

Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel

Estor Gnoatto^{1*}, Rivanildo Dallacort², Reinaldo Prandini Ricieri³, Suedemio de Lima Silva³ e Yuri Ferruzi³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Brasil, 4232, 85884-000, Medianeira, Paraná, Brasil. ²Departamento de Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil. ³Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: gnoatto@utfpr.edu.br

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 m, em condições reais de campo, durante o ano de 2002. Foi avaliada a eficiência dos painéis fotovoltaicos em 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 5 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. Os resultados mostram 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%. Pode, assim, representar fornecimento médio mensal de energia de 5,57 kWh por painel.

Palavras-chave: energia solar, sistemas fotovoltaicos, recursos renováveis.

ABSTRACT. Efficiency of the photovoltaic systems under real work conditions on region of Cascavel. The purpose of the present work was to develop a study of an autonomous photovoltaic system, with energy storage, installed at the Experimental Agrometeorological Station of the Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel Campus, located at 24°59'S 53°26'W, 682 meters of altitude, under real field conditions, during the year of 2002. The efficiency of the photovoltaic modules was evaluated under real field conditions and its characteristic linear fit was determined. A Campbell Scientific CR10X micrologger was used to acquire data, programmed to conduct one reading per second from each channel and store the five-minute arithmetic data average from the readings of the incidence of global direct solar radiation (horizontal and global) on the panel, as well as area temperature, panel operational temperature, photovoltaic system tension and current. The results show that average monthly efficiency registered values in the range from 8.65 to 9.17%, with and average of 8.84%, and variation of 5.67%. Therefore, this array can supply a monthly average of 5.57 kWh per panel.

Key words: solar energy, photovoltaic systems, renewable resources.

Introdução

A radiação solar é a fonte de energia responsável e necessária ao desenvolvimento de todos os ciclos da natureza, no entanto seu aproveitamento sempre foi limitado. Inicialmente, a ideia do aproveitamento desse recurso surgiu com as teorias de termodinâmica, por meio do aquecimento de líquidos ou gases; posteriormente, com os estudos sobre o efeito fotoelétrico.

A população mundial cresceu rapidamente nas últimas décadas do século XX (Corson, 1993) e uma

das principais consequências do aumento populacional é o aumento da demanda por energia, necessária para impulsionar os princípios da vida em sociedade. O homem, desde os primórdios, vem utilizando a energia solar para sua sobrevivência, desenvolvendo várias formas de captação e produção energética. De acordo com Palz (1995), o consumo de combustíveis fósseis era insignificante até o século XVIII, o que é uma afirmação surpreendente, pois já eram conhecidos desde a antiguidade. O aumento das preocupações com a questão ambiental internacionalmente, em particular

com a possibilidade de aquecimento global, causado pela acumulação de CO₂ na atmosfera, tem ajudado a convencer, mais e mais, de que as tecnologias que não emitem dióxido de carbono devam ocupar papel fundamental nas futuras estratégias para a produção e uso de energia.

Todas as fontes de energia, direta ou indiretamente, são derivadas em sua maioria da energia solar (Palz, 1995). É a partir da energia solar que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento da água e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, provocando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural são fontes finitas de energia e foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais, que obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento da radiação solar (fontes indiretas de energia solar).

Para que a energia solar fotovoltaica seja mais bem avaliada, vários autores vêm avaliando o desempenho e rendimento de sistemas fotovoltaicos na geração de energia elétrica, dentre eles podem ser citados Treble (1980), Overstraeten e Mertens (1996), Parreta *et al.* (1998), Cardona e López (1999), Camargo (2000) e Van Dyk *et al.* (2002).

O objetivo deste trabalho é avaliar, no período de um ano, a eficiência de painel fotovoltaico em condições reais de campo.

