

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUENCIA CONVENCIONAIS EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Tito Ângelo L. Cruz – tito.cruz@ufpe.br

Olga de Castro Vilela - ocv@ufpe.br

Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU, CEP 50.740-540, Recife, Pernambuco, Brasil
Phone: +55 81 3453 6019, Fax: +55 81 32718250

3.5 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

Resumo – Este trabalho apresenta uma análise experimental da operação de sistemas de bombeamento fotovoltaico (BFV) com interface de conversores de frequência, entre gerador fotovoltaico (FV) e conjunto motor bomba. Para tanto, é necessário conhecer o funcionamento dos componentes do SBFV e dos acoplamentos entre eles. Assim, através de procedimentos experimentais, foi realizado um levantamento das características operacionais do sistema instalado com diferentes configurações. Devido a suas características elétricas, os sistemas de bombeamento FV, fabricados para serem utilizados exclusivamente com energia solar, requerem níveis de tensão de alimentação menores que as tensões de 220 V ou 380 V, com que os sistemas alimentados pela rede elétrica convencional, operam. Considerando-se a mesma potência de gerador para acionar sistemas BFV especialmente desenvolvidos e sistemas que utilizam CF convencionais, os arranjos de módulos (série-paralelo) são diferentes devido às diferentes exigências dos sistemas em relação à tensão mínima à entrada. A melhor tensão fixa de operação do sistema operando com CF é obtida considerando-se, primeiramente a melhor condição de operação do gerador e, em seguida, o volume de água bombeado a longo prazo. Os resultados obtidos mostram que somente a consideração do gerador não é suficiente para obter a melhor tensão fixa de operação do sistema. Verifica-se que a motobomba solar acionada, seja por um conversor de frequência com tensão de operação fixa, seja com inversor que segue o ponto de máxima potência (PMP), tem desempenho semelhante, desde que o conversor de frequência opere em um valor de tensão fixa adequado.

1. INTRODUÇÃO

Uma das aplicações mais atrativas dos sistemas fotovoltaicos (FV) em locais afastados da rede elétrica convencional é o bombeamento de água. Atualmente, há um significativo crescimento do interesse na aplicação de sistemas de bombeamento fotovoltaico (SBFV) para fins de abastecimento de água e irrigação. Essas aplicações são interessantes, particularmente, nas regiões rurais do semi-árido, onde a atividade econômica sofre com a escassez de recursos hídricos superficiais e de energia elétrica convencional, e onde a irradiância solar incidente é muito alta, tornando-se, assim, numa fonte de energia ideal a ser utilizada para bombear água do subsolo.

Normalmente, nessas aplicações, são utilizados motobombas e inversores desenvolvidos especialmente para a aplicação fotovoltaica. Entre os sistemas difundidos no mercado internacional alguns apresentam motobombas centrífugas de rendimento elevado e inversores com controle para operar o gerador FV em seu ponto de máxima potência (PMP). Os motores trifásicos, especialmente desenvolvidos, operam em uma tensão cerca de quatro vezes menor que a tensão da rede conven-

cional. Trata-se de equipamentos especiais, importados, vendidos em forma conjunta como um pacote tecnológico com preços conseqüentemente elevados.

Logo, a substituição de inversores especiais usados em SBFV's por equipamentos conhecidos no mercado como conversores de frequência (CF's) constitui numa alternativa para diminuir os custos de tais sistemas. Isto porque esses equipamentos são fabricados em grande escala, encontrados em uma boa diversidade de modelos no mercado em larga faixa de potência (0,74 – 400 kVA) e com funções que permitem adaptá-los para seu uso em sistemas de bombeamento fotovoltaico (Melo, 2004). Assim, também é possível substituir as motobombas especiais por motobombas convencionais, visto que a operação das mesmas é compatível com conversores convencionais, desenvolvidos, dentre outros aspectos, para controlar a velocidade de motores elétricos utilizando a rede elétrica convencional como fonte de alimentação.

