

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PARA MODELAGEM DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO ALGORITMO DE LEVENBERG-MARQUARDT MODIFICADO

Ricardo Augusto Pereira Franco – ricardofranco3@gmail.com

Flávio H. T. Vieira – flavio@emc.ufg.br

Marcelo S. Castro – mcastro@emc.ufg.br

Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Resumo. Este artigo propõe um método de estimação de parâmetros e de simulação de painéis fotovoltaicos. O modelo utilizado para a representação do painel fotovoltaico é o modelo de um diodo e duas resistências. Uma das contribuições deste trabalho é a estimação de parâmetros (resistência série e paralelo) do painel fotovoltaico através de um algoritmo que minimize o erro quadrático da curva estimada com a curva característica I-V real. A curva real é amostrada a partir do datasheet do fornecedor, incluindo os pontos fornecidos (corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e corrente e tensão de máxima potência). Propõe-se neste trabalho uma variação do algoritmo de Levenberg-Marquardt para minimização do erro entre as curvas e, ao mesmo tempo, passando pelo ponto de máxima potência do painel. Os resultados obtidos com o algoritmo proposto para os parâmetros do modelo são comparados com os de outros trabalhos da literatura. A eficácia desta abordagem também é validada comparando-se a curva I-V obtida com a curva real e aquelas dadas por outros modelos da literatura. Por fim, são apresentados os resultados relacionados ao comportamento do módulo fotovoltaico com os parâmetros estimados.

Palavras-chave: Estimação de parâmetros, sistema fotovoltaico, curva característica

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica demonstra a dependência da sociedade por este tipo de energia. O setor elétrico vem desenvolvendo novos sistemas para aumentar a confiabilidade na rede elétrica, aprimorando suas funcionalidades e sua infraestrutura. Atualmente, a energia elétrica se tornou foco de estudos, verificando que a demanda é crescente, além do fato que crises nos principais meios de produção de energia elétrica (como visto recentemente no Brasil) acarretam problemas para a sociedade toda. Há, também, a preocupação com o impacto ambiental na geração de energia, impactos estes que podemos citar a elevação da temperatura como um dos tópicos mais abordados (Aramizu, 2010), (da Costa, 2010). Portanto, a geração de energia através da luz solar é uma medida que beneficia tanto a concessionária de energia, o consumidor e o meio ambiente.

A geração de energia solar é uma fonte renovável de energia elétrica. Essa geração é realizada por meio da captação da radiação solar, que pode ser utilizada como uma fonte de energia térmica, na qual é feita sua conversão em energia elétrica (Aramizu, 2010). Em uma célula fotovoltaica, ocorre o efeito fotovoltaico, responsável por essa conversão da radiação solar em energia elétrica. Neste efeito, há a excitação de elétrons, devido às características de alguns materiais semicondutores na presença de luz solar, ocorrendo o efeito fotovoltaico e gerando a corrente elétrica desse sistema.

A célula fotovoltaica pode ser representada por meio da modelagem de um circuito elétrico que possua um comportamento semelhante ao que se deve representar. Essa modelagem é essencial, pois projetos de sistemas fotovoltaicos são caros e, assim, é essencial realizar uma simulação precisa e confiável do sistema a ser instalado. Portanto, é interessante, para sistemas fotovoltaicos, o desenvolvimento de modelos que simulem as características das células (Majdoul, et al., 2015). Existem na literatura vários modelos que representam uma célula fotovoltaica variando sua complexidade. O grau de complexidade do modelo irá definir quais são as expressões matemática mais adequadas para o modelo (Blas, et. al., 2002). Para este trabalho, o modelo da célula utilizado foi a representação com uma fonte de corrente, um diodo, uma resistência série e uma resistência shunt (paralelo), apresentado na Fig. 1.

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas, na qual terão comportamentos distintos dependendo de cada fornecedor. Na modelagem dos painéis, existem alguns parâmetros do modelo que não são concedidos pelos fornecedores desses painéis, ou seja, o valor de alguns parâmetros são desconhecidos e, consequentemente, deverão ser determinados ou estimados para a modelagem e simulação do sistema fotovoltaico. O fornecedor disponibiliza algumas informações a respeito do painel/célula fotovoltaica, essas informações estão disponíveis em seu *datasheet*.

