

IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS POR ALGORITMOS GENÉTICOS

Wagner Teixeira da Costa – wagnercosta@cefetes.br

Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, Unidade Serra, Automação Industrial

Jussara Farias Fardin – jussara@ele.ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Elétrica

Lauro de Vilhena Brandão Machado Neto – lvilhena@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, GREEN SOLAR

Resumo. Neste trabalho foi realizada a identificação dos parâmetros de modelos para geradores fotovoltaicos utilizando algoritmo genético. O algoritmo genético é uma técnica de busca baseada em mecanismos da seleção natural e genética. Para identificação dos parâmetros utilizou-se o software Matlab® para digitalização de curvas dos fabricantes, simulação e análise do comportamento do modelo em relação à variação de intensidade solar e temperatura. A partir das curvas digitalizadas obtêm-se os dados de referência para o modelo cujos parâmetros são estimados pelo algoritmo genético, além disso, o algoritmo genético também pode estimar os dados não fornecidos pelos fabricantes.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos, Gerador Fotovoltaico, Identificação de Sistemas

1. INTRODUÇÃO

O sol é uma fonte perene, silenciosa, gratuita e não poluente de energia e é responsável por todas as formas de vida no planeta. O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol (Cepel, 1999).

O sol tem grande importância para o planeta Terra, seus raios atingem a órbita terrestre poucos minutos depois de abandonarem a superfície do Sol, percorrendo, aproximadamente, 150 milhões de quilômetros. A passagem pela atmosfera faz com que a radiação chegue à superfície da Terra com uma intensidade de potência cerca de 35% menor que a exibida na estratosfera. Num dia claro, a potência luminosa no nível do solo é de, aproximadamente, 1000 W/m². O Brasil é privilegiado no seu potencial energético solar, que é em torno de 2500 MW, cinco vezes maior que o dos Estados Unidos e maior que a maioria dos países de primeiro mundo (Farret, 1999).

A conversão da energia solar em energia elétrica pode ser feita através de processo termoeletrônico ou utilizando o efeito fotovoltaico, sendo este último o processo abordado neste trabalho. São amplas as possibilidades de aproveitamento da energia fotovoltaica, por exemplo, (Farret, 1999):

- Iluminação residencial;
- Iluminação pública;
- Sinalizador estroboscópico;
- Iluminação de embarcações fluviais e marítimas;
- Telecomunicações;
- Controle de pragas;
- Satélites;
- Suprimento de água e sistemas de microirrigação;
- Conservação de alimentos e medicamentos;
- Suprimento de energia elétrica, em regiões desprovidas de redes de distribuição de energia.

O efeito fotovoltaico foi relatado pela primeira vez em 1839 por Edmund Becquerel que observou o aparecimento de uma tensão entre eletrodos imersos em eletrólito, cujo valor dependia da intensidade da luz incidente (Demonti, 2003).

O processamento da energia fotovoltaica é feito através de geradores fotovoltaicos. Os geradores fotovoltaicos podem ser produzidos pelos seguintes semicondutores: o silício cristalino c-Si; o silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio CuInSe₂ ou CIS (Martins, 2005).

A Fig. 1 ilustra um sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica. Este sistema inclui um controlador de carga.

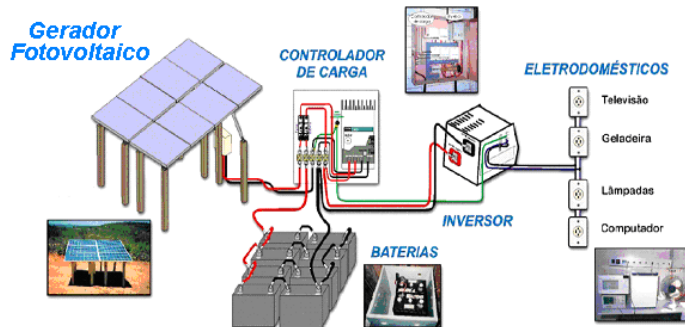


Figura 1 – Sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica (Cepel, 1999).

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um gerador são a irradiância e a temperatura do gerador. A corrente gerada no painel aumenta linearmente com o aumento da irradiância e a tensão diminui com o aumento de temperatura, como ilustra a Fig. 2 (Cepel, 1999).