Essa substituição, entretanto, prescinde de uma análise detalhada do funcionamento desses sistemas. O objetivo deste trabalho é analisar a performance de sistemas de bombeamento FV com CF e moto-bombas convencionais sob diferentes condições de operação (tensão do gerador) e comparar esse sistema com aqueles desenvolvidos especialmente para a aplicação fotovoltaica.

Para tanto, foi instalado no nosso laboratório um sistema experimental com um arranjo fotovoltaico acoplado a diferentes configurações de sistema de bombeamento, bem como a instrumentação necessária para viabilizar a coleta de dados experimentais.

2. METODOLOGIA

2.1 Descrição experimental dos sistemas estudados

Três configurações de sistemas de bombeamento FV foram analisadas para fins comparativos. São elas:

- A) Sistema Especial - conta com um arranjo fotovoltaico de 18 módulos monocristalinos de 53Wp cada, configurados em três arranjos em paralelo de 6 módulos em série cada; conversor de frequência especial (fotovoltaico) com seguimento de máxima potência; uma moto-bomba submersa (fotovoltaica) com motor CA assíncrono, trifásico (65 V), bomba centrífuga de 10 estágios.
- B) Sistema Convencional - conta com um arranjo fotovoltaico de 18 módulos monocristalinos de 53Wp arranjados em série; conversor de frequência convencional; motobomba submersa convencional com motor assíncrono, trifásico, (220V) e bomba centrífuga de 9 estágios.
- C) Sistema Alternativo - conta com um arranjo fotovoltaico de 18 módulos monocristalinos de 53Wp arranjados em série; conversor de frequência convencional; motobomba submersa (fotovoltaica) com motor CA assíncrono, trifásico (65 V), bomba centrífuga de 10 estágios.

Os ensaios das configurações (A) e (C) permitem comparar a performance do conversor especial (importado) com o conversor convencional (de mercado) já que ambos alimentam a mesma moto-bomba (fotovoltaica). As configurações (B) e (C) permitem comparar a performance das motobombas convencional (de mercado) e fotovoltaica (importada).

Em virtude das diferentes características elétricas do conversor convencional e do conversor especial, é necessário associar os módulos em série ou paralelo, para produzir, respectivamente, tensões ou correntes de intensidades adequadas às aplicações elétricas.

A conexão elétrica entre o gerador FV e o conversor especial (caso A) requer de uma tensão à entrada de $(100V \pm 15) V_{CC}$. Esta tensão de operação, (tensão V_{CC} à entrada), após ser convertida em tensão alternada, fornece, em cada fase, uma tensão V_{CA} cujo valor de pico é igual a $(V_{CC}/\sqrt{2})$. Um arranjo fotovoltaico com 6 módulos em série (3 conjuntos em paralelo) fornece uma tensão máxima em torno de 100V (considerando 17V para cada módulo aproximadamente) disponibilizando, em cada fase, uma tensão de pico em torno de $70V_{CA}$ que é suficiente para alimentar motores

desenvolvidos especialmente para operar com energia fotovoltaica (tensão nominal igual a $65V_{CA}$) (Configuração A).

O conversor de frequência convencional é projetado para operar com a tensão de $220 V_{CA}$ ($\pm 10\%$) da rede elétrica, que, após retificada torna-se $310 V_{CC}$ ($220 \times \sqrt{2}$). Desta forma, é possível conectar diretamente ao barramento CC do conversor, uma tensão CC gerada pelo arranjo FV. À saída, o conversor de frequência pode fornecer, em cada fase, a tensão de $220 V_{CA}$ requerida por uma motobomba convencional (caso B). Uma característica limitante do CF convencional é o fato de operar a uma tensão CC à entrada compreendida no intervalo 265 a $310V_{CC}$. Essa faixa de tensão de operação imprime forte restrição à configuração do gerador FV mesmo quando o CF convencional é utilizado para operar uma motobomba de menor tensão ($65V_{CA}$) (caso C). Desta maneira o gerador FV, contará com 18 módulos conectados em série tanto para a configuração (B) quanto para a (C).

A tabela 1 resume as diferentes características das configurações propostas.

Tabela 1. Características básicas das configurações estudadas.