Vários trabalhos foram realizados nesta área para calcular os valores desses parâmetros, geralmente encontramos trabalhos que utilizam métodos analíticos ou numéricos. Alguns trabalhos que utilizam a abordagem analítica são: (Gong, et. al., 2013), (Ortiz-Conde, et. al., 2006); alguns trabalhos que utilizam a abordagem numérica são: (Cubas, et. al., 2014), (Jervase, et. al., 2001), (Chegaar, et. al., 2004); em (Majdoul, et al., 2015) é combinado técnicas analíticas e numéricas para a estimação dos parâmetros; e outros trabalhos utilizam técnicas da inteligência artificial como, por exemplo, enxame de partículas (Ye, et. al., 2009), (Huang, et. al., 2011), algoritmos genéticos (Jervase, et. al., 2001),

(da Costa, 2010) e evolução diferencial (Gong, et. al., 2013), (Ishaque, et. al., 2011). Visto que a estimação dos parâmetros é um problema multivariável, multimodal e não linear, com vários ótimos locais (Majdoul, et.al., 2015), é complexa a tarefa de estimação, podendo existir técnicas com resultado mais satisfatório das utilizadas até o momento.

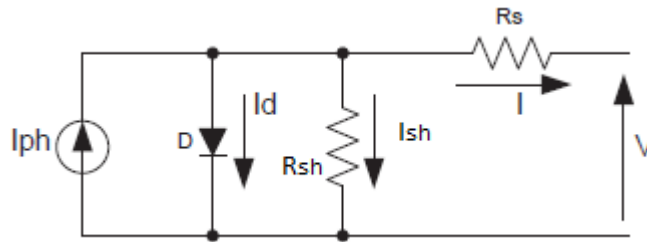


Figura 1 - Circuito elétrico equivalente do modelo um diodo e resistência série e paralelo.

Neste trabalho, propomos um algoritmo que otimize a estimação de parâmetros utilizando amostras da curva I-V do painel fotovoltaico disponibilizadas no *datasheet* do painel. Os parâmetros a serem estimados são as duas resistências (resistência série e resistência paralelo) presente no modelo utilizado (Fig. 1). A estimação dos parâmetros é realizada por uma variação do algoritmo de Levenberg-Marquardt e seus resultados são comparados com os resultados de outros trabalhos. O diferencial entre este trabalho para os demais é a minimização do erro quadrático médio dos pontos amostrados pela curva característica I-V. A estimação dos parâmetros, portanto, é realizada em função de toda a curva I-V e não apenas do ponto de máxima potência, gerando valores mais próximos do real; visto que os demais trabalhos realizam a estimação utilizando equações analíticas e métodos numéricos manipulando em função do ponto de máxima potência e calculando os parâmetros através de métodos iterativos.

O trabalho está dividido da seguinte forma: na seção 2 são apresentados a modelagem e o equacionamento do modelo fotovoltaico com um diodo; a seção 3 contém uma breve descrição do algoritmo de otimização utilizado (Levenberg-Marquardt) e da modificação proposta; os resultados são apresentados na seção 4; a conclusão do trabalho é apresentada na seção 5.

2. MODELO FOTOVOLTAICO

A escolha do modelo de uma célula fotovoltaica irá influenciar nos parâmetros a serem estimados. No modelo mais simples, a célula é representada por um circuito elétrico com uma fonte de corrente e um diodo em paralelo e, para uma de suas configurações mais complexas, a célula pode ser representada por uma fonte de corrente em paralelo com dois diodos e uma resistência em série e outra em paralelo. O modelo adotado neste trabalho, possui uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e uma resistência, que estão em série com uma outra resistência, conforme apresentado na Fig. 1.

A resistência em série representa as perdas dos contatos metálicos do módulo fotovoltaico e a resistência em paralelo representa as correntes de fuga (parasitas) que circulam no módulo (da Costa, 2010).

Após escolher um dos modelos para representar a célula fotovoltaica, podemos representar a equação da curva característica I-V da seguinte forma:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n_s m V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

onde:

I_{ph} é a corrente fotovoltaica (A);

I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo de difusão (A);

n_s é o número de células em série que constituem o módulo;

m é o fator de idealidade do diodo (adimensional, variando entre 1 e 2);

V_t é a tensão térmica (V);

R_s é a resistência em série (Ω);

R_{sh} é a resistência em paralelo ou shunt (Ω).

