

EFICIÊNCIA DE UM CONJUNTO FOTOVOLTAICO EM CONDIÇÕES REAIS DE TRABALHO

Estor Gnoatto – estor@md.cefetpr.br

Yuri Ferruzzi – yuri.ferruzzi@uol.com.br

Fundação Assis Gurgacz, Departamento de Engenharia

Edward Kavanagh – kavanagh@md.cefetpr.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação de Eletromecânica

Angelo A. Gnoatto – angeloaurelio270@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação de Eletromecânica

3.5 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

Resumo. No presente trabalho foi desenvolvido um estudo sobre um sistema fotovoltaico autônomo, com armazenamento de energia, instalado na Estação Experimental Agrometeorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, a uma latitude 24°59' Sul, longitude de 53°26' Oeste com altitude de 682 metros, sob condições reais de campo, durante todo o ano de 2002. Foi avaliada a eficiência dos painéis fotovoltaicos sob condições reais de campo, sua curva característica foi determinada, utilizando na aquisição de dados um "micrologger" da Campbell Scientific Inc., modelo CR10X, programado para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média aritmética de cinco minutos dos dados das componentes de radiação solar global no plano horizontal e global na incidência do painel; temperatura ambiente e temperatura de operação do painel; tensão e corrente do sistema fotovoltaico. Pode-se observar que a eficiência média mensal registrou valores na faixa de 8,65% a 9,17%, com uma média de 8,84%, com variação percentual entre o índice máximo e mínimo de 5,67%. Podendo assim, representar um fornecimento médio mensal de energia de 5,57 kWh por painel.

Palavras-chave: Energia Solar, Painel Fotovoltaico, Irradiação Solar

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é a fonte de energia mais antiga disponível na Terra. Trata-se de uma fonte não poluente e praticamente inesgotável, sendo a que propicia o desenvolvimento de todos os ecossistemas do planeta; fato que leva atualmente à investigação de métodos para otimizar o seu aproveitamento. A energia solar vem sendo utilizada desde há muito, tanto na cidade, em geral para aquecimento de água, como no meio rural, para a secagem de produtos agrícolas, geração de energia elétrica, etc. Devido às características difusas da energia solar, seu aproveitamento deve ser feito no local, ou seja, o painel solar deve estar situado o mais próximo possível do consumidor, seja para a geração da energia elétrica necessária a uma residência, seja para a secagem de produtos em pequenas comunidades agrícolas. Já é de conhecimento geral que o rendimento de um sistema fotovoltaico é pequeno, por isso faz-se necessário um estudo dirigido e aplicado sobre a utilização de sistemas fotovoltaicos. O painel fotovoltaico (PV) é uma fonte de energia não linear, sendo que, a corrente e a tensão fornecida dependem da intensidade da radiação solar e da temperatura.

A radiação solar é a fonte de energia responsável e necessária ao desenvolvimento de todos os ciclos da natureza, entretanto seu aproveitamento sempre foi limitado. Inicialmente a idéia do aproveitamento desse recurso surgiu com as teorias de termodinâmica com o aquecimento de líquidos ou gases e, posteriormente, com os estudos sobre o efeito fotoelétrico.

A demanda energética do planeta continua crescendo, mas a reprodução dos cenários energéticos atualmente em uso, serão provavelmente inviáveis, face à grande dificuldade de sobrepor os efeitos negativos associados com o progressivo aumento do uso de energias convencionais. Entre as opções vislumbradas para o suprimento futuro, a energia solar encontra-se numa situação favorável por ser abundante, previsível, não poluente e dispersa, o que dá flexibilidade para se utilizar em locais em que concorram muito pouco com fontes convencionais.

O aproveitamento racional da energia solar no sentido de produzir instalações bem dimensionadas e economicamente viáveis são possíveis a partir de informações do comportamento da radiação solar. Diante disto a utilização da energia solar tende a evoluir e agregar-se aos sistemas convencionais.