	Configuração A	Configuração B	Configuração C
GERADOR FV Módulos de 53Wp	3 blocos em paralelo de 6 módulos em série	18 módulos em série	18 módulos em série
CONVERSOR DE FREQUENCIA	Especial operando em PMP do gerador	Convencional operando em tensão fixa	Convencional operando em tensão fixa
MOTOR – VALORES NOMINAIS DE POTÊNCIA/TENSÃO	Especial 560W / 65 VCC	Convencional 560W / 220VCC	Especial 560W / 65VCC
BOMBA – NÚMERO DE ESTÁGIOS	Especial 10 estágios	Convencional 9 estágios	Especial 10 estágios

O conversor de frequência convencional utilizado (MICROMASTER – SIEMENS) possui características de controle apropriadas para estabelecer uma tensão fixa à entrada – tensão de operação do gerador FV.

A carga adotada para estes experimentos é constituída de (02) tubulações de PVC (duas polegadas) com diferentes alturas de recalque (32m, 42m), montadas em uma torre na área de testes do Grupo FAE (Grupo de pesquisas em Fontes Alternativas de Energia / UFPE). A água circula em um circuito fechado retornando à cisterna através de uma tubulação de 2,5". A escolha da altura de recalque desejada também é feita através de registros manuais. A altura de recalque fica muito bem definida pela configuração física do sistema, e permanece praticamente invariável, salvo pequenas perdas de carga, durante os ensaios.

2.2 Obtenção da melhor tensão fixa do sistema

Para a obtenção da melhor tensão fixa de operação do sistema, com conversor de frequência (casos B e C), primeiramente foi analisada a melhor tensão fixa de operação do gerador fotovoltaico para as condições climáticas locais (Recife-PE). Foram considerados valores de tensão compreendidos no intervalo aceitável de operação do conversor de frequência.

Para tal, foram levantadas, experimentalmente, as curvas características do gerador para a configuração de 18 módulos conectados em série. As medidas realizadas foram:

- irradiância solar incidente no plano dos geradores;
- tensão e corrente na saída dos módulos;
- temperatura do gerador;

- temperatura ambiente.

Para obter as medidas de tensão e corrente, necessárias para traçar as curvas características, uma carga discreta foi conectada na saída do painel FV. Esta carga é constituída por um conjunto de resistores de potência que podem ser associados de várias maneiras permitindo varrer a curva característica em vários pontos.

Posteriormente, foram obtidas experimentalmente, as curvas características dos sistemas de bombeamento operando com o CF para as diferentes tensões fixas. Com o auxílio das curvas características, foi calculado o volume de água bombeado a longo prazo para cada tensão de operação. Uma comparação entre os volumes produzidos fornece a melhor tensão fixa de operação do sistema integrado: Gerador-conversor-motor-bomba.

2.3 Cálculo do volume de água bombeado a longo prazo.

O procedimento de utilizabilidade foi utilizado para calcular os volumes médios diários de água, bombeados a longo prazo para todas as configurações estudadas.

Esse método simula o desempenho a longo prazo do SBFV utilizando como ferramenta fundamental a curva característica do sistema definida pela relação existente entre a vazão d'água bombeada e a irradiância solar coletada (I_{col}). As curvas características são obtidas experimentalmente mediante a medição "instantânea" dessas grandezas. No caso de sistemas de bombeamento que utilizam bombas centrífugas, a curva característica pode ser aproximada por uma expressão quadrática. Um importante parâmetro definido pela curva característica do sistema é o nível crítico de irradiância solar " I_C ", menor valor de radiação solar coletada necessário para dar início ao processo de bombeamento.

