

DETERMINAÇÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA DE ARRANJO FOTOVOLTAICO

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

3.3 Módulos Fotovoltaicos

Resumo. Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a determinação experimental da curva característica de um arranjo fotovoltaico. Um conjunto de multímetros controlados por um microcomputador mede simultaneamente a tensão e a corrente do arranjo, além da irradiância solar no plano dos módulos. Uma carga resistiva variável foi utilizada para controlar o ponto de polarização do arranjo. A curva de um arranjo de 1.600 W_p, formado por dois strings de oito módulos em paralelo, foi obtida com o sistema proposto e comparada com a curva calculada a partir das curvas dos módulos medidas individualmente. Os resultados mostraram-se bastante satisfatórios. As diferenças encontradas entre as curvas medida e calculada ficaram dentro das incertezas associadas às medidas.

Palavras-chave: Energia Solar, Curva Característica, Arranjo Fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

As aplicações dos sistemas fotovoltaicos de conversão de energia foram, durante muito anos, restritas a sistemas isolados de baixa potência, os quais utilizam um número reduzido de módulos fotovoltaicos. O perfil de utilização da energia solar fotovoltaica sofreu uma drástica mudança na última década com a disseminação dos sistemas conectados à rede de distribuição. Nestes sistemas é comum a utilização de dezenas ou até centenas de módulos associados em arranjos (ou *arrays*). O desempenho de um dispositivo fotovoltaico pode ser determinado a partir de sua curva característica. Os módulos fotovoltaicos, em decorrência dos processos de fabricação, apresentam uma certa dispersão de seus parâmetros elétricos. Em um arranjo fotovoltaico essa dispersão faz com que a potência total seja menor que a soma das potências individuais (Zilles, 1993). É possível estimar matematicamente a curva resultante de uma associação de módulos fotovoltaicos a partir das curvas individuais dos módulos que o constituem. Entretanto, fenômenos decorrentes de certas particularidades (tais como sombreamentos parciais, efeitos de diodos de *bypass*, etc.), embora possam ser simulados através de programas computacionais, muitas vezes podem ser comprovados somente com a análise da curva completa do arranjo obtida experimentalmente.

Neste trabalho é apresentada uma primeira abordagem, no âmbito do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LES-UFRGS), da determinação experimental da curva característica de um arranjo fotovoltaico. No caso específico, foi determinada a curva de um dos arranjos de uma central fotovoltaica conectada à rede instalada no prédio do LES-UFRGS. Este sistema é constituído por 48 módulos Isoton I-100, totalizando 4.800 W_p, e divididos em três arranjos independentes de 16 módulos. Cada arranjo, por sua vez, é constituído por dois *strings* de oito módulos conectados em paralelo.

Para a determinação da curva do arranjo foi adaptado um sistema de ensaio de curvas características de módulos fotovoltaicos já existente (Prieb, 2002). A principal diferença está no controle do ponto de polarização do gerador fotovoltaico por meio de uma carga resistiva variável em vez de uma carga eletrônica. Esta modificação é devida à limitação de potência (1.000 W) e tensão (± 100 V) das cargas eletrônicas disponíveis no LES-UFRGS diante das características elétricas do arranjo ensaiado.

A curva obtida experimentalmente foi comparada com a curva calculada pelo programa CREARRAY (Krenzinger, 2001) a partir das curvas experimentais individuais dos módulos que o constituem.

2. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS DO ARRANJO

A norma brasileira *NBR10899* (ABNT, 1988) define a curva característica tensão versus corrente como a “representação dos valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico, em função da tensão, para condições preestabelecidas de temperatura e radiação”. A análise da curva característica $I-V$ é de fundamental importância na caracterização de um gerador fotovoltaico, pois a partir dela é possível obter os principais parâmetros que determinam sua qualidade e desempenho. A determinação experimental da curva característica de um gerador fotovoltaico (célula, módulo ou arranjo) consiste em polarizar o dispositivo sob teste em diversos pontos de operação, registrando simultaneamente os pares de tensão e corrente.

