

# GERADOR FOTOVOLTAICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO<sup>1</sup>

Claudia Valéria Távora Cabral<sup>2</sup>, Delly Oliveira Filho<sup>3</sup>, Lauro de Vilhena Brandão Machado Neto, Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz<sup>5</sup>

## RESUMO

As variações de intensidade solar, temperatura ambiente ou carga, são parâmetros que alteram o ponto ótimo de operação de um gerador fotovoltaico. Desta forma, deve-se analisar o seu comportamento, a fim de otimizar seu funcionamento. Este trabalho visou apresentar a modelagem e a simulação de um gerador fotovoltaico mediante características fornecidas pelo fabricante, utilizando-se programas de digitalização de curvas e simulação (Simulink do Matlab®), analisando seu comportamento em relação à variação de intensidade solar e temperatura, comparando as curvas obtidas com as fornecidas pelo fabricante. Os resultados obtidos foram satisfatórios, validando o modelo utilizado para simulação de geradores fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** gerador fotovoltaico, modelagem, simulação.

## ABSTRACT

### PHOTOVOLTAIC MODULES: MODELING AND SIMULATION

Solar intensity, ambient temperature or load variations are parameters which change the optimal operation point of photovoltaic generators. Thus, one must analyze its behavior in order to optimize its functioning. This study aimed at modeling and simulating a photovoltaic generator following the characteristics informed by the manufacturer. With the use of computer programs of curve digitalization and simulation (Simulink do Matlab®), the behavior of the generator was analyzed relative to temperature and solar intensity variations, and compared with the information supplied by the manufacturer. The results were satisfactory and the proposed model was valid for simulation of photovoltaic generators.

**Keywords:** photovoltaic module, modeling, simulation.

---

**Recebido para publicação em 02/01/2007. Aprovado em 14/04/2009**

1 Parte da tese de Doutorado em Engenharia Agrícola do primeiro autor.

2 Doutora do Dep. de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG. E-mail: tclavale@vicosa.ufv.br.

3 Professor do Dep. de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. E-mail: delly@ufv.br.

4 Professor da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, Belo Horizonte, MG. E-mail: lvilhena@pucminas.br

5 Engenheira da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, Belo Horizonte, MG. E-mail: asacd@cemig.com.br.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, em virtude da preocupação com o meio ambiente, e também, com uma maior aproximação do esgotamento das fontes fósseis, tem-se dado mais atenção ao avanço e estudo tecnológico de fontes renováveis de energia.

O protocolo de Kyoto, cujo objetivo é fazer com que tais países signatários reduzam as emissões de gases que causam o efeito estufa, é uma forma de estimular a utilização de fontes não poluidoras do meio ambiente, tais como, eólica, geotérmica, solar, dentre outras.

A energia solar, além de outras formas de conversão energética natural, pode ser convertida em energia elétrica. Esta conversão se dá por meio de células fotovoltaicas, constituídas por semicondutores. Uma célula fornece cerca de 0,6 V e uma densidade de corrente de curto-circuito da ordem de 150 mA/cm<sup>2</sup>, quando exposta a uma radiação solar de 1 kW/m<sup>2</sup> (KREZNIGER et al., 2002), sendo que, para se conseguir a tensão e corrente suficientes para alimentar o sistema, é necessário o agrupamento em módulos, que são células conectadas em arranjos. Existem diversos tipos de células fotovoltaicas, tais como: silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos, sendo as mais eficientes as células de silício monocristalino.

Na análise do gerador fotovoltaico deve-se levar em consideração, também, a geometria das células, pois estas devem ocupar o máximo de espaço possível do módulo. As células quadradas ocupam melhor área, enquanto que as circulares têm a vantagem de não sofrerem perda de material devido à forma cilíndrica de crescimento do silício monocristalino.

De acordo com as mudanças de condições de carga, diversos valores de corrente e tensão podem ser medidos e arranjados graficamente. A curva gerada é chamada de curva característica I-V e está associada às condições de intensidade solar e temperatura, dentre outras. As condições padrão de teste para o gerador fotovoltaico são: radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula de 25°C e massa de ar AM1.5. As condições nominais de operação são: irradiância solar de 800 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 20°C e velocidade do vento de 1 m/s.