Se a vazão bombeada por um sistema de bombeamento fotovoltaico relaciona-se com a irradiância solar coletada, de forma quadrática, o volume médio de água bombeado, pode ser estimado pela expressão (Fraidenraich e Vilela, 2001):

$$\bar{V} = \dot{V}_0 \bar{H}_{col} \Phi(X_C) \left(1 - \frac{2}{X_M - X_C} \frac{X_{col,max} - X_C}{X_{col,max} + 1} \right) \quad (1)$$

onde:

$\dot{V}_0$, em (m³/h), é uma constante que depende da curva característica do sistema de bombeamento;

$\bar{H}_{col}$, em (Wh/m²), é o valor diário (média mensal) da energia solar coletada, por unidade de área, determinada através do procedimento de Collares-Pereira & Rabl (1979);

$\Phi(X_C)$, (adimensional), é a função utilizabilidade para $X = X_C$ (Zarmi, 1987) determinada pela expressão:

$$\Phi(X_C) = \left(1 - \frac{X_C}{X_{col,max}} \right)^{X_{col,max}} \quad (2)$$

$X_C = \frac{I_C}{I_{col}}$ e $X_M = \frac{I_M}{I_{col}}$, são grandezas adimensionais;

I_C , é o nível crítico de radiação solar necessário para dar início ao processo de bombeamento;

$\bar{I}_{col}$, é o valor diário (média mensal) da radiação solar coletada pelo gerador fotovoltaico;

$I_{col,max} = 0,864 \times I_{0eff,col}$, é a máxima radiação solar coletada;

$I_{0eff,col}$, é a radiação solar extraterrestre, ao meio dia solar local. O coeficiente (0,864) é o máximo valor para o índice de claridade horário, como recomendado por Hollands e Huget (1982).

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Obtenção da melhor tensão fixa de operação

Devido à grande variabilidade da irradiância solar em Recife, não foi possível obter todos os pontos da curva do gerador para um valor constante de irradiância. Dessa forma, as curvas características foram traçadas para diferentes condições, filtrando-se os dados em faixas curtas de irradiância. Após a coleta de dados foram obtidas curvas de regressão utilizando o método de Lorentz. A figura 1 mostra as curvas características que foram obtidas seguindo o procedimento descrito na seção 2.2 e o seguimento do ponto de máxima potência (PMP), considerando a temperatura real dos módulos.

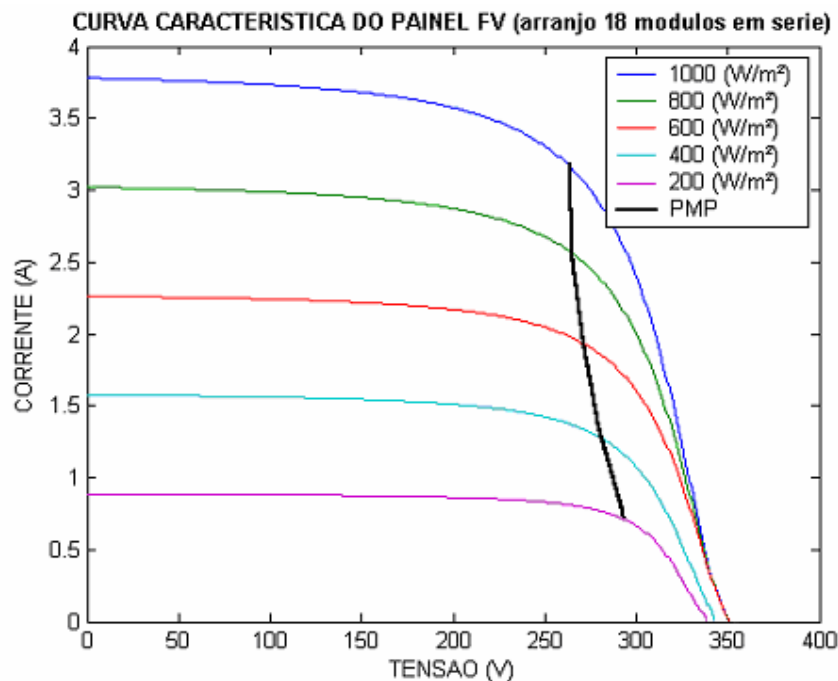


Figura 1 – Curva característica do painel arranjado para ligar o SBFV convencional.

A tabela 2 apresenta o desempenho do painel FV operando em seu PMP e em três tensões fixas experimentadas. Os rendimentos do gerador são mostrados.