A região de principal interesse da curva característica está compreendida entre o curto-circuito e o circuito aberto. O dispositivo sob teste deve estar sob condições controladas (ou pelo menos estáveis e muito bem determinadas) de temperatura de célula e irradiância solar.

Na Fig. 1 é mostrado um exemplo de curva característica de um módulo fotovoltaico, onde são assinalados alguns pontos notáveis: a corrente de curto-circuito (I_{SC}), a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e o ponto de máxima potência (P_M).

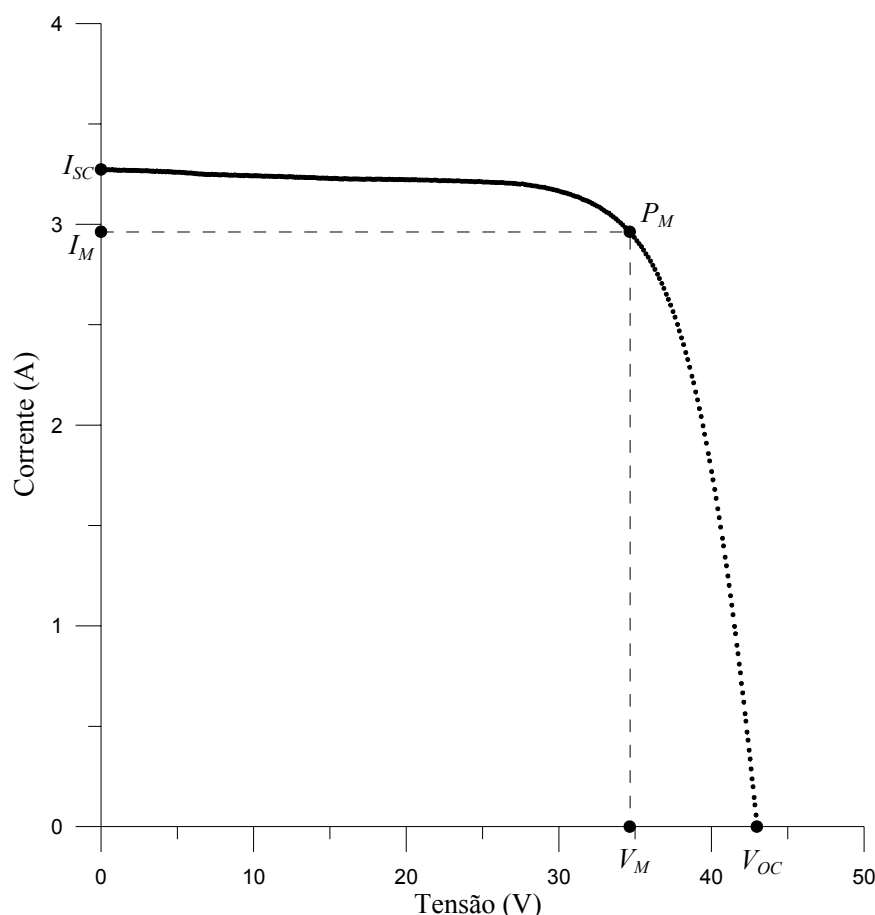


Figura 1 - Curva característica medida de um módulo fotovoltaico Isofoton I-100 ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{Cel} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

O gerador fotovoltaico deve, idealmente, ser polarizado desde antes do curto-circuito (tensão negativa, corrente positiva), passando pelo quadrante de geração (tensão e corrente positivas) até

depois do circuito aberto (tensão positiva, corrente negativa). Embora a região de principal interesse seja o quadrante de geração, é conveniente estender o traçado da curva para as zonas negativas de tensão e corrente, entre outros motivos, para compensar as quedas de tensão por cabos e *shunts* e possibilitar a correção da curva para as condições padrão (irradiância solar $G = 1.000 \text{ W/m}^2$ e temperatura de célula $T_{Cel} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). Para isso é necessária a utilização de um dispositivo eletrônico capaz de polarizar o dispositivo sob teste nos três quadrantes acima referidos. No caso do Laboratório é utilizada uma fonte bipolar Kepco BOP 50-8M, com capacidade de fornecer uma corrente variando de -8 A a +8 A, em uma faixa de tensões desde -50 V a +50 V, suficientes para a maioria dos módulos existentes no mercado.