Para que a energia solar fotovoltaica seja melhor avaliada, ainda são necessários diversos estudos, em destaque a avaliação das características elétricas em condições reais de trabalho para um conjunto de módulos fotovoltaicos.

As características elétricas dos módulos são geralmente estimadas de acordo com sua potência máxima de saída, sob condições de teste padrão (STC - Standard Test Conditions), irradiação solar de 1000 W.m^{-2} , temperatura da célula de 25°C e distribuição espectral $\text{AM} = 1,5$. Como essa temperatura raramente é atingida em condições reais de operação, em dias de sol claro é tipicamente de 20 a 40°C maior que a ambiente. Para complementar as informações do desempenho elétrico em STC, alguns fabricantes informam também suas características à temperatura nominal de operação da célula (NOTC - Nominal Operation Cell Temperature), definida com condições nominais de operação em um nível de irradiação na superfície do módulo de 800 W.m^{-2} , temperatura ambiente de 20°C , distribuição espectral $\text{AM} = 1,5$ e velocidade do vento de 1 m/s . (CEPEL, 1999; OVERSTRAETEN & MERTENS, 1996).

Com um estudo de sistemas deste tipo, em condições reais de operação pode-se obter subsídios para um dimensionamento otimizado de sistemas fotovoltaicos a serem instalados futuramente na Região Oeste do Paraná.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada na Estação Experimental Agrometeorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, a uma latitude $24^{\circ}59'$ Sul, longitude de $53^{\circ}26'$ Oeste e altitude de 682 m , no período de 1° de janeiro a 31 de dezembro de 2002. Foi montado um sistema fotovoltaico isolado (stand-alone), com sistema de armazenamento de energia, composto de dois painéis fotovoltaicos, marca *Solarex*, modelo MSX-56, tensão padrão 12 V , corrente padrão $3,35 \text{ A}$, potência 56 W ; duas baterias recarregáveis estacionárias de chumbo-cálcio, marca *Concorde*, modelo PVX-1285 (85 Ah-12 V); controlador de carga e descarga do sistema de armazenamento, marca *Morningstar Prostar 30* (30 A).

Os painéis fotovoltaicos foram ligados em paralelo, com os módulos operando a uma tensão regulada mantida pelo controlador de carga e descarga que alimenta o banco de baterias (ligadas em paralelo) e a carga. A carga é representada por uma resistência fixa que é acionada através de um controlador de horário digital, para intervalos de tempo pré-definidos, de tal modo que toda a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos é armazenada no banco de baterias ou utilizada pela carga. Foram instalados 10 módulos fotovoltaicos com a face voltada para o norte geográfico, a uma altura de 1 metro do solo (parte mais baixa do conjunto) com ângulo de inclinação igual à latitude local, mas apenas dois (Painel 1 e Painel 2) foram avaliados, como mostra a Figura 1. Cada um dos dois painéis fotovoltaicos avaliados, é composto por 36 células de silício policristalino conectadas em série, podendo fornecer até $112,2 \text{ W}$ em condições STC (*Standard Test Conditions*).



Figura 1 - Vista parcial da Estação Experimental Agrometeorológica indicando os dois painéis avaliados.

A Tabela 1 mostra os dados das características elétricas dos painéis utilizados e os dados calculados da eficiência para condições STC (irradiância 1000 W.m^{-2} , temperatura de célula 25°C e espectro $\text{AM}=1,5$), apresentando as características elétricas fornecidas pelo fabricante para o modelo com os dados sendo obtidos em laboratório através de um simulador solar e representam seu desempenho para ligação da configuração em 12 V, não incluindo perdas adicionais tais como diodos de bloqueio e fiação; podendo também apresentar características diferentes sob incidência de irradiação solar (Solarex).

Tabela 1 - Características elétricas dos painéis fotovoltaicos em condições STC.