Tabela 2 . Desempenho do painel FV operando no PMP e em diferentes tensões fixas.

Icol (W/m ²)	RENDIMENTO			
	PMP	270V	285V	300V
1000	0,106	0,106	0,102	0,094
800	0,109	0,108	0,106	0,097
600	0,113	0,113	0,111	0,105
400	0,117	0,117	0,117	0,112
200	0,149	0,135	0,139	0,139

Os resultados mostram que para a maior parte dos valores de irradiância medidos a melhor eficiência do gerador foi obtida para uma tensão fixa de operação de 270V. Já para 200W/m² de irradiância as tensões de 285V e 300V apresentam melhores eficiências. É importante notar que estes resultados se dão porque foram consideradas as temperaturas reais dos módulos e, deste modo, as tensões de circuito aberto V_{OC} estão muito próximas em todos os valores de irradiância.

Por outro lado, o conversor requer do gerador uma potência mínima para poder operar o sistema de bombeamento, que implica, em um sistema operando a tensão fixa, em uma corrente mínima. Para analisar esse aspecto foram realizados ensaios do SBFV com o conversor programado pra fazer o gerador FV operar nas três tensões fixas com o objetivo de definir a melhor tensão fixa de operação para o conjunto.

A Figura 2 mostra a variação da tensão de operação do gerador (conectado ao conversor de frequência) com a irradiância solar. É possível observar que, para valores baixos de irradiância, a operação em 270V apresenta mais instabilidade do que em 285V.

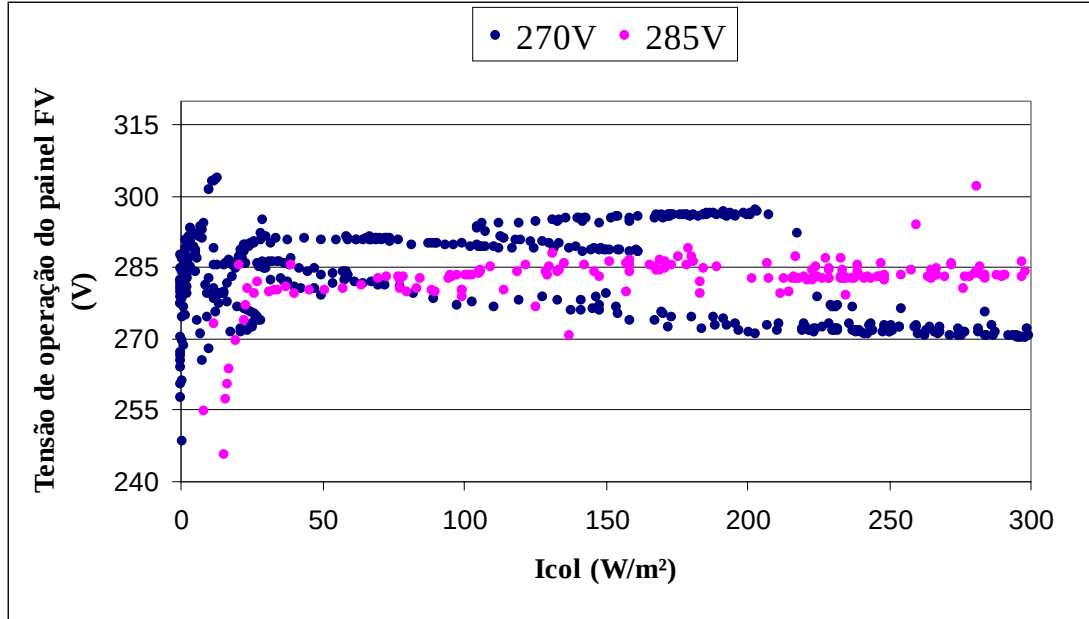


Figura 2 – Região de estabilização do acoplamento gerador-conversor do SBFV operando em tensão fixa.

