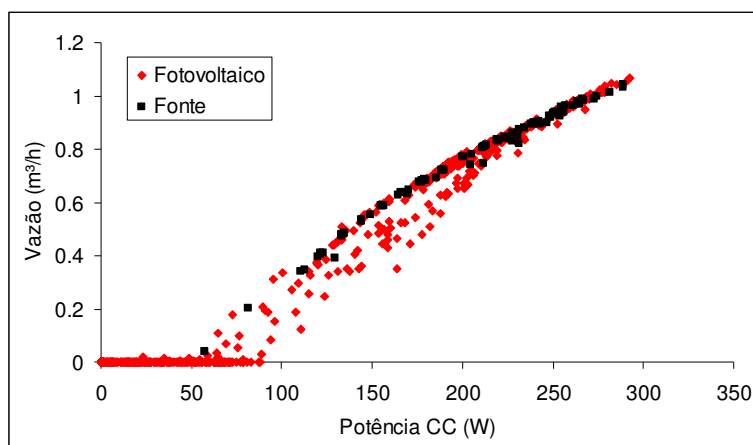


Figura 5 – Curva característica vazão x potência elétrica CC para a configuração (C1) operando com fonte e com gerador fotovoltaico.

Verifica-se (Fig. 5) uma superposição das curvas medidas para o sistema operando com a fonte e com painel fotovoltaico. Pode-se observar que a curva da fonte representa a envolvente dos valores máximos de vazão obtidos com o painel fotovoltaico. Este resultado é devido à estabilidade da potência suprida pela fonte e que não ocorre com o painel devido à passagem de nuvens que se traduzem em variações bruscas da irradiância e consequente dispersão dos pontos observados. Consta-se claramente que a curva obtida com a fonte pode ser entendida como o limite superior da vazão do sistema. Dessa forma, as curvas características geradas com o auxílio da fonte representam valores obtidos em condições de céu claro. O volume diário de água, calculado como a soma dos valores instantâneos da vazão ao longo de um determinado dia, obtido através do mesmo procedimento, também corresponde a um volume bombeado em condições de céu claro.

Para mostrar que a relação entre vazão e potência CC fornecida independe do gerador FV utilizado são apresentadas na Fig. 6 as curvas ( $\dot{V}$  vs.  $P_{CC}$ ) para as configurações (C1), (C3) e (C5) (todas com  $H=40m$ ), cujos geradores fotovoltaicos são formados por 8 módulos de 50 Wp, 55 Wp e 75 Wp respectivamente.

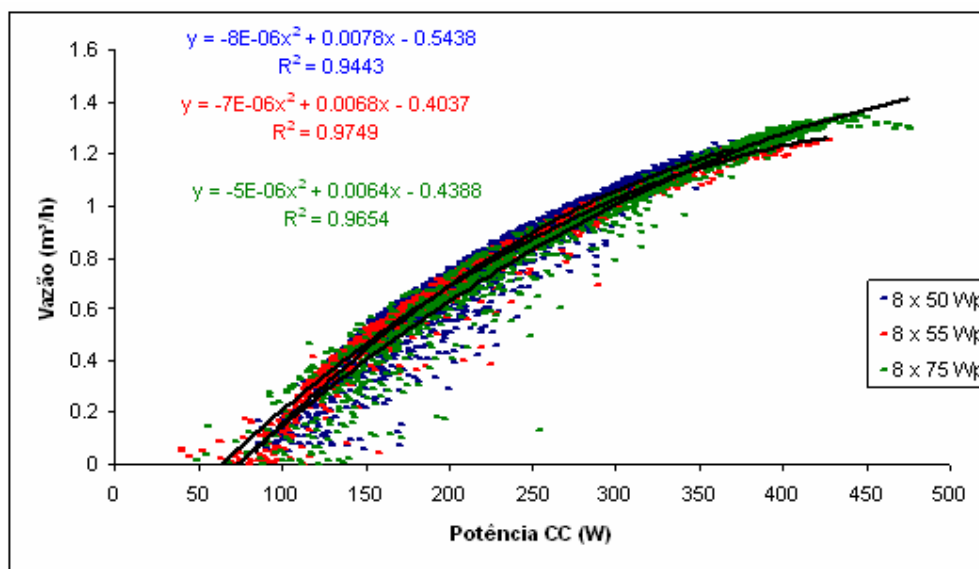


Figura 6 - Relação entre vazão e potência CC para as configurações (C1) – 8x50Wp, (C3) – 8x 55Wp e (C5) -8x75Wp.

Verifica-se na Fig. 6 que as curvas obtidas com as três configurações de painel apresentam comportamentos similares. As curvas de regressão de cada configuração foram utilizadas para calcular os valores instantâneos de vazão a partir dos dados de potência CC experimentais. Posteriormente os valores de volume de água bombeada para cada dia de medição foram obtidos. Calculando-se a média diária do volume de água bombeado experimentalmente e comparando-se com os valores obtidos através das curvas de regressão de cada configuração verificou-se que os desvios

relativos são inferiores a 4,1% (1% para a curva de 8 x 50Wp, 0,1% para a curva de 8 x 55Wp e 4,1% para a curva de 8x75Wp).

Uma verificação de que a relação entre potência CC e irradiância independe da altura de recalque é mostrada na Fig. 7 onde são dispostos os resultados de experimentos realizados com a configuração (C1) e a configuração extra (CE). Ambas apresentam o mesmo gerador (8 x 50Wp), entretanto, as motobombas e as alturas de recalque são diferentes (30m para CE e 40m para C1).