DADOS DO PAINEL	Painel 1	Painel 2
Corrente de curto circuito I_{sc} (A)	3,73	3,62
Tensão de circuito aberto V_{oc} (V)	20,9	21,1
Tensão máxima de pico V_{mp} (V)	16,7	16,9
Corrente máxima de pico I_{mp} (A)	3,39	3,28
Potência máxima de pico (W)	56,8	55,4
Eficiência do painel (%)	*12,58	*12,27
Temperatura do painel ($^{\circ}\text{C}$)	25	25

* Dados calculados de acordo com dados de placa do painel.

O sistema de aquisição de dados é constituído por um "micrologger" da *Campbell Scientific, Inc.*, modelo CR10X, programado para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média aritmética de cinco minutos dos dados das componentes de radiação global no plano horizontal e global na incidência do painel; temperatura de operação do painel; tensão e corrente do sistema fotovoltaico. Os dados de temperatura do painel são obtidos por termopar do tipo K localizados na parte de trás do painel fotovoltaico.

A eficiência do módulo fotovoltaico é definida pelo quociente entre a potência gerada pelo módulo e a irradiação incidente sobre o módulo. Segundo OVERSTRAETEN e MERTENS (1996) e TREBLE (1980), a eficiência do módulo pode ser obtida pela Equação (1).

$$\eta = \frac{(I_{mp} \times V_{mp})}{(I_c \times A)} \times 100 \quad (1)$$

Em que I_c é a irradiância solar (W.m^{-2}), A é a área útil do módulo (m^2), I_{mp} é a corrente máxima de pico (A) e V_{mp} é a tensão máxima de pico (V).

De acordo com CARDONA e LÓPEZ (1999), a eficiência de um conjunto fotovoltaico em um sistema de geração de energia elétrica pode ser obtida pelo quociente entre toda energia diária produzida, $E_{pv,d}$ (W.m^{-2}), e a irradiação diária na superfície do conjunto fotovoltaico, $E_{r,d}$ (W.m^{-2}). O rendimento diário do conjunto fotovoltaico é representado pela Equação (2).

$$\eta_{pvd} = \frac{E_{pv,d}}{E_{r,d}} \quad (2)$$

A média mensal do rendimento diário é obtida por:

$$\eta = \frac{\sum \eta_{pvd}}{D} \quad (3)$$

Em que D é o número de dias com dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O rendimento diário foi calculado conforme a Equação (2). Na Figura 2 encontra-se o gráfico da eficiência diária dos módulos fotovoltaicos, mostrando o comportamento diário da eficiência no ano de 2002, no qual foram analisados 349 dias registrados, ressaltando que durante esse período os dados de nove dias do mês de fevereiro não foram coletados devido a uma falha no sistema de aquisição de dados originada pela descarga excessiva da bateria do *micrologger*, os demais dias não analisados (7 dias), devem-se à coleta incompleta de dados. O ponto de eficiência máxima foi de 9,46% em 14 de fevereiro de 2002 e o ponto de eficiência mínima foi de 6,03% em 12 de agosto de 2002.

Com base na análise diária foi analisado o comportamento da frequência de ocorrências em relação a eficiência média diária. Pode-se observar que 81,9 % das ocorrências registraram valores entre 8,6% e 9,2% de eficiência, 4,6% entre 9,2% e 9,46%. Os outros valores ficaram entre 6,0% e 8,6% de eficiência. A baixa eficiência mostrada por esses dados está relacionada com dias nublados. Os índices podem ser melhores observados no gráfico da Figura 3.

Pode-se observar que a eficiência sofre uma pequena variação. Como a quantidade de dias que apresentam essa variação não é significativa, para melhor visualizar os índices de eficiência média mensal foi elaborado o gráfico da Figura 3, que reflete a média mensal da eficiência.