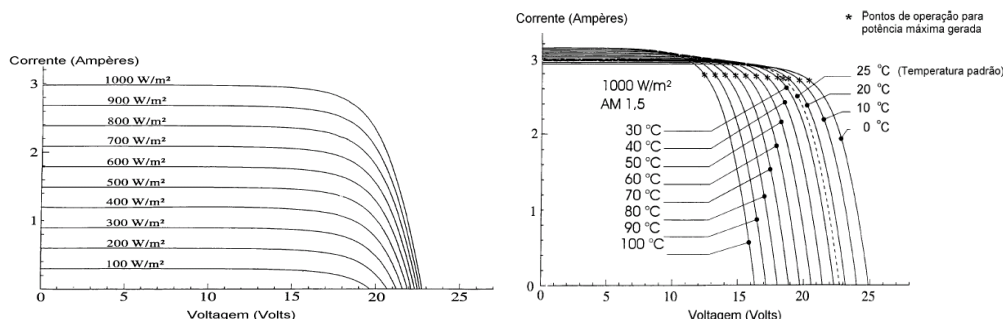


Figura 2 – Curvas características IxV para um gerador fotovoltaico (Cepel, 1999).

O aumento da irradiância no painel aumenta o ponto de operação para potência máxima gerada, entretanto o aumento de temperatura faz com que esta potência diminua como mostra a Fig. 3 (Lamaison, 2001).

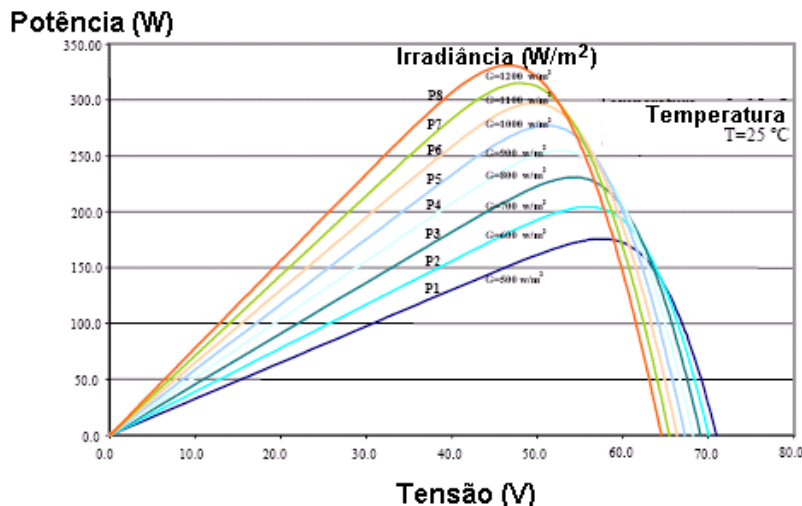


Figura 3 – Curvas características PxV para um gerador fotovoltaico (Lamaison, 2001).

A função do controlador é fazer com que o gerador fotovoltaico opere no ponto de máxima potência, considerando as variações de irradiância e temperatura. Para o desenvolvimento do sistema de controle é necessário conhecer os parâmetros do modelo do gerador fotovoltaico. Neste trabalho, foi realizada a identificação dos parâmetros do modelo de geradores fotovoltaicos utilizando algoritmos genéticos.

Os algoritmos genéticos são algoritmos de busca baseados em mecanismos da seleção natural e genética. Sem as limitações encontradas nos métodos tradicionais, os algoritmos genéticos se mostram muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, em uma grande variedade de problemas (Linden, 2006).

2. GERADOR FOTOVOLTAICO

2.1 Circuito Equivalente

O circuito equivalente tradicional de um gerador pode ser representado por uma fonte de corrente em paralelo com dois diodos (D1 e D2), (Gow, 1996), e um resistor (Rp), todo este circuito em série com um resistor (Rs), como ilustra a Fig. 4. Em vários casos, é difícil determinar os seis parâmetros para o modelo com dois diodos.