O sistema de aquisição de dados utilizado é constituído por três multímetros digitais Agilent 34401A conectados a um computador por uma interface GPIB. Cada um deles mede simultaneamente a tensão e a corrente do módulo sob teste, além da irradiância solar no plano do módulo. A tensão é obtida diretamente dos bornes do módulo, enquanto que a corrente é medida a partir da queda de tensão sobre um resistor *shunt* Hartmann & Braun com relação nominal 5 A/300 mV, classe de exatidão 0,5 %. O sensor de radiação utilizado é uma célula de referência calibrada fabricada pela Isofoton, de mesma tecnologia utilizada nos módulos do arranjo. A corrente da célula de referência também é determinada a partir da queda de tensão sobre um *shunt*. Um *software* dedicado controla os multímetros e o disparo de uma varredura automática de tensão, a qual comanda a fonte Kepco, e registra no disco rígido do computador os pares $I-V$ que constituem a curva e a irradiância solar correspondente a cada ponto. O sistema de aquisição de dados tem capacidade para medir até 512 conjuntos tensão/corrente/irradiância em um segundo e meio.

Com o objetivo de escolher os 48 módulos que efetivamente fariam parte da instalação da central fotovoltaica conectada à rede, todos os 57 módulos do lote adquirido tiveram suas curvas características determinadas experimentalmente. Embora o LES-UFRGS conte com uma câmara refrigerada que permite submeter o módulo sob teste à temperatura *standard* de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, por uma questão de conveniência optou-se, para esta classificação, por ensaiar os módulos na temperatura de operação. As curvas foram levantadas em três dias de céu limpo, com os módulos posicionados de forma tal que o ângulo de incidência dos raios solares sobre o plano dos módulos fosse o menor possível. Os ensaios foram executados com irradiâncias entre 890 W/m^2 e 1.010 W/m^2 , medidas com a célula de referência instalada no plano dos módulos. A temperatura de célula dos módulos variou entre $53 \text{ }^\circ\text{C}$ e $63 \text{ }^\circ\text{C}$. A Fig. 2 mostra alguns dos módulos e a célula de referência posicionados para o ensaio.



Figura 2: Módulos fotovoltaicos e célula de referência durante o ensaio.

Para comparar o desempenho dos módulos é necessário que as curvas I - V estejam referidas a condições comuns de irradiância solar e temperatura de célula. Para tanto foi elaborado um procedimento de pós-processamento dos dados medidos através de um programa computacional (Krenzinger, 2004). Desta maneira todas as curvas medidas foram levadas à condição de 1.000 W/m^2 e 55°C , por considerar-se que esta condição de temperatura era mais significativa que a *standard*. Além disso, como os módulos estabilizaram-se em temperaturas próximas a esta, ficam minimizados os erros inerentes à correção por temperatura.

Os 48 módulos selecionados foram divididos em seis classes tendo como critério a corrente no ponto de máxima potência. Os oito módulos de cada classe foram conectados em série, formando um *string*. Os *strings* cujas tensões no ponto de máxima potência fossem mais parecidas entre si foram conectados dois a dois. Detalhes do processo de classificação podem ser encontrados em Krenzinger e Prieb (2005).

Tabela 1. Características individuais dos módulos do arranjo ensaiado
($G = 1.000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{cel}} = 55^\circ\text{C}$).