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado, principalmente, pela intensidade luminosa e temperatura

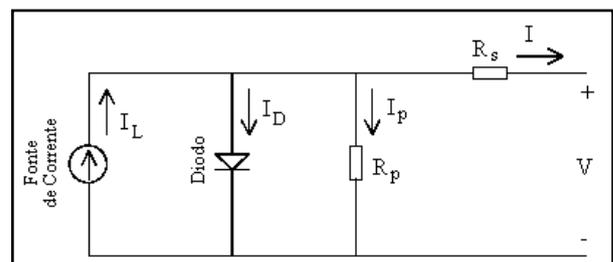
das células. Com o aumento da temperatura ou diminuição da intensidade luminosa, observa-se uma redução da eficiência da célula. (SINGH, P., et al., 2008)

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo para geradores fotovoltaicos do tipo mono e policristalinos, a fim de simular seu funcionamento mediante várias intensidades de radiação solar e temperatura, para melhor entendimento do comportamento de um sistema fotovoltaico e posterior utilização em seu dimensionamento.

## MATERIAL E MÉTODOS

É por meio de células fotovoltaicas, formadas de material semicondutor, que há a conversão da energia solar em energia elétrica. Os semicondutores que geram maior produto corrente-tensão para a luz visível são os mais sensíveis, sendo os utilizados para isso os de silício, selênio, dentre outros. O silício é o mais utilizado, pois existe em grande disponibilidade no planeta. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos fornecem uma família de curvas às condições padrão de teste e em diferentes intensidades solares e temperaturas. O valor máximo de potência para uma determinada intensidade solar encontra-se na região de transição desta curva.

O modelo matemático utilizado para descrever uma célula solar foi baseado em seu circuito equivalente (modelo de um diodo), mostrado na figura 1.



**Figura 1.** Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real (modelo de um diodo) (HECKTHEUER, 2001).

A figura 1 mostra o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

Sendo

$I_L$  = a corrente fotogerada;

$R_s$  e  $R_p$  = suas resistências série e paralela;

$V$  e  $I$  = tensão e corrente de saída da célula;

$I_D$  = a corrente do diodo;

$I_p$  = a corrente relacionada à resistência paralela  $R_p$ .

A partir do modelo da figura 1, pôde-se chegar à equação (1) que descreve o desempenho de geradores fotovoltaicos, relacionando tensão, corrente, intensidade solar e temperatura (SALAMEH et al., 1995):

$$I = I_{SC} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V - \Delta V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} + \Delta I \quad (1)$$

em que

$$C_2 = \frac{V_{mp} N_{oc} - 1}{\ln(1 - I_{mp} / I_{SC})} \quad (2)$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}} \right) \exp\left(-\frac{V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right) \quad (3)$$

$$\Delta I = \alpha \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) \Delta T + \left( \frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) I_{SC} \quad (4)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (5)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (6)$$

$$T = T_a + 0,02 S \quad (7)$$

sendo

- V = tensão de saída do circuito (V);
- V<sub>oc</sub> = tensão de circuito aberto (V);
- V<sub>mp</sub> = tensão de máxima potência (V);
- V<sub>ref</sub> = tensão nas condições de referência (V);
- I = corrente de saída do circuito (A);
- I<sub>SC</sub> = corrente de curto-circuito (A);
- I<sub>mp</sub> = corrente de máxima potência (A);
- I<sub>ref</sub> = corrente nas condições de referência (A);
- α = coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito na radiação solar de referência (A/°C);
- β = coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto na radiação solar de referência (V/°C);
- R<sub>s</sub> = resistência série (Ω);
- S = radiação solar total no plano do gerador fotovoltaico (W/m<sup>2</sup>);
- S<sub>ref</sub> = radiação solar de referência (1000 W/m<sup>2</sup>);
- T = temperatura da célula solar (°C);
- T<sub>ref</sub> = temperatura de referência da célula solar (25°C);
- T<sub>a</sub> = temperatura ambiente (°C).

Por meio das Equações 8 e 9, a seguir, calculam-se as novas tensões e correntes a partir da tensão e da corrente

nas condições de referência, e estes valores (V e I) serão dados de entrada da Equação 1.

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (8)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (9)$$

Para a determinação da resistência série, utilizou-se a relação entre a potência, tensão e corrente, conforme mostrado na Equação 10.

$$P = V I \quad (10)$$

em que

P	= potência de saída do gerador fotovoltaico (W);
V	= tensão de saída do gerador fotovoltaico (V);
I	= corrente de saída do gerador fotovoltaico (A).