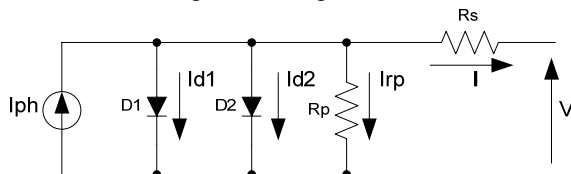


Figura 4 – Circuito equivalente de um gerador para modelo com dois diodos e com uma resistência paralela e uma em série.

O modelo do gerador com dois diodos apresentado em (Gow, 1996) é um modelo sofisticado e pode ser aproximado para o modelo de um diodo descrito em (Hua, 1998) (Jung, 2005) (Walker, 2001) (Cabral, 2004), como mostra a Fig. 5.

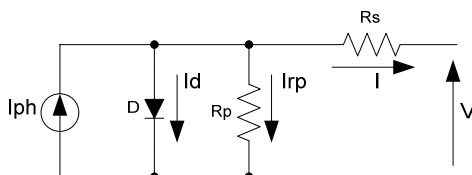


Figura 5 – Circuito equivalente de um gerador para modelo com um diodo e com uma resistência paralela e uma em série.

Alguns autores (Xiao, 2004) (Patel, 2006) (Júnior, 2006) consideram Rp muito grande eliminando o seu efeito, simplificando o modelo do gerador, como ilustra a Fig. 6.

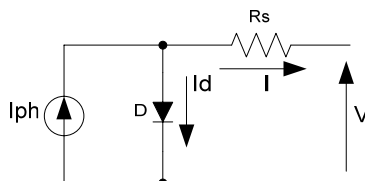


Figura 6 – Circuito equivalente de um gerador para modelo com um diodo e com uma resistência série.

2.2 Equações

O circuito equivalente da Fig. 6 é descrito pela Eq. (1) como:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+R_s I}{n_s m V_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$V_T = \frac{k T c}{q} \quad (2)$$

Sendo:

- I_{ph} – Fotocorrente gerada (A);
- I_0 – Corrente de saturação reversa (A);
- V_T – Tensão térmica (V);
- n_s – Número de células em série
- m – Fator de idealidade do diodo;
- R_s – Resistência série (Ω);
- I – Corrente do gerador (A);
- V – Tensão do gerador (V);

- k – Constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ J/K);
- q – Carga elementar do elétron ($1,609 \times 10^{-19}$ C);
- Tc – Temperatura no gerador (K).

Para o cálculo de I_{ph} e I_0 é necessário o conhecimento da tensão de circuito aberto (V_{oc}) e da corrente de curto circuito (I_{cc}), demonstrado em (Neto, 2006). V_{oc} e I_{cc} variam de acordo com a temperatura e irradiância e podem ser expressos por:

$$I_{cc}(G_c, T_c) = \left(\frac{G_c}{G_r} \right) [I_{ccr} + \alpha(T_c - T_r)] \tag{3}$$

$$V_{oc}(T_c) = V_{ocr} + \beta(T_c - T_r) + \ln \left(\frac{G_c}{G_r} \right) \tag{4}$$

Nas quais:

- G_c – Irradiância no gerador (W/m^2);
- G_r – Irradiância de referência ($1000 W/m^2$);
- I_{ccr} – I_{cc} de referência para irradiância de $1000 W/m^2$ e temperatura de $25^\circ C$;
- α - Coeficiente de temperatura de I_{cc} ($A/^\circ C$);
- T_r – Temperatura de referência ($25^\circ C$);
- T_c – Temperatura no gerador ($^\circ C$);
- V_{ocr} – V_{oc} de referência para irradiância de $1000 W/m^2$ e temperatura de $25^\circ C$;
- β – Coeficiente de temperatura de V_{oc} ($V/^\circ C$);

Os valores de referência podem ser retirados dos *datasheets* dos fabricantes.

O algoritmo genético é uma técnica de busca que pode ser aplicada em problemas com diversos parâmetros que necessitam ser ajustados em busca de uma solução ideal. A utilização do algoritmo genético no modelo do gerador fotovoltaico tem como objetivo a identificação de alguns parâmetros, como, m e R_s , definidos na Eq. (1). Além disso, o algoritmo genético pode ser utilizado na identificação dos parâmetros α e β , definidos na Eq. (3) e (4), quando esses dados não forem fornecidos pelos fabricantes.