Na Eq. (1) existem outros dois parâmetros que não possuímos seu valor, a variável adimensional m e a corrente de saturação reversa do diodo de difusão I_0 . Neste trabalho foi utilizada a equação apresentada em (da Costa, 2010) para o cálculo da corrente de saturação reversa do diodo. Já o fator de idealidade do diodo (m), foi considerado o valor de 1,3 devido ao fato que os demais trabalhos utilizaram este valor (Cubas, et. al., 2014), (Villalva, et. al., 2009), (Majdoul, et.al., 2015). Portanto, sabendo os valores a serem obtidos de corrente e tensão por meio da amostragem da curva característica presente no *datasheet* do módulo, utiliza-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt modificado para estimar o valor das duas resistências minimizando o erro entre a curva gerada e os pontos amostrados.

3. ALGORITMO LEVENBERG-MARQUARDT

O problema abordado neste trabalho se define em encontrar um melhor ajuste entre um modelo e cada um dos pontos amostrados. Este problema está compreendido nos problemas de mínimos quadrados, cujo objetivo é minimizar a diferença da soma dos quadrados das distâncias (tomadas na vertical) obtidos na curva estimada e a curva característica I-V (pontos amostrados). Os resultados das diferenças entre a curva estimada e os pontos amostrados são chamados de resíduos.

Considere a função não linear:

$$\mathfrak{F}(Y) = X \quad (2)$$

onde X pertence ao conjunto dos números reais ($X \in \mathbf{R}^M$) e $Y \in \mathbf{R}^N$ são vetores e $M \geq N$. Neste caso, é necessário estimar o vetor \hat{Y} que melhor se ajuste ao vetor medido \check{X} . O problema pode ser redefinido como sendo: $\check{X} = \mathfrak{F}(\hat{Y}) + \mathbf{E}$; visto que, dado um vetor \check{X} , encontre um \hat{Y} que minimize $\|\mathbf{E}\|$ [5].

Neste trabalho, propomos acrescentar pesos aos erros obtidos com o algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) para a minimização de uma função objetivo que é está relacionada com os erros quadráticos da Eq. (1) (curva estimada) com os pontos amostrados. Assim, força-se que os parâmetros estimados façam com que a curva do modelo passe pelos pontos desejados de maior peso, no caso o ponto de máxima potência e o restante dos pontos da curva são dados de forma a reduzir o erro quadrático médio.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção, utilizando o *software* MATLAB, apresentamos os valores estimados dos parâmetros do modelo de um diodo do painel fotovoltaico com a representação de um diodo. No circuito simulado, foram estimados os valores para os parâmetros das duas resistências (R_s e R_{sh}) utilizando a equação transcendental, Eq. (1), para o cálculo da corrente I . Para a resolução da equação foi implementado o método de Newton-Raphson (Asano, et. al., 2009). Para os valores dos seguintes parâmetros: corrente de saturação reversa do diodo na temperatura de referência (I_{0r}), corrente de saturação reversa do diodo de difusão (I_0), a corrente fotovoltaica (I_{ph}); foram utilizadas, respectivamente, as equações analíticas Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5) (da Costa, 2010).

$$I_{0r} = \frac{I_{ph}}{\exp\left(\frac{V_{ca}}{n_s m V_t}\right) - 1} \quad (3)$$

$$I_0(T_c) = I_{0r} \left(\frac{T_c}{T_r}\right)^{3/m} \left\{ \exp\left[V_g \left(\frac{T_c}{T_r} - 1\right) / (m V_t)\right] \right\} \quad (4)$$

$$I_{ph}(G_c, T_c) = I_{cc}(G_c, T_c) = \frac{G_c}{G_r} [I_{ccr} - \alpha(T_c - T_r)] \quad (5)$$

onde temos:

V_{ca} é a tensão de circuito aberto (V);

T_c é a temperatura do módulo (K);

T_r é a temperatura de referência (273+25 K);

V_g é a energia da banda proibida (igual a 1,11 eV);

G_c é a irradiância do módulo (W/m²);

G_r é a irradiância de referência (1.000 W/m²)

I_{ccr} é a corrente de curto-circuito em condição padrão de teste (A);

α é o coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito.

A amostragem da curva característica para a estimação dos parâmetros foi realizada por meio da coleta de pontos da curva tensão-corrente do *datasheet* do módulo.