Nº de Série	V_M (V)	I_M (A)	P_M (W)	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	
04010075013	29,49	2,85	83,96	37,73	3,22	String A
04010049003	28,80	2,85	82,02	37,64	3,29	
04010075012	28,85	2,85	82,20	37,29	3,21	
04010075026	29,04	2,85	82,75	37,60	3,23	
04010049022	29,75	2,85	84,78	38,03	3,24	
04010075028	29,09	2,85	82,95	37,82	3,24	
04010075005	29,27	2,85	83,53	37,60	3,26	
04010049016	29,47	2,85	84,10	37,86	3,20	
04010049018	29,23	2,86	83,58	37,85	3,21	String B
04010049020	29,44	2,87	84,38	38,00	3,22	
04010049009	29,46	2,87	84,47	37,87	3,24	
04010049010	29,47	2,87	84,54	38,02	3,26	
04010075023	29,69	2,87	85,34	37,93	3,24	
04010075024	29,59	2,87	85,07	37,90	3,22	
04010075006	29,34	2,88	84,40	37,79	3,25	
04010075030	29,18	2,88	83,98	37,68	3,25	



Figura 3 - Detalhe da fachada do prédio do Laboratório de Energia Solar mostrando os módulos do arranjo ensaiado e a célula de referência.

A Tab. 1 mostra as características individuais dos módulos constituintes do arranjo do qual foi determinada a curva característica, já transpostas para as condições de irradiância solar e temperatura de célula 1000 W/m^2 e 55°C , respectivamente.

A Fig. 3 mostra um detalhe da fachada do prédio do Laboratório de Energia Solar. O arranjo analisado é formado pelos 16 módulos mostrados na fileira inferior. Pode-se também observar, no lado direito, a célula de referência instalada no plano dos módulos.

3. CÁLCULO DA ASSOCIAÇÃO DOS MÓDULOS DO ARRANJO

O cálculo da curva resultante da associação dos módulos fotovoltaicos do arranjo foi realizado através de um *software* elaborado no LES-UFRGS, denominado CREARRAY. Este programa foi desenvolvido para estudar o comportamento da associação de módulos iguais ou diferentes, submetidos a condições iguais ou diferentes entre si. Com o uso do programa é possível, por exemplo, determinar qual seria a curva resultante de uma associação de módulos na qual as células de um deles estivessem na sombra enquanto que os demais módulos estivessem expostos a sol pleno.

Inicialmente desenvolvido para operar com dados de catálogo, o CREARRAY tem um conjunto de algoritmos que permite a obtenção de uma curva característica completa a partir da corrente de curto-circuito, da tensão de circuito aberto e da tensão e corrente no ponto de máxima potência. O usuário pode inserir na página de trabalho do programa um determinado número de módulos fotovoltaicos a partir de um banco de dados ou então digitando os dados necessários. A seguir o usuário define as condições de temperatura de célula e irradiância solar para cada módulo. O programa utiliza uma metodologia baseada no modelo de uma exponencial para definir a curva na nova condição. Os algoritmos utilizados estão descritos em Krenzinger (2001).

Nesta etapa o programa já está apto a calcular a associação. O usuário “monta” um arranjo arrastando com o mouse os ícones que representam os módulos fotovoltaicos para dentro do diagrama desenhado na tela do computador. O programa passa então a operar apenas com o conjunto de pontos discretos gerados pelas funções analíticas que descrevem cada módulo. Os espaços entre os pontos são resolvidos por interpolação. Cada *string* série é caracterizado por ter uma única corrente para todos os módulos. São lançadas linhas de corrente e uma sub-rotina calcula a tensão correspondente de cada módulo e sua soma. Obtém-se assim a curva resultante de cada *string*. Para a associação de dois ou mais *strings* em paralelo, o CREARRAY lança linhas de tensão e calcula, para cada *string* (ou módulo), qual é a corrente correspondente e sua soma. Diversos níveis de associação podem ser realizados até obter a curva característica do arranjo.