Muitos autores não levam em consideração a variação de irradiância e temperatura em algumas variáveis, mantendo-as constante, como por exemplo, m e R_s . Com a utilização do algoritmo genético, pode-se determinar a variação de R_s em relação à temperatura, como mostra a Eq. (5) (Neto, 2007).

$$R_s = R_{sn}[1 - \delta(T_c - T_r)] \tag{5}$$

Sendo:

- R_{sn} – Resistência nominal (Ω);
- δ – Constante ($\Omega/^\circ C$).

O efeito da variação de m e de R_s é mostrado na Fig. 7. Para o mesmo gerador, estes valores modificam a curva, alterando o ponto de máxima potência.

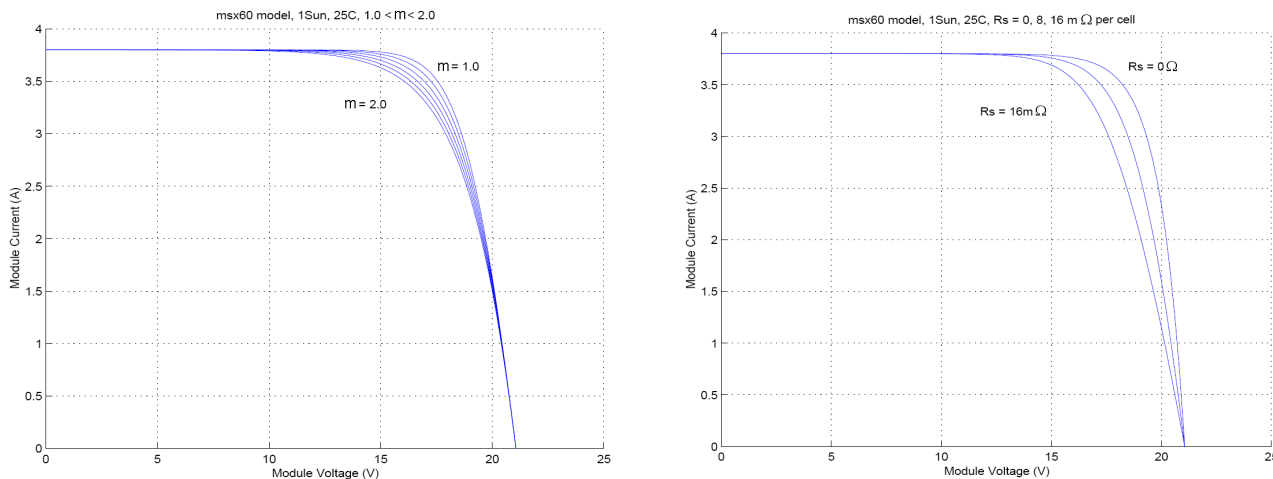


Figura 7 – Efeito da variação do fator de idealidade do diodo e da resistência em série (Walker, 2001).

3. ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos genéticos constituem uma técnica de busca e otimização, altamente paralela, inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética (Goldberg, 1989). São algoritmos probabilísticos que fornecem um mecanismo de busca paralela e adaptativa baseado no princípio de sobrevivência dos mais aptos e na reprodução (Pacheco, 1999).

Nos algoritmos genéticos as populações de indivíduos são criadas e submetidas aos operadores genéticos: seleção, recombinação (*crossover*) e mutação. Estes operadores utilizam uma caracterização da qualidade de cada indivíduo como solução do problema (avaliação) e vão gerar um processo de evolução natural destes indivíduos, que eventualmente deverá gerar um indivíduo que caracterizará uma boa solução, ou a melhor possível, para o problema (Linden, 2006).

3.1 Representação

A representação das possíveis soluções do espaço de busca de um problema define a estrutura do cromossomo a ser manipulado pelo algoritmo. A representação do cromossomo depende do tipo de problema e do que, essencialmente, se deseja manipular geneticamente (Pacheco, 1999). Neste trabalho utilizou-se a representação real.

3.2 *Crossover*

O operador de *crossover* é considerado característica fundamental do algoritmo genético. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente na população, baseado na aptidão, e novos indivíduos são criados a partir da troca do material genético. Os descendentes serão diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os genitores (Pacheco, 1999). Neste trabalho utilizou-se o *crossover* de um ponto.