Material 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°59' Sul, Longitude de 53°26' Oeste e altitude de 682 m, no período de 1º de janeiro de 2002 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 A, potência 56 W; duas baterias recarregáveis estacionárias de chumbo-cálcio, marca Concorde, modelo PVX-1285 (85Ah-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 por meio 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. Os painéis fotovoltaicos foram instalados com face voltada para o norte geográfico, a uma altura de 1 m do solo (parte mais baixa do conjunto), com ângulo de inclinação igual à latitude local. O conjunto fotovoltaico avaliado é composto por dois painéis (painel 1 e painel 2), marca Solarex, modelo MSX-56. Cada um dos painéis é constituído por 36 células de silício policristalino ligadas em série, podendo fornecer até 112,2 W em condições STC.

A Tabela 1 apresenta os dados das características elétricas dos painéis utilizados e os dados calculados da eficiência para condições STC e NOCT, apresentando as características elétricas fornecidas pelo fabricante para o modelo. Os dados foram obtidos em laboratório por meio de um simulador solar e representam seu desempenho para ligação da configuração em 12 V, não incluem perdas adicionais, tais como: diodos de bloqueio e fiação. Pode também apresentar características diferentes em incidência de irradiação solar (Solarex).

Tabela 1. Características elétricas dos painéis fotovoltaicos.

Dados do painel	Painel 1 (STC)	Painel 2 (STC)	Painel 1 (NOCT)	Painel 2 (NOCT)
Corrente de curto circuito I _{sc} (A)	3,73	3,62	-	-
Tensão de circuito aberto Voc (V)	20,9	21,1	-	-
Tensão máxima de pico V _{mp} (V)	16,7	16,9	-	-
Corrente máxima de pico Imp (A)	3,39	3,28	2,7	2,8
Potência máxima de pico (W)	56,8	55,4	40,9	39,9
Eficiência painel (%)	12,58	12,27	11,32	11,05
Temperatura painel °C	25	25	49	49

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 5 minutos dos dados das componentes de radiação global no plano horizontal e global na incidência do painel; a temperatura ambiente e a temperatura de operação do painel; a tensão e a corrente do sistema fotovoltaico. Os dados de temperatura são obtidos por termopar do tipo K, instalados no abrigo (medidas de temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco) e na parte de trás do painel fotovoltaico (medida de temperatura do painel).

A eficiência do módulo fotovoltaico é definida pela relação entre a potência gerada pelo módulo e a irradiação incidente sobre o módulo. Segundo Treble (1980) e Overstraeten e Mertens (1996), a eficiência do módulo pode ser obtida pela equação:

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

em que:

$$I_c = \text{irradiância solar (W m}^{-2}\text{);}$$

A = área útil do módulo (m²);
 Imp = corrente máxima de pico (A);
 Vmp = tensão máxima de pico (V).

Sandnes e Reskstad (2002) utilizaram essa equação para calcular a eficiência do painel fotovoltaico em um sistema experimental híbrido, fotovoltaico/coletor solar para gerar eletricidade e água à baixa temperatura. O experimento foi efetuado em condições diferentes das de teste (STC). Hady e Al-Janaby (1998) estudaram durante dois anos o efeito do clima do Kuwait na eficiência de dois tipos de células fotovoltaicas e também utilizaram a mesma técnica.

De acordo com Cardona e López (1999), a eficiência de um conjunto fotovoltaico em um sistema de geração de energia elétrica pode ser obtida em uma relação entre toda energia diária produzida e a energia diária incidente na superfície do módulo. O rendimento diário do conjunto fotovoltaico é representado pela equação:

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

em que:

E_{Pv,d} = potência diária fornecida pelo módulo (W m⁻²);

E_{r,d} = irradiação diária na superfície do conjunto fotovoltaico (W m⁻²).

A média mensal do rendimento diário é obtida por:

$$\eta = \frac{\sum_{D=1}^D \eta_{pvd}}{D} \quad (3)$$

em que: D é o número de dias com dados.