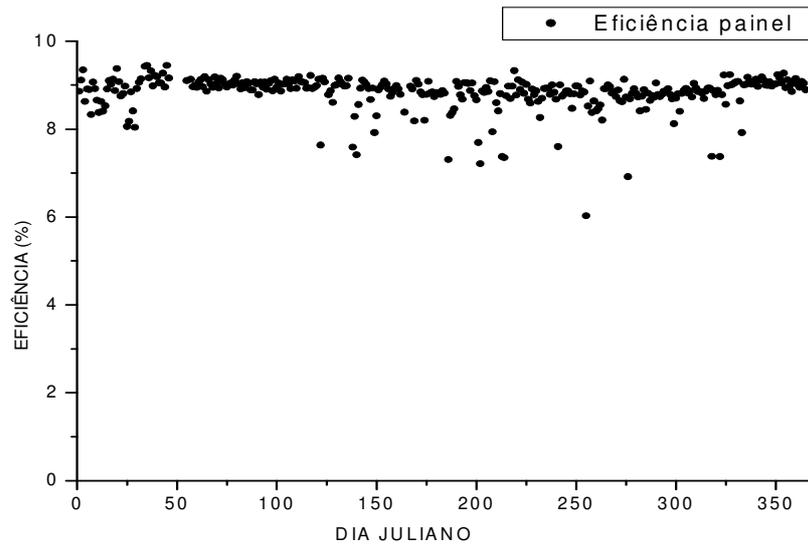


Figura 2 - Eficiência Diária dos Módulos Fotovoltaicos.

Numa partição sazonal os valores de eficiência média obtidos foram: 8,82% na primavera, 8,91% no verão, 8,90% no outono e 8,67% no inverno, com um desvio padrão de $\pm 0,11$, não representando uma variação significativa entre as estações, para a região de Cascavel.

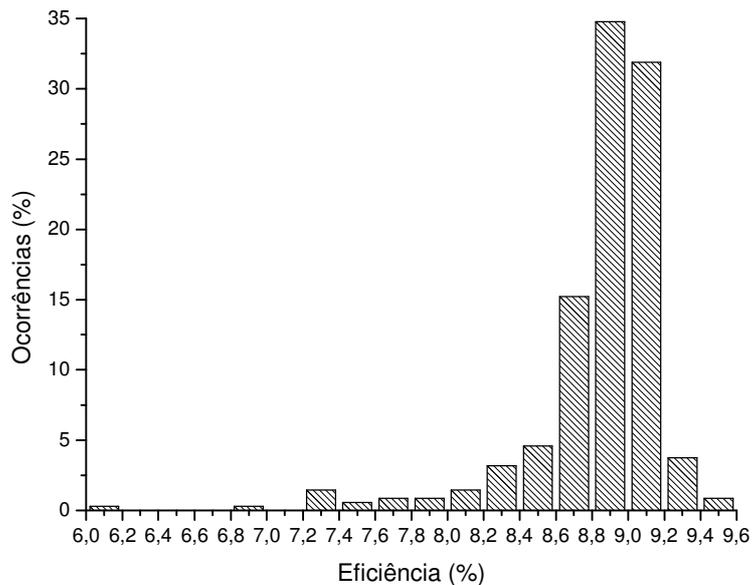


Figura 3 – Percentual de Ocorrências *versus* Eficiência Diária.

A eficiência média mensal foi calculada de acordo com a Equação (3). Na Figura 4 encontra-se a eficiência média mensal dos módulos fotovoltaicos.

Observa-se que o valor da eficiência mínima foi 8,65% em julho e a máxima de 9,17% em fevereiro, com uma média de 8,84%. Salientando dessa forma que há uma variação percentual entre o índice máximo e mínimo de 5,67%, demonstrando que a eficiência deste sistema fotovoltaico não apresentou uma variação significativa durante o período de janeiro a dezembro de 2002, possibilitando dessa forma a aplicação desses índices para um dimensionamento otimizado de sistemas fotovoltaicos. Tal análise reflete um percentual inferior ao encontrado por CARDONA e LÓPEZ (1999) e por CAMARGO (2000), demonstrando que Cascavel apresenta uma condição mais estável para este tipo de sistema fotovoltaico.