3.3 Mutação

Mutação é uma operação onde algumas características de um indivíduo são aleatoriamente modificadas, levando a um novo indivíduo. A operação é simples e consiste mudar aleatoriamente, com probabilidade baixa, o valor de um do indivíduo. O objetivo do operador de mutação é resolver o problema da convergência genética. (Linden, 2006).

3.4 Seleção

Basicamente o objetivo da seleção é escolher os melhores indivíduos da população corrente através de uma função de aptidão. Os indivíduos com um alto valor de aptidão terão uma alta probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes na próxima geração.

3.5 Avaliação

A função de avaliação é a maneira utilizada pelos algoritmos genéticos para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema. Calcula-se um valor numérico que reflete quão bem os parâmetros representados no cromossomo resolvem o problema (Linden, 2006). A função de avaliação utilizada neste trabalho foi o erro quadrático médio entre a corrente simulada com os valores da corrente obtida pela digitalização das curvas fornecidas pelos fabricantes.

3.6 Algoritmo

Um algoritmo genético pode ser descrito como um processo contínuo que repete ciclos de evolução controlados por um critério de parada, conforme apresentado pela Fig. 8 (Pacheco, 1999). Este processo pode ser resumido algoritmicamente da seguinte forma:

Passo 1 – Inicializar a população de cromossomos;

Passo 2 – Avaliar cada cromossomo na população;

Passo 3 – Selecionar os pais para gerar novos cromossomos;

Passo 4 – Aplicar os operadores de recombinação e mutação a estes pais de forma a gerar os indivíduos da nova geração;

Passo 5 – Eliminar os membros mais velhos da população. Neste trabalho apagam-se os piores indivíduos;

Passo 6 – Avaliar todos os novos cromossomos e inserir na população. Neste trabalho utilizou-se o elitismo;

Passo 7 – Se tempo acabou, ou o melhor cromossomo satisfaz os requerimentos de desempenho, finalizar o algoritmo, caso contrário, voltar ao passo 3.

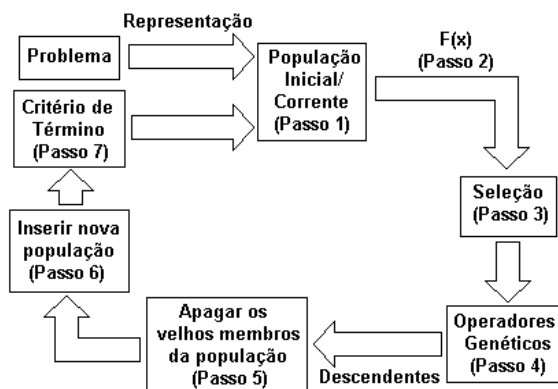


Figura 8 – Processo do algoritmo genético (Pacheco, 1999).

4. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

4.1 Digitalização das Curvas

As curvas fornecidas pelos fabricantes foram digitalizadas utilizando o *toolbox* de imagens do Matlab®. A Fig. 9 mostra as curvas do gerador fotovoltaico KC50 da *Kyocera* obtida no *datasheet*.

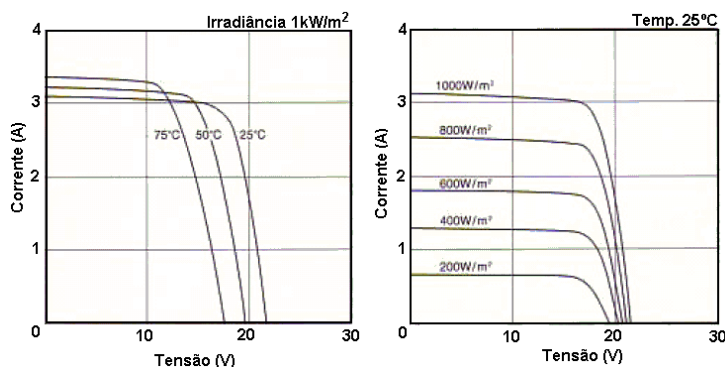


Figura 9 – Curvas do Gerador KC50 da *Kyocera* (KC50)

Com a digitalização das curvas podem-se obter vários pontos para diversas irradiâncias e temperaturas. A seguir, para exemplificar, são apresentadas as curvas que foram digitalizadas e a modelagem para o módulo fotovoltaico modelo KC50 da *Kyocera*. A Fig. 10 ilustra as curvas digitalizadas I x V com variação de temperatura e irradiância.