Isto ocorre porque, quando o sistema é ligado (momentos em que a irradiância crítica é atingida) o conversor “obriga” o painel a operar na tensão fixa escolhida. Assim, quando existem muitas variações em torno da irradiância crítica (que não são raras) ocorre um retardo maior na estabilização da tensão para 270V do que para 285V, o que influencia no desempenho do sistema.

3.2 Curva característica experimental do sistema

Após a realização de ensaios experimentais do SBFV operando nas configurações A, B e C descritas na seção 2.1 foram obtidas as curvas características representadas na Fig. 1. As alturas de recalque utilizadas nos ensaios foram 32m e 42m. As curvas apresentadas na figura 3 correspondem a uma tensão fixa de 285V.

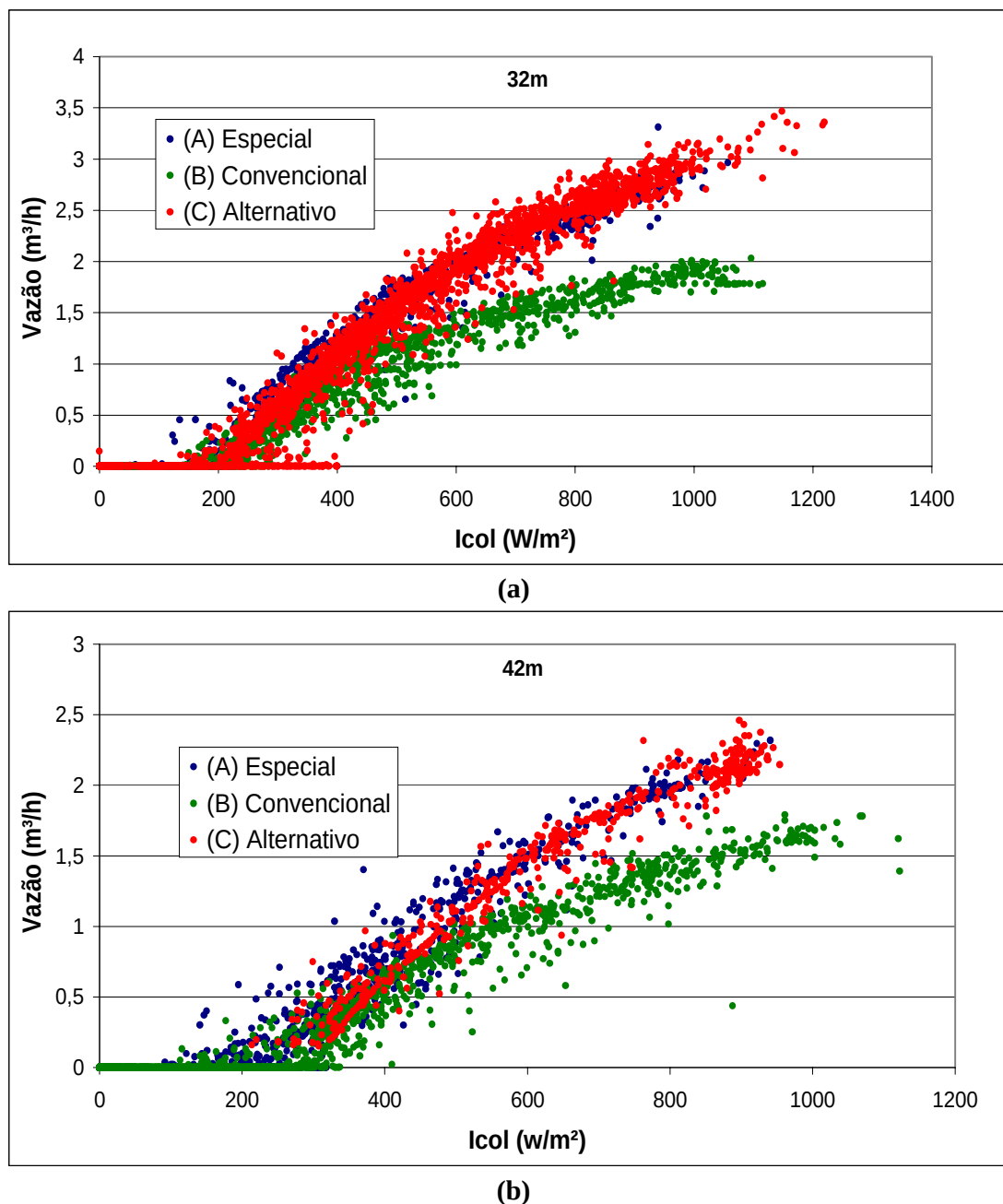


Figura 3 – Curvas características das configurações A, B e C do SBFV operando em tensão fixa de 285V. Alturas de recalque: (a) 32m, (b) 42m.