Resultados e discussão

Análise da eficiência do painel solar em condições reais de trabalho

O rendimento diário foi calculado conforme Equação (2). Na Figura 1, encontra-se a eficiência diária dos módulos fotovoltaicos, mostrando o comportamento diário da eficiência do ano de 2002, no qual foram analisados 349 dias registrados. Durante esse período, os dados de nove dias do mês de fevereiro não foram coletados por falha no sistema de aquisição de dados originada pela descarga excessiva da bateria do *microllogger*. Os demais dias não-analisados (sete 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.

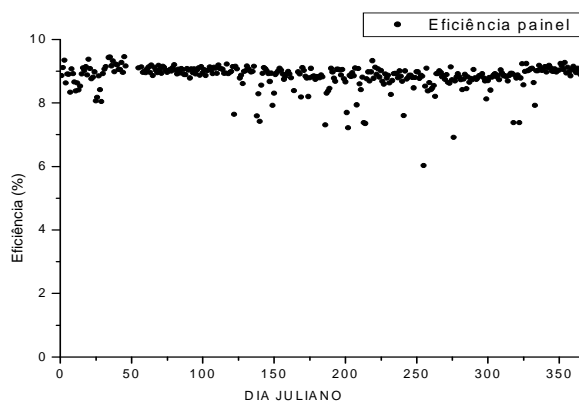


Figura 1. Eficiência diária dos módulos fotovoltaicos.

Com base na análise diária, analisou-se o comportamento da frequência de ocorrências em relação à 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 indicada por esses dados está relacionada com dias nublados. Os índices podem ser melhor observados no gráfico da Figura 2.

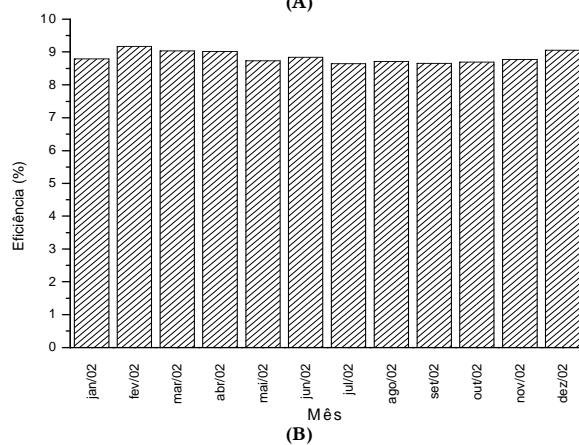
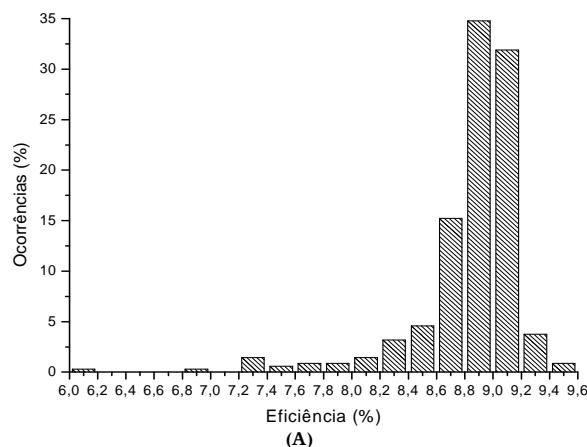


Figura 2. Frequência de ocorrências da eficiência diária (A) e eficiência média mensal dos módulos fotovoltaicos (B).

Em uma partição sazonal, os valores de eficiência média obtidos foram: 8,82% (primavera), 8,91% (verão), 8,90% (outono) e 8,67% (inverno), com desvio-padrão de $\pm 0,11$, não representando variação significativa entre as estações, para a região de Cascavel.

A eficiência média mensal foi calculada de acordo com a Equação (3). Na Figura 2B, encontra-se a eficiência média mensal dos módulos fotovoltaicos. Observou-se que o valor da eficiência mínima foi de 8,65% (julho) e da máxima de 9,17% (fevereiro), com uma média de 8,84%. Salienta-se, dessa forma, que há variação percentual entre os índices máximo e mínimo de 5,67%, demonstrando que a eficiência deste sistema fotovoltaico não apresentou variação significativa durante o período de janeiro a dezembro de 2002, o que possibilita a aplicação desses índices para o dimensionamento otimizado de sistemas fotovoltaicos. Tal análise reflete percentual inferior ao encontrado por Cardona e López (1999) e por Camargo (2000), demonstrando que Cascavel apresenta condição mais estável para este tipo de sistema fotovoltaico.