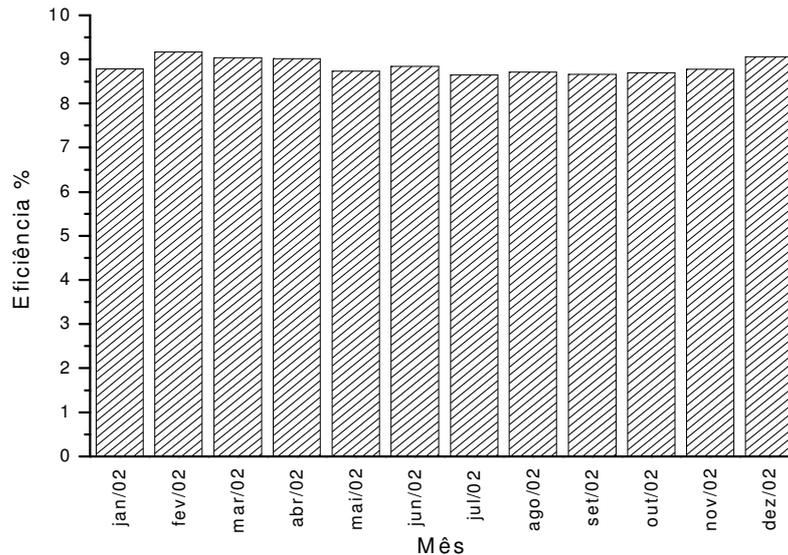


Figura 4 –Eficiência Média Mensal dos Módulos Fotovoltaicos.

A eficiência média mensal dos módulos em condições reais de campo sofre uma redução de 28,88% da eficiência média dos módulos com relação ao padrão de teste STC (Tabela 1) que segundo dados do fabricante é de 12,43%.

4. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos pela pesquisa foi possível concluir que a eficiência do painel não sofre grande variação durante o ano, tendo a média mensal oscilado entre 8,65% e 9,17%, com média anual de 8,84%; e que a esta eficiência, calculada com os dados em laboratório, é superestimada em 28,88% em relação a calculada em campo;

REFERÊNCIAS

- CAMARGO, J. C. Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari. Campinas, 2000. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas.
- CARDONA, M. S. LÓPEZ, M. L. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system. Energy, New York, v. 24, p. 93-102. 1999.
- CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, - Cresesb - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Rio de Janeiro: Cresesb, 1999.
- OVERSTRAETEN, R. W & MERTENS, R. P. Physics, technology and use of photovoltaics. Londres: Modern Energy Studies, 1996, 277 p.
- SOLAREX. Photovoltaic modules, Disponível em: www.solarex.com. Acesso em: 11/06/01.
- TREBLE, F. C. Solar cells. IEE Review, England, v. 127, n 8, p. 505-527. nov. 1980.

Abstract. A study was developed about a stand-alone photovoltaic system, with energy storage, installed at the Agrometeorological Experimental Station of the Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus of Cascavel, latitude 24°59' South, longitude 53°26' West, at an altitude of 682 meters, under real conditions, in the year of 2002. Efficacy of the photovoltaic panels has been evaluated under real field conditions, as well as to determine its characteristic linear fit. It was used to acquire data a CR10X model "micrologger" from Campbell Scien-

tific Inc. It was programmed to accomplish a reading by second in each channel and to store the arithmetic average of data from five minutes, of reading of the direct radiation solar compounds, diffuse solar radiation, horizontal global incidence on the panel; the environment temperature, the operation panel temperature, the voltage and the current of the photovoltaic system. It was observed that efficiency medium monthly registered values in a range from 8,65% to 9,17%, with 8,84% average, and variation of 5,67%. In that case, there is a monthly 5,57 kWh medium energy supply by each panel.

Keywords: *Solar Energy, Photovoltaic Panel, Solar Irradiation*