Comparando-se a curva característica da configuração A com a curva da configuração C, percebe-se uma sobreposição entre elas. Isto sugere que o conversor convencional tem um desempenho semelhante ao do inversor especial no controle do sistema, uma vez que em ambas as configurações

a motobomba é a mesma. Já a comparação entre as configurações B e C sugere que a motobomba convencional apresenta um desempenho inferior ao da especial. Entretanto, uma comparação entre as motobombas utilizadas foi realizada, tomando como o valor de frequência de 50Hz. Essa análise mostrou que todas as configurações apresentam níveis críticos bastante próximos.

3.3 Volume de água bombeado a longo prazo

Ao submeter os dados experimentais ao método de utilizabilidade obtêm-se que o sistema de bombeamento FV com CF apresenta o melhor desempenho, a longo prazo, à tensão fixa de 285V, embora que, para o gerador, a melhor tensão fixa esteja em torno de 270V. A Fig. 4 mostra os resultados de volume de água bombeado ao longo do ano para uma altura manométrica de 32m e diferentes tensões fixas e para o sistema especial (Configuração A).

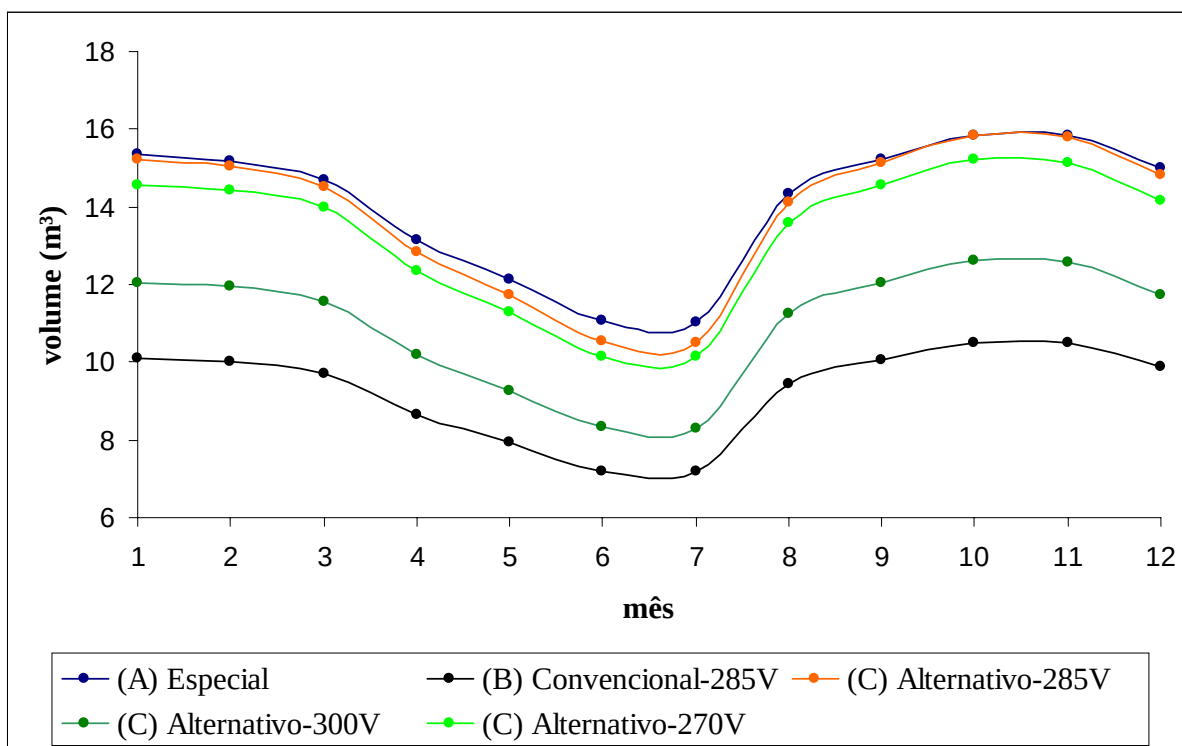


Figura 4 – Comparação do volume de água bombeado a longo prazo pelo SBFV em suas diversas configurações.

As diferenças percentuais no volume de água bombeado (V_B) durante o ano das demais configurações em relação à configuração especial são: 34% para a configuração CONVENCIONAL; 22% para tensão fixa de 300V; 2% para 285V e 5% para 270V, estas três últimas na configuração ALTERNATIVA. A tensão de 285V apresenta o menor déficit de água bombeada em relação ao sistema especial, tanto nos valores mensais quanto no valor total anual de V_B . No período de inverno, entre os meses de abril e agosto o déficit de V_B é maior, pois têm-se menos irradiância coletada, ou seja, o sistema opera na região crítica (Fig. 3) por mais tempo.

Assim podemos concluir que conversores de frequência convencionais podem operar SBFV's com rendimento próximo dos equipamentos especiais. Com também conclui-se que a melhor tensão fixa para a operação de tais sistemas deve levar em consideração o volume de água bombeado a longo prazo, pois este valor pode diferir do valor para a tensão fixa que resulta no maior rendimento do gerador FV.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS

- Hollands, K. G. T.; & Huget, R.G., A probability density function for the clearness index with applications. *Solar Energy*, 30: 235-253, 1982.