Recentemente o programa CREARRAY foi aperfeiçoado, permitindo a entrada de dados (curva característica) medidos em vez de dados de catálogo. Com isto toda a etapa analítica é ignorada e o programa atua diretamente na determinação da curva característica por interpolação e soma dos valores, conforme descrito anteriormente. Uma limitação desta opção do programa é que os dados dos arquivos utilizados já devem estar representando a curva de cada módulo nas condições de irradiância solar e temperatura de célula em que se deseja a resultante.

4. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA CARACTERÍSTICA DO ARRANJO

Como visto anteriormente, para polarizar um gerador fotovoltaico nos três quadrantes é necessária a utilização de uma fonte de potência externa (carga eletrônica) com capacidade de corrente e tensão que exceda os limites de I_{SC} e V_{OC} do gerador a ser ensaiado. No caso do arranjo analisado neste trabalho, esses valores são da ordem de 7 A e 300 V respectivamente. O LES-UFRGS não dispõe, no momento, de uma carga eletrônica com estas características. Uma solução de compromisso é utilizar um resistor variável capaz de dissipar a potência produzida pelo arranjo. A primeira consequência do uso de um dispositivo de polarização passivo é que as medidas ficam limitadas aos pontos da curva situados no quadrante de geração.

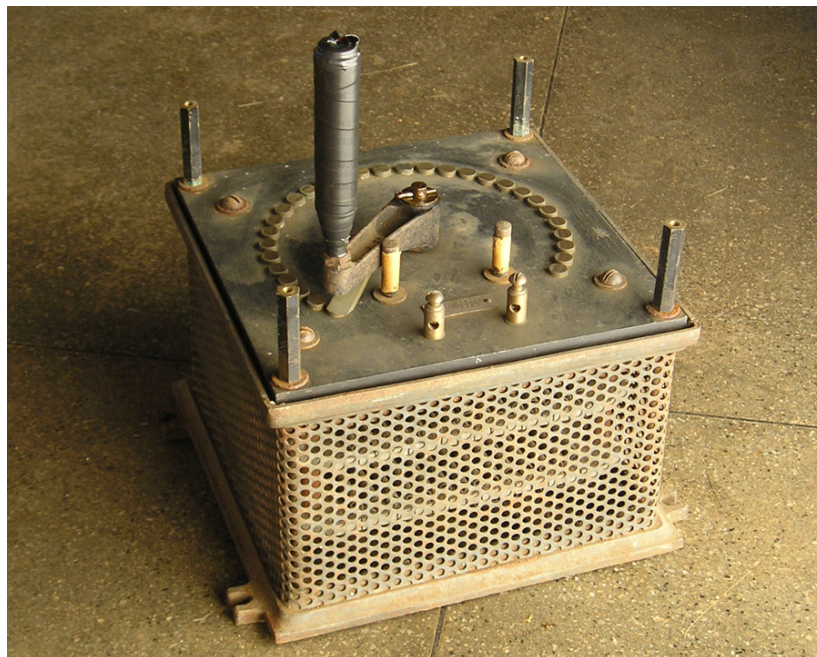


Figura 4 – Resistência variável utilizada como carga para o ensaio.

O resistor empregado, já existente no Laboratório, possui uma resistência total de $220\ \Omega$, dividida em 30 derivações (*taps*) uniformemente distribuídas, o que permite 31 pontos de polarização, contando com o circuito aberto.

O sistema de aquisição de dados utilizado para registrar os pontos da curva do arranjo é praticamente o mesmo utilizado para os módulos. Apenas foram modificados o programa de controle (com a reprogramação da escala de medida de tensão) e o *shunt* de corrente (substituído por outro Hartmann & Braun de 10 A/300 mV, classe de exatidão 0,5 %). Como a operação da resistência é manual, através de um dispositivo de chaveamento rotativo, o tempo de aquisição da curva foi aumentado para três segundos. A temperatura dos módulos foi medida na face posterior dos mesmos com um pirômetro infravermelho Raynger ST6, fabricado pela Raytek.