A simulação do modelo se dá pela equação (1), que para ser implementada, se faz necessário a determinação de R<sub>s</sub>. Sendo assim, substituiu-se I, na Equação 10, pela Equação 1, isolando-se, em seguida, o valor de R<sub>s</sub>.

$$R_s = \frac{d S_{mref}}{b S_m (\alpha T - \alpha T_{ref} + I_{SC})} \quad (11)$$

sendo

$$d = V_{mp} b + c V_{mp} - b V - b \beta T + b \beta T_{ref} - c V_{oc} \quad (12)$$

$$b = \ln\left(\frac{I_{SC} - I_{mp}}{I_{SC}}\right) \quad (13)$$

$$c = \ln\left(\frac{-P + V I_{SC} + V a I_{SC} - V a I_{mp}}{V (I_{SC} - I_{mp})}\right) \quad (14)$$

$$a = \exp\left(-\frac{V_{mp} \ln\left(\frac{I_{SC} - I_{mp}}{I_{SC}}\right)}{V_{mp} - V_{oc}}\right) \quad (15)$$

em que

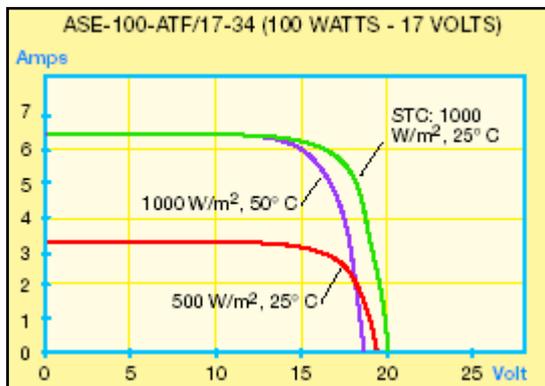
P = máxima potência (W).

Levando-se este valor, e a Equação 1, pode-se simular a curva característica I-V (corrente versus tensão) para o gerador fotovoltaico. Os valores de V<sub>oc</sub>, I<sub>SC</sub>, V<sub>mp</sub>, I<sub>mp</sub>, α, β fornecidos pelo fabricante, foram utilizados na simulação.

Um arquivo contendo todos os dados fornecidos por diversos fabricantes, para diferentes geradores fotovoltaicos, foi criado, podendo-se simulá-los, a qualquer intensidade solar e temperatura.

Para determinação da veracidade das curvas características I-V simuladas, digitalizaram-se curvas fornecidas por fabricantes, utilizando-se, para isso, o programa Sacrid®, desenvolvido na UFV (Universidade Federal de Viçosa) (SANTOS & RAMOS, 1997), podendo-se obter, desta forma, os pontos destas a diversas

irradiâncias e temperaturas. No programa Matlab®, versão 6.5, plotaram-se estas curvas, comparando-as com as simuladas para análise de possíveis erros. A figura 2, a seguir, apresenta as curvas que foram digitalizadas para o módulo fotovoltaico modelo ASE-100-ATF/17 (100).



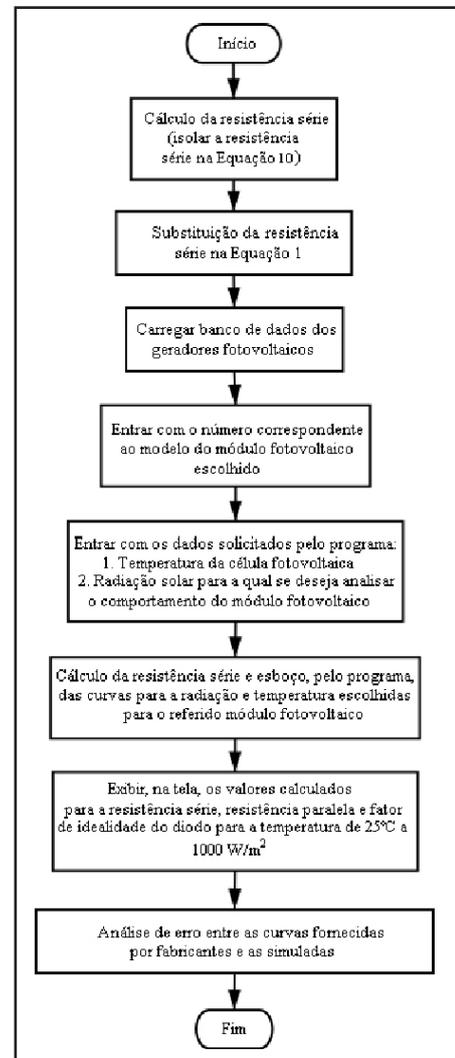
**Figura 2.** Curvas características I-V (corrente versus tensão) para o módulo fotovoltaico modelo ASE-100-ATF/17 (100) (ASE, 2009).