- Melo, R. O., Condicionamento de Potência de uma Moto-bomba em um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico Através de um Conversor de Frequência. (Mestrado – Departamento de Energia Nuclear / UFPE) 2004.
- Pereira, M.C.; Rabl, A. Simple Procedure for Predicting Long Term Average Performance of Non-concentrating and of Concentrating Solar Collectors. *Solar Energy*. 1979. 23: 235-253.
- Rauschenback, H. S. *Solar cell Array Design Handbook*. New York - USA, Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- Vilela, O. C. ; Fraidenraich, Naum . A Methodology for the design of PV water supply systems. *Progress In Photovoltaics*, Inglaterra, v. 9, p. 349-361, 2001.
- Zarmi, Y. Fluctuations in Long-Term Performance of Solar Devices: The Single Pass, Open-Loop Hot Water System Exemple. *Solar Energy*. 1987. 38: 323-326.

EXPERIMENTAL STUDY OF CONVENTIONAL FREQUENCY CONVERTERS USED IN PV PUMPING SYSTEMS

Abstract. *In this work we present an experimental analysis of the operation of photovoltaic pumping systems (PVPS) with interface of frequency converters (FC), between photovoltaic generator (PV) and motor-pump group. For this purpose, it is necessary to know the operation of the components of PVPS and their coupling. The operational characteristics of the systems installed with different configurations is obtained using experimental tests. Due to its particular electric characteristics, the PV pumping systems, manufactured to be used exclusively with solar energy, request levels of panel voltage smaller than the 220 V or 380 V, used to supply systems with the conventional electric net. Considering the same power to drive PVP systems especially developed and systems that use conventional FC, the array configurations (series-parallel) are different due to the different system's demands in relation to the minimum voltage at the entrance. To obtain the best fixed voltage of the system operating with FC we consider, at first the best condition of operation of the generator and, soon after, water volume pumped in the long term. The results obtained show that considering only the generator behaviour is not enough to obtain the best system's operation fixed voltage. It is verified that the motor-pump, operating for a frequency converter with the voltage fixed or with the special inverter, that follows the maximum power point (MPP), has a similar performance, since the frequency converter operates in a appropriate fixed voltage .*

Key words: Frequency Converter, Experimental Performance, Pumping Systems