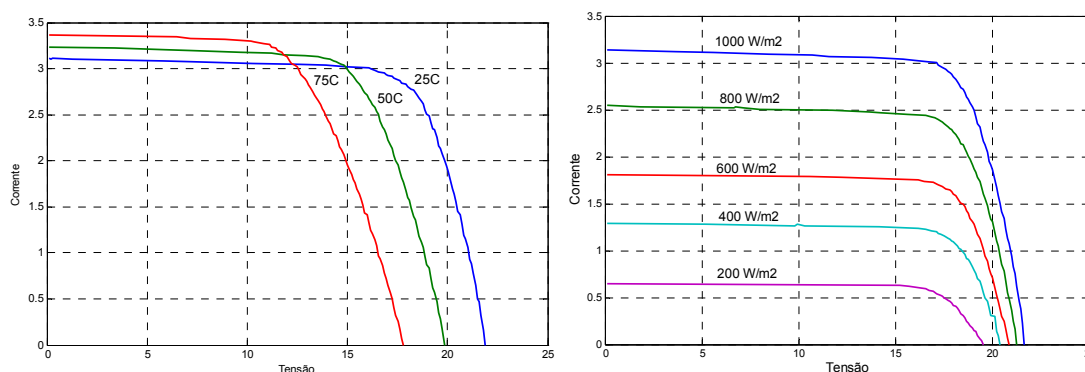


Figura 10 – Curvas Digitalizadas do Gerador KC50 da *Kyocera*.

4.2 Resultados Numéricos

O algoritmo genético foi aplicado ao gerador fotovoltaico KC50, cujos dados fornecidos pelo fabricante são mostrados na Tab.1.

Tabela 1. Dados do gerador KC50 fornecidos pelo fabricante.

Parâmetros	Resultados
I _{cc}	3,10 A
V _{oc}	21,50 V
α	$2,53e^{-3}$ A/°C
β	$-8,24e^{-2}$ V/°C
Gr	1000 W/m ²
Tr	25°C
ns	36
Tolerância	±5%

As taxas utilizadas no algoritmo genético são mostradas na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros do algoritmo genético.

Parâmetros	Valores
Representação	Real
Tamanho da população	50
Taxa de <i>crossover</i>	65%
Taxa de mutação	0,5%
Geração	30

A função de avaliação é descrita pela Eq. (6), na qual se deseja obter o valor mínimo.

$$Fa = \frac{1}{n} \sum (Is - Ir)^2 \tag{6}$$

Sendo:

Fa – Função de avaliação;

n – Quantidade de dados;

Is – Corrente simulada;

Ir – Corrente real fornecida pelo fabricante.

Os parâmetros estimados pelo algoritmo genético estão na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros identificados pelo algoritmo genético.

Parâmetros	Resultados
m	1, 5
R _{sn}	0,19
δ	0,012

Estes valores estimados pelo o algoritmo genético são os que mais aproximam das curvas dadas pelo fabricante, ou seja, a função de avaliação é a menor possível, mais próxima de zero. A Fig. 11 mostra o gráfico de comparação entre as curvas obtidas com os parâmetros estimados, curvas simuladas, e as curvas digitalizadas.

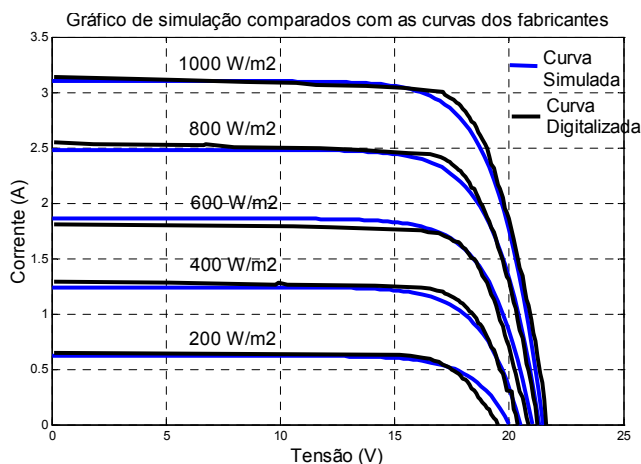


Figura 11 – Curvas simuladas comparadas com as curvas digitalizadas.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu a modelagem e simulação de geradores fotovoltaicos a partir da identificação de parâmetros através de algoritmo genético. Com os dados de referência fornecidos por fabricantes pode-se obter um modelo para os geradores.