A figura 2 mostra as curvas características I-V (corrente versus tensão) para o módulo fotovoltaico modelo ASE-100-ATF/17 (100) para uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, a 25°C (condições padrão de teste) e a 50°C, e para uma irradiância de 500 W/m<sup>2</sup>, a 25°C. Observa-se que o aumento do nível de insolação aumenta a temperatura da célula, e, conseqüentemente, tende a reduzir a eficiência do módulo (CRESESB, 1999). Isto ocorre devido à diminuição significativa da tensão com o aumento de temperatura, enquanto que a corrente sofre uma pequena elevação.

A figura 3 mostra o fluxograma que foi implementado para simulação das curvas características I-V para geradores fotovoltaicos cristalinos.

O primeiro e o segundo passos, descritos no fluxograma da figura 3 (desenvolvimento da equação para cálculo de  $R_s$  e substituição de  $R_s$  na equação (1)), foram feitos, inicialmente, para depois, os valores dos parâmetros dos geradores fotovoltaicos, armazenados em banco de dados, serem substituídos nas equações. Os modelos de geradores foram numerados, de forma a facilitar sua escolha para simulação. Após a escolha do módulo fotovoltaico a ser analisado, deve-se fornecer a temperatura da célula fotovoltaica e a radiação solar para as quais se deseja testar o comportamento do gerador fotovoltaico. Dessa forma, o programa irá traçar as curvas I-V, automaticamente, para a temperatura e radiação desejadas, além de serem plotadas curvas a 25°C para a radiação solar solicitada e a 1000 W/m<sup>2</sup>. Em seguida,

são fornecidos os valores de  $R_s$  (resistência série),  $R_{sh}$  (resistência paralela) e  $n$  (fator de idealidade do diodo) para uma temperatura de 25°C, a 1000 W/m<sup>2</sup>. O programa também exibe o valor do erro máximo entre os dados simulados e os das curvas de fabricantes digitalizadas.



**Figura 3.** Fluxograma para programa de simulação de curvas características I-V para geradores fotovoltaicos cristalinos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo-se todos os dados e parâmetros necessários para o esboço das curvas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_s$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{SC}$  e  $I_{mp}$ ), pôde-se simular, no Matlab versão 6.5, o gerador fotovoltaico desejado, tanto no formato .m (Matlab), quanto no .mdl (Matlab - Simulink). A figura 4 mostra o diagrama de blocos do Simulink que descreve o módulo fotovoltaico.