A capacidade de dissipação de potência da resistência limitou a potência do arranjo ensaiado. Na situação atual foi possível o ensaio de um dos arranjos de 16 módulos, com uma potência nominal de 1.600 W_p .

Com o sistema montado, em um dia de céu limpo e próximo ao meio-dia solar, foram adquiridas várias curvas. Na Fig. 5 é mostrada uma das curvas obtidas, enquanto que na Tab. 2 é apresentado um resumo dos dados obtidos da mesma curva.

No mesmo gráfico, a título de comparação, é mostrada a curva calculada para as mesmas condições de ensaio através do programa CREARRAY. Pode-se observar uma ótima aproximação entre as curvas.

As diferenças entre os valores medidos e calculados encontram-se dentro das faixas de incerteza assumidas pelo LES-UFRGS para este tipo de medida, da ordem de 2,5 % para potência e correntes e 0,5 % para tensões (Prieb, 2002).

A utilização de um dispositivo de polarização passivo, embora tenha possibilitado a determinação da curva característica do arranjo, trouxe alguns inconvenientes intrínsecos. O primeiro deles é a impossibilidade de medir diretamente a corrente de curto-circuito ($V = 0$) devido às quedas de tensão através do cabeamento e do *shunt*. No caso particular, essa queda de tensão foi da ordem de 2 V. Assim, para a corrente de curto-circuito foi adotado o valor obtido pela extrapolação (regressão linear) dos três pontos da curva mais próximos à abscissa zero.

Outras restrições estão relacionadas ao valor ôhmico relativamente baixo do resistor ($220\ \Omega$) e à linearidade da distribuição da resistência entre as derivações. A resistência baixa resulta em limitação da excursão da tensão. Para as condições do ensaio ($G = 997\text{ W/m}^2$ e $T_{Cel} = 59\text{ }^\circ\text{C}$) o valor máximo atingido foi da ordem de 290 V. Para a obtenção da tensão de circuito aberto foi

necessário, imediatamente após chegar-se ao fim de curso do resistor, abrir o circuito de corrente através de um disjuntor. A distribuição homogênea da resistência entre as derivações, por sua vez, refletiu-se na desuniformidade da distribuição dos pontos de polarização ao longo da curva, com espaçamento maior entre os pontos na região plana da curva e um aumento de sua concentração na direção do circuito aberto. O ideal, para esta finalidade, é que a distribuição da resistência entre as derivações tivesse característica logarítmica reversa.