A utilização do algoritmo genético na identificação dos parâmetros do gerador fotovoltaico obteve bons resultados. Além disso, esta metodologia foi aplicada em outros geradores da *Kyocera* e nos geradores da *PhotoWatt*, obtendo também bons resultados.

O algoritmo genético é de grande auxílio nos cálculos dos parâmetros, mesmo que alguns dados de referência não sejam fornecidos pelos fabricantes, como por exemplo α e β , cuja estimação também pode ser feita pelo algoritmo. Possibilita também a determinação do modelo mais completo, levando em consideração o efeito da temperatura em alguns parâmetros.

REFERÊNCIAS

- Cabral, C. V. T; Neto, L. V. B. M; Filho, D. O; Diniz, A. S. A. C. “Modelagem e Simulação de Gerador Fotovoltaico”. Congresso Brasileiro de Automática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- CEPEL. “Energia Solar Princípio e Aplicações”. CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, CEPEL Sistema Eletrobrás. 1999.
- Demonti, R. “Processamento da Energia Elétrica Proveniente de Módulos Fotovoltaicos”. Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Fevereiro 2003.
- Farret, F. A. “Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia”. Editora UFSM, Santa Maria, 1999.
- Goldberg, D. E. “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley 1989.
- Gow, J. A; Manning, C. D. “Development of a Model for Photovoltaic Arrays Suitable for use in Simulation Studies of Solar Energy Conversion Systems”. Power Electronics and Variable Speed Drives, 23-25 September 1996, Conference Publication, nº 429, @IEEE, 1996.
- Hua, C; Lin, J; Shen. “Implementation of DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking”. IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 45, nº 1, February 1998.
- Jung, Y; So, J; Yu, G; Choi, J. “Improved Perturbation and Observation Method (IP&O) of MPPT Control for Photovoltaic Power Systems”. IEEE, 2005.
- Júnior, P. V; Silva, D. M. B; et al. “Controle Digital aplicado a Células Fotovoltaicas para Localização do Ponto de Máxima Potência”. Induscon, 2006.
- Lamaison, R. M; Vivas, S; Peracaula, Juan. “A Solar Battery Charger for two Modes of Operation using a dc-dc Buck Converter Based on a Fuzzy Logic Controller”. UPC – Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain, 2001.
- Linden, R. “Algoritmos Genéticos” Editora Brasport, 2006.
- KC50 - HIGHE FFICIENCPYO LYCBYSTAL, Kyocera Corporation. *Datasheet*.
- Neto, L. de V. B. M. “Caracterização de Geradores Fotovoltaicos e Desenvolvimento de Seguidor de Potência Máxima para Sistemas”. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil, 2006.
- Martins, D. C. “Novas Perspectivas da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil”. Mini-Curso. 8º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP.
- Pacheco, M. A. C. “Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações”. ICA – Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.
- Patel, M. R. “Wind and Solar Power Systems Design, Analysis, and Operation”. Second Editon. Taylor & Francis, 2006.
- Walker, G.”Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model”. Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC'00, Brisbane, 2001.
- Xiao,W; Dunford, W. G; Capel, A. “A Novel Modeling for Photovoltaic Cells”. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

IDENTIFICATION PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC GENERATOR MODEL FROM GENETIC ALGORITHMS

Abstract. *This paper was performed to identify the parameters of photovoltaic generator model using genetic algorithm. The genetic algorithm is a search technique based on mechanisms of natural selection and genetics. To identify the parameters was used the Matlab® software for scanning curves of manufacturers, simulation and analysis of the behavior of the model in relationship to variations in solar intensity and temperature. Data are obtained from scanned curves for a model whose parameters are estimated for genetic algorithm, moreover, genetic algorithm also can estimate data not provided by manufacturers.*

Key words: Genetic Algorithms, Photovoltaic Generator, Identification Systems.