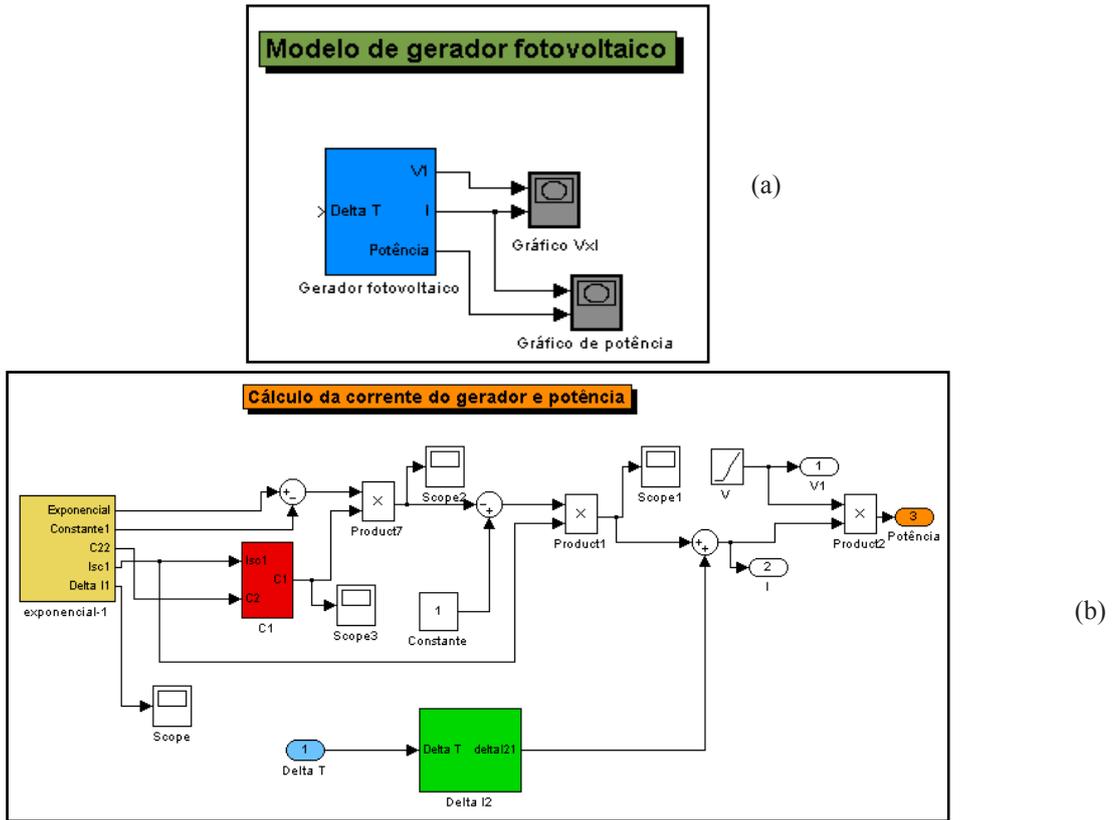
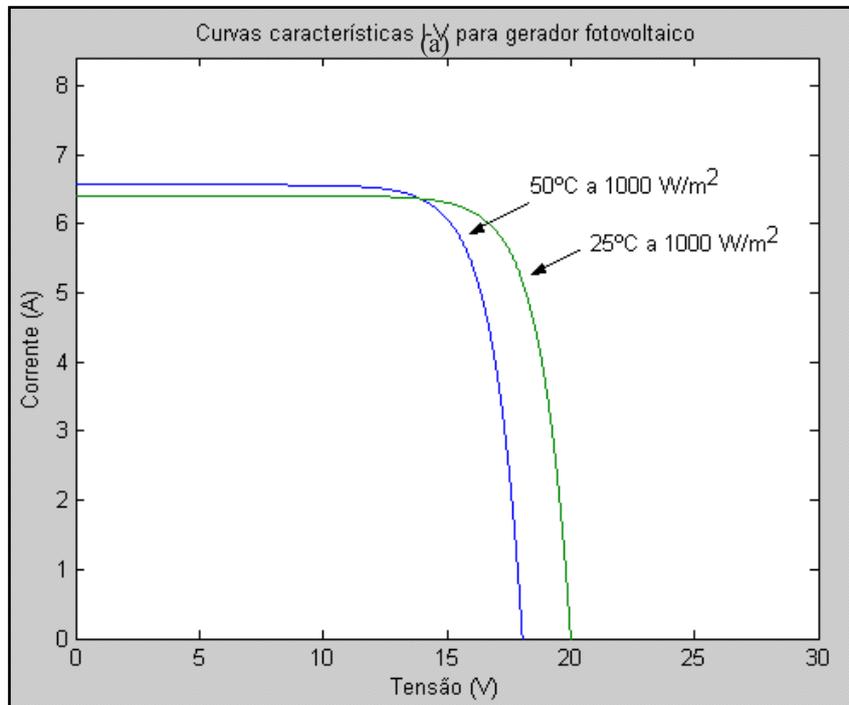


Figura 4. Diagrama de simulação para gerador fotovoltaico, baseado na Equação 1 no Matlab® versão 6.5.<sup>6</sup>

Neste programa, as curvas de V-I (tensão x corrente) são mostradas tão logo a simulação seja executada.

Para exemplificar, a figura 5 mostra as curvas de potência e de tensão versus corrente para o gerador fotovoltaico modelo ASE-100-ATF/17 (100), para a radiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, a 25°C e a 50°C.



(a)

6 (a) Vista do subsistema que compõe o gerador fotovoltaico para esboço das curvas de potência e característica I-V; (b) Vista do diagrama de blocos que compõe o subsistema da letra a.