A eficiência média mensal dos módulos em condições reais de campo sofre 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%.

Energia fornecida pelo painel fotovoltaico

O comportamento da energia diária fornecida por um painel fotovoltaico com relação à irradiância solar diária disponível no plano do painel, no período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2002, foi analisado mediante regressão simples; observou-se que a energia fornecida pelo painel está diretamente relacionada com o nível de irradiação, apresentando coeficiente de determinação de 99,74%, por meio da equação linear $Y = -3,49 + 1,14 \cdot 10^{-5} X$, sendo "Y" a energia (Wh) fornecida por um painel e "X" a irradiação (Jm^{-2}) no plano do painel. Esse comportamento ocorre porque a corrente fornecida pelo painel é linear ao nível de irradiância e a tensão mantém-se praticamente constante, limitada pelas baterias e pelo controlador de carga.

Tal comportamento pode ser observado diariamente, comparando-se dias de céu limpo, parcialmente nublado e nublado, segundo classificação de Ricieri (1998). Verifica-se que, para qualquer tipo de cobertura do céu, os coeficientes de correlação encontrados foram superiores a 99%, afirmando que o comportamento generalizado para o ano também pode ser observado diariamente, em forma de um sistema linear. Isso permite, com pequena variação, a especificação desse tipo de painel fotovoltaico em função da irradiação global anual no plano do painel; dessa forma, fornece subsídios para a análise das características do painel e a determinação da eficiência.

Outro fenômeno também observado é a resposta proporcional da corrente em função da irradiância, bem como o efeito sobre a tensão, que sofre apenas uma pequena variação, mais relacionada com as características da carga estável do que com a variação da irradiância. Como efeito comparativo, pode-se fazer um paralelo da irradiância no painel em relação à irradiância na horizontal. A irradiância na inclinação do painel, medida pelo piranômetro instalado junto a ele, fornece diretamente, sem correção, o valor da irradiância incidente direta. A irradiância na horizontal também pode ser usada, no entanto é necessário que se faça uma correção em função do ângulo, da distância e da altura, pelos efeitos de massa de ar existentes no amanhecer e entardecer.

Os dois módulos fotovoltaicos produziram, nos 12 meses da pesquisa, o total de 133,74 kWh, ou 66,87 kWh por módulo, e média diária de 183,2 Wh por módulo. A menor produção de energia foi de 9,37 kWh no mês de maio e a maior, em março com 13,14 kWh. A Figura 3A apresenta a média mensal de energia produzida pelos dois módulos. Numa média sazonal, pode-se observar, na Figura 3B, que se obteve a maior produção de energia no verão, com 35,58 kWh; a menor foi no inverno, com 30,87 kWh; na primavera, obteve-se produção de 32,97 kWh e, no outono, de 33,35 kWh.