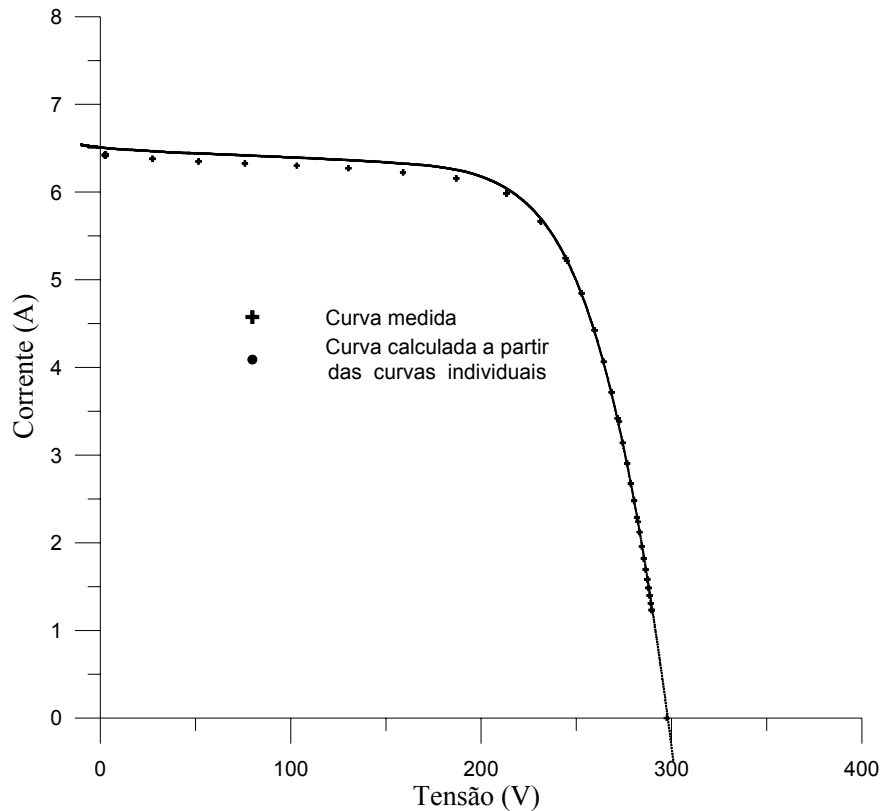


Figura 5 - Curvas características medida e calculada de um arranjo fotovoltaico constituído por 16 módulos Isofoton I-100 ($G = 997 \text{ W/m}^2$, $T_{Cel} = 59 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabela 2. Resumo dos dados do arranjo medido.

	MEDIDO	CALCULADO
Máxima Potência	1.310 W	1.318 W
Tensão de Máxima Potência	230,6 V	229,4 V
Corrente de Máxima Potência	5,68 A	5,75 A
Tensão de Circuito Aberto	297,5 V	297,9 V
Corrente de Curto-Circuito	6,42 A	6,51 A

5. CONCLUSÕES

Foram desenvolvidos um sistema experimental e uma metodologia para a determinação da curva característica de arranjos fotovoltaicos. A curva característica de um arranjo fotovoltaico de 1.600 W_p foi determinada com o sistema proposto.

A metodologia e a instrumentação empregadas mostram-se adequadas, apesar de algumas limitações, e os resultados foram bastante satisfatórios, com uma ótima aproximação entre as curvas medida e calculada.

O sistema deverá ser aprimorado com a construção de uma carga eletrônica em substituição ao resistor variável utilizado como dispositivo de polarização, combinada com a aquisição de multímetros mais velozes. Estes dois quesitos já estão previstos dentro de projetos em andamento no âmbito do Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, da Eletrobrás e do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988. Norma NBR10899 - Conversão Fotovoltaica de Energia Solar, Rio de Janeiro, Brasil.
- Krenzinger, A. 2001. An Algorithm for PV Array Analysis. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munique, Alemanha (CD-ROM).
- Krenzinger, A. 2004. Programa de Pós-Processamento de Dados Para Ensaios de Módulos Fotovoltaicos. Libro de Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Vigo, España, p. 763-768.
- Krenzinger, A. Prieb, C.W.M. 2005. Clasificación y Selección de Módulos Fotovoltaicos para una Central Conectada a la Red. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Salta, Argentina, v. 9, n. 04, p. 19-23.
- Prieb, C.W.M. 2002. Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Zilles, R. 1993. Modelado de Generadores Fotovoltaicos: Efectos de la Dispersión de Parámetros. Tesis Doctoral. Escuela Técnica de Ingenieros de Telecomunicación-Universidad Politécnica de Madrid, Espanha.

DETERMINATION OF THE *I-V* CURVE OF A PHOTOVOLTAIC ARRAY

Abstract. *This work presents a methodology for the experimental determination of the characteristic *I-V* curve of a photovoltaic array. A set of digital multimeters controlled by a computer measures simultaneously the voltage and the current of the array, as well as the solar irradiance on the modules plane. A variable resistive load was employed for biasing the array. A curve of an array of 1.600 W_p, formed by two strings of eight modules connected in parallel, was obtained using the proposed system and compared to a curve calculated from individually measured curves of the modules. The results were quite sufficient. The differences observed between the measured and calculated curves are within the range of the uncertainties associated to the measurements.*

Key words: Solar Energy, *I-V* Curve, Photovoltaic Array.