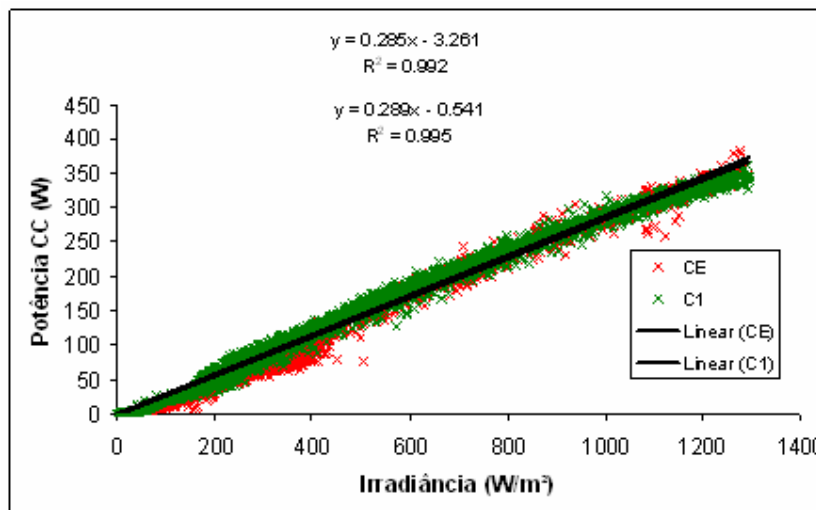


Figura 7 - Relação entre potência CC e irradiância para as configurações (C1) – 8x50Wp, para altura manométrica de 40m, e (CE) – 8x50Wp, para altura manométrica de 30m

Pode-se observar na Fig. 7 que ambas as configurações apresentam resultados bastante similares, e que as retas ajustadas por regressão são praticamente indistinguíveis na figura..

## 5. CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTIMATIVA DE VOLUME BOMBEADO A LONGO PRAZO

O procedimento descrito neste trabalho permite obter as curvas características de diferentes configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico. Para calcular o volume de água bombeado ao longo de vários dias pode-se aplicar as curvas geradas a valores de irradiância medidos e somar as vazões ao longo dos dias. Esse procedimento, entretanto, fornece o volume de água bombeada por sistemas operando sob determinadas condições de ensaios. Para realizar previsões do comportamento a longo-prazo desses sistemas é necessário considerar as características estatísticas da radiação solar local. Para isso, médias a longo prazo podem ser obtidas executando integrais ao longo do domínio da radiação solar.

Nos casos mais comuns em que longas séries de dados de radiação solar diária não se encontram disponíveis séries temporais de radiação solar diária podem ser geradas através de procedimentos estocásticos utilizando-se Matrizes de Markov (Aguilar et al., 1993). Outro procedimento que pode ser aplicado nesses casos emprega o conceito de utilizabilidade (Fraidenaich et al., 2000). Fraidenaich et al. apresentam uma equação para o cálculo do volume de água bombeado que foi desenvolvida baseada na relação que existe entre a distribuição de probabilidade de níveis de radiação e a função Utilizabilidade.

## 6. COMENTÁRIOS FINAIS

As metodologias normalmente empregadas para levantamento de características de sistemas fotovoltaicos de bombeamento d'água requerem ensaios em campo de longa duração para cada configuração de sistema a ser estudada. O procedimento proposto permite obter as curvas características das configurações apresentadas na Tab. 1 em cerca de 9 dias, considerando-se 3 dias de ensaio para cada configuração de gerador e cerca de 1 hora para os ensaios com a fonte. Esse mesmo trabalho demandaria em princípio 18 dias de medições. Na prática, os ensaios com módulos fotovoltaicos costumam demandar bem mais tempo, pois dependem de condições climáticas favoráveis, além de outros fatores como disponibilidade de pessoal e de equipamentos durante este longo período.

Curvas características vazão x potência CC podem ser traçadas facilmente com auxílio de uma fonte de alimentação ajustada de forma apropriada, e estes dados podem ser aproximados por uma curva de regressão para cada modelo de motobomba e cada altura manométrica de operação.

Aplicando-se as curvas de regressão (curvas características) a valores medidos de irradiância é possível obter os valores máximos de produção diária de água dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento com um grau de precisão aceitável.

#### 4. REFERÊNCIAS

Aguiar R. J., Collares Pereira M. and Conde J. P. (1988). Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Solar Energy*, Vol. 40, 269-279.

Brito, A. U., Fedrizzi, M. C., Zilles, R. (2007). PV pumping systems: An useful tool to check operational performance. *Progress in Photovoltaics*, 15, 41-49.

Fraidenraich N., e Vilela O.C., (2000). Performance of solar systems with non linear behavior calculated by the utilizability method. application to PV solar pumps. *Solar Energy*, Vol. 67, pp. 131-137

Vilela O. C.; Fraidenraich N., (2001). A methodology for the design of photovoltaic water supply systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 9, pp 349-361.

### **METHODOLOGY FOR ASSESSMENT OF CHARACTERISTICS OF PV WATER PUMPING SYSTEMS USING A DC POWER SUPPLY**

**Abstract.** *This article describes a methodology which was used to reduce the time required to perform experimental assessment of characteristic curves (flowrate vs. solar irradiance) of PV water pumping systems showing different configurations. The characteristic curves are proposed to be obtained from two other types of curves: flowrate vs. DC power – measured using a DC power supply adjusted to simulate the operation of the PV panel in the system, and DC power vs. solar irradiance – obtained through outdoors measurements using PV panels. It is demonstrated how is possible to reduce the number of days of outdoor measurements necessary for obtaining these curves when the systems under test show configurations using the same pumping heights or the same PV panels. The flowrates, thus also the daily pumped volumes, calculated using the curves obtained through this methodology are considered the upper limits of system performance.*

**Keywords:** *PV water pumping systems, PV systems, solar energy, rural electrification*