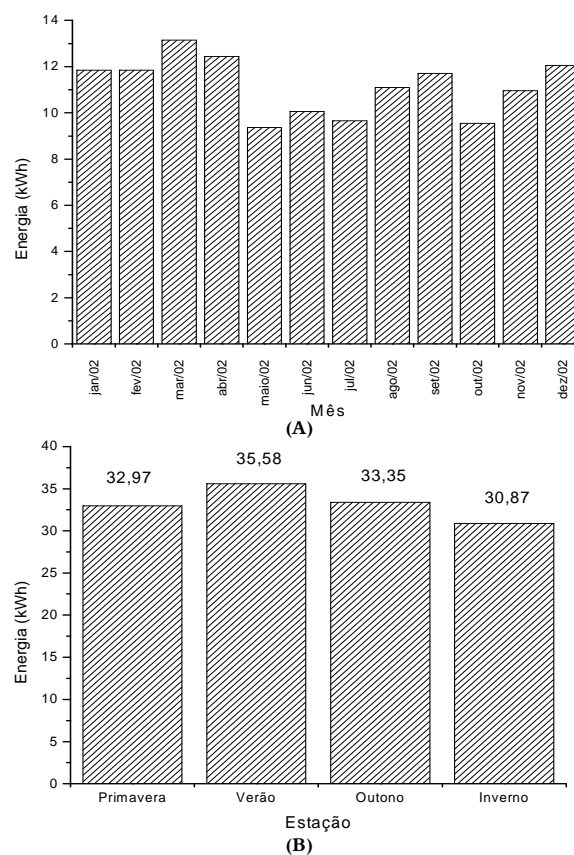


Figura 3. Energia média mensal fornecida por dois módulos (A) e energia fornecida por dois módulos durante as estações (B).

A média da energia produzida pelo painel permite que se estime a quantidade necessária de módulos para se alcançar uma dada potência, visando suprir às necessidades de cargas acopladas a sistemas fotovoltaicos e, dessa forma, estimar valores de custo do kWh produzido. É possível, ainda, avaliar a viabilidade de implantação de sistemas híbridos, com mais de uma forma de fonte alternativa de energia, ou acoplamento com sistemas convencionais de energia elétrica.

Deve-se ressaltar que essa produção de energia varia em função da inclinação do painel e que se pode otimizar o sistema de acordo com a exigência da carga acoplada aos módulos, o tipo de aplicação e a função da relação desta com o comportamento do clima durante o ano. No período de inverno, obteve-se menos energia, pois a inclinação do painel estava igual à latitude local e, segundo recomendações do fabricante Solarex (2001), para uma produção de energia equilibrada, durante as estações do ano, o painel deve ser instalado com um ângulo de inclinação com a horizontal, latitude local + 10°.

Conclusão

Com os resultados obtidos, foi possível concluir que a eficiência do painel fotovoltaico aumenta com a diminuição da temperatura; 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%; a eficiência do painel fotovoltaico calculada com os dados em laboratório é superestimada em 28,88% em relação à calculada em campo; a energia diária fornecida pelo painel é linear à irradiação solar incidente no plano do painel, apresentando coeficiente de determinação maior que 99% em qualquer tipo de cobertura de céu.

Referências

- CARDONA, M.S.; LÓPEZ, M.L. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system. *Energy*, New York, v. 24, n.1, p. 93-102, 1999.
- CAMARGO, J.C. *Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari*. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- CORSON, W.H. *Manual global de ecologia*. São Paulo: Augustus, 1993.
- HADY, A.A.; AL-JANABY, M. The effects of Kuwaiti climate on the efficiency of photovoltaic cells. *Renew. Energy*, Oxford, v. 14, n.1, p. 173-178, 1998.
- OVERSTRAETEN, R.W.; MERTENS, R.P. *Physics, technology and use of photovoltaics*. London: Modern Energy Studies, 1996.
- PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. São Paulo: Hemus, 1995.
- PARRETA, A. *et al.* Effects of solar irradiation conditions on the outdoor performance of photovoltaic modules. *Optics Communications*, Amsterdam, v. 153, n. 1, p. 153-163, 1998.
- RICIERI, R.P. *Modelos de estimativa de avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa*. 1998. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 1998.
- SANDNES, B.; RESKSTAD, J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Sol. Energy*, Kidlington, v. 72, n.1, p. 63-73, 2002.
- SOLAREX. Photovoltaic modules. Disponível em: <<http://www.solarex.com>>. Acesso em: 11 maio 2001.
- TREBLE, F.C. Solar cells. *IEE Rev.*, London, v. 127, n. 8, p. 505-527, 1980.
- VAN DYK, E.E. *et al.* Long-term monitoring of photovoltaic devices. *Renew. Energy*, Oxford, v. 25, p. 183-197, 2002.

Received on June 07, 2006.

Accepted on May 15, 2008.