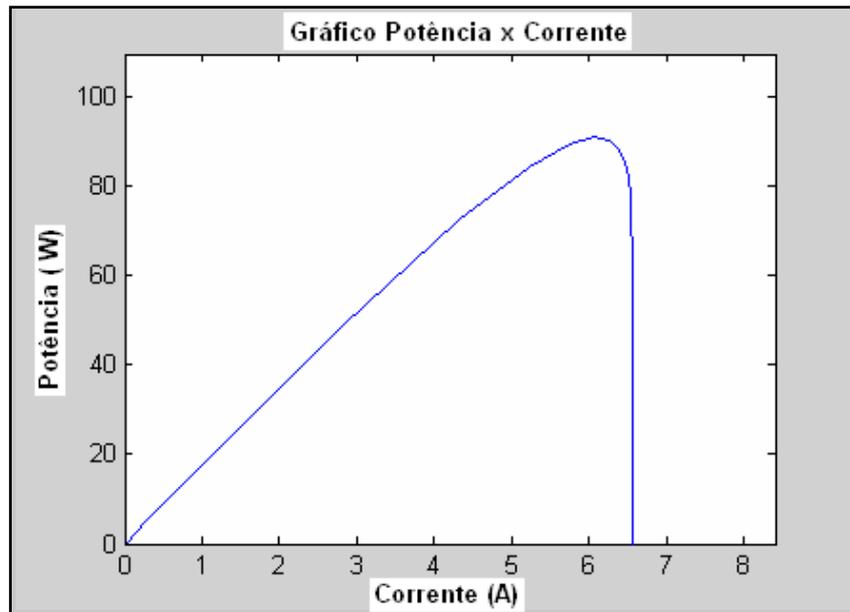


Figura 5. Resultado da simulação para o gerador fotovoltaico modelo ASE-100-ATF/17 (100).<sup>7</sup>

(b)

A figura 5 mostra as curvas de simulação para o gerador fotovoltaico modelo ASE-100-ATF/17 (100), tanto as características I-V, quanto a de potência. Observa-se que, comparando-se com as curvas da figura 2, as simuladas apresentam o mesmo perfil com valores praticamente iguais.

Foi calculado o erro máximo entre as curvas simuladas e as que foram fornecidas pelo fabricante (estas foram digitalizadas, sendo os pontos das curvas armazenados em banco de dados). O erro máximo calculado foi de 0,96%. Com isso, percebe-se que o modelo utilizado para simulação de geradores fotovoltaicos cristalinos é válido.

Com este modelo, pode-se, futuramente, conectar o gerador fotovoltaico ao modelo de uma bateria e controlador de carga, e desta forma simular um sistema fotovoltaico, analisando seu funcionamento, controlando e melhorando sua eficiência, além de poder estudar e simular seu dimensionamento estocástico.

Verifica-se que a simulação é de grande ajuda para a análise do funcionamento de um sistema fotovoltaico contribuindo para a redução de seus custos, já que se pode prever e avaliar situações das mais diversas, em prol do melhoramento de configuração e o desempenho do sistema.

## CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu a modelagem e simulação para geradores fotovoltaicos utilizando-se o programa Matlab®, versão 6.5. Por meio de dados fornecidos por fabricantes pôde-se obter um modelo para módulos fotovoltaicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASE American Solar Module, Datasheet Módulo ASE-100-ATF/17 (100), <http://www.solaraenergy.com/Downloads/ase100.pdf>, 10 fev.2009.

CRESESB – CEPEL; **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**; Coleção Tópicos de Atualização em Equipamentos Elétricos; Rio de Janeiro, 1999, p. 204.

HECKTHEUER, L. A.; **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**; Tese de Doutorado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2001.

KRENZINGER, A.; BLAETH, Y. B.; WISBECK, J. O.; Seguidor Dinâmico de Máxima Potência para Painéis Solares; In: XIV Congresso Brasileiro de Automática, 2002, Natal-RN, pp. 985-990, Setembro, 2002.

<sup>7</sup> (a) Curvas características I-V a uma radiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, a 25°C e a 50°C; (b) Curva para a potência fornecida pelo gerador fotovoltaico versus corrente a 1000 W/m<sup>2</sup>, a 50°C

SALAMEH, Z. M.; BOROWY, B. S.; AMIN, A. R. A.; Photovoltaic Module-Site Matching Based on the Capacity Factors; **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 10, No. 2, pp. 326-332, June, 1995.

SANTOS, W. L.; RAMOS, M. M.; **Software para**

**Aquisição de Coordenadas**, Universidade Federal de Viçosa (UFV), 1997. URL: <http://www.ufv.br> .

SINGH, P., et al., Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol.92, n.12: p. 1611-1616, 2008.