A estimação de parâmetros foi realizada para o módulo KC200GT da empresa Kyocera. A Tab. 1 apresenta os dados de referência providos pelo fornecedor utilizados neste trabalho. Esse painel foi escolhido como referência porque vários autores (Cubas, et. al., 2014), (Villalva, et. al., 2009), (Majdoul, et.al., 2015) já realizaram estudos acerca da estimação de parâmetros utilizando-o, na qual foram propostos métodos numéricos, analíticos ou métodos analítico-numéricos para a estimação de parâmetros.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo Kyocera KC200GT para as condições de irradiância 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potência	200,143 W
Tensão de Máxima Potência	26,3 V
Corrente de Máxima Potência	7,61 A
Tensão de Circuito Aberto	32,9 V
Corrente de Curto-Circuito	8,21 A
Número de células por módulo	54

Como já foi dito anteriormente, este trabalho utiliza para a estimação de parâmetros o algoritmo de Levenberg-Marquardt. O programa computacional implementado utiliza uma variação deste algoritmo para minimizar o erro quadrático dos pontos da curva característica estimada em relação aos pontos amostrados da curva característica real. Devido à minimização do erro quadrático, o algoritmo determina quais são os valores dos parâmetros (R_s e R_{sh}) que melhor descrevem a curva estimada em relação à curva real.

A Tab. 2 mostra os valores obtidos para as resistências estimados por este trabalho e pelos demais autores (Cubas, et. al., 2014), (Villalva, et. al., 2009), (Majdoul, et.al., 2015). Nos resultados deste trabalho, foi considerada uma precisão de até a quarta casa decimal, visando gerar resultados com grau de precisão elevado.

Tabela 2 - Valores estimados e valores de referência para o módulo Kyocera KC200GT para as condições de irradiância 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C.

PARÂMETROS E VALORES DE REFERÊNCIA	PARÂMETROS CALCULADOS POR ESTE TRABALHO	PARÂMETROS CALCULADOS POR CUBAS	PARÂMETROS CALCULADOS POR VILLALVA	PARÂMETROS CALCULADOS POR MAJDOUL
R_s	0.2131 Ω	0,2308 Ω	0,2210 Ω	0,2307 Ω
R_{sh}	350.00 Ω	597,39 Ω	415,41 Ω	603,83 Ω
I_{ph}	8.2050 A	8,2132 A	8,2140 A	8,2100
I_0	9,8944e-08 A	9,7631e-008 A	9,825e-008 A	9,8656e-008 A
m	1,3	1,3	1,3	1,3
V_m	26,3 V	26,3 V	26,3 V	26,3 V
I_m	7,61 A	7,61 A	7,61 A	7,61 A
$I_m[calculado]$	7,6100 A	7.6101 A	7.6088 A	7.6053 A
$V_m[calculado]$	26,3 V	26,3 V	26,3 V	26,3 V
<i>Erro Quadrático Médio</i>	0.1390	0.1366	0.1366	0.1508

Nota-se que os valores estimados por este trabalho se encontram próximos dos valores estimados pelos demais trabalhos, garantindo a confiabilidade do algoritmo utilizado. Observa-se, também, que os resultados para a resistência série e paralelo calculados por este trabalho se encontram mais próximos dos resultados determinados pelo trabalho (Villalva, et. al., 2009). Porém, percebe-se que os valores da corrente de máxima potência obtidos ($I_m[calculado]$) pelos demais trabalhos, não são iguais exatamente ao valor da corrente de máxima potência fornecida pelo *datasheet* (I_m), se considerarmos a precisão de até a quarta casa decimal. No presente trabalho, estima-se os parâmetros do painel e, com esses valores, obtém-se o valor da corrente de máxima potência calculada idêntico ao valor da corrente de máxima potência descrita pelo fornecedor.

Estimados os parâmetros, pode-se traçar a curva característica em conjunto com os pontos amostrados. A Fig. 2 apresenta a curva característica resultante da aplicação do algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt em conjunto com os pontos amostrados da curva característica provida pelo *datasheet*. Já na Fig. 3 é apresentado o erro quadrático (a diferença entre a corrente real e a estimada elevado ao quadrado) em função da tensão para todos os quatro trabalhos. Pode-se observar que o erro quadrático encontrado nesta abordagem foi bem próximo das demais. Entretanto, a abordagem proposta é a única que provê estimação dos parâmetros de modo a gerar a curva-característica que passe pelo ponto de máxima potência com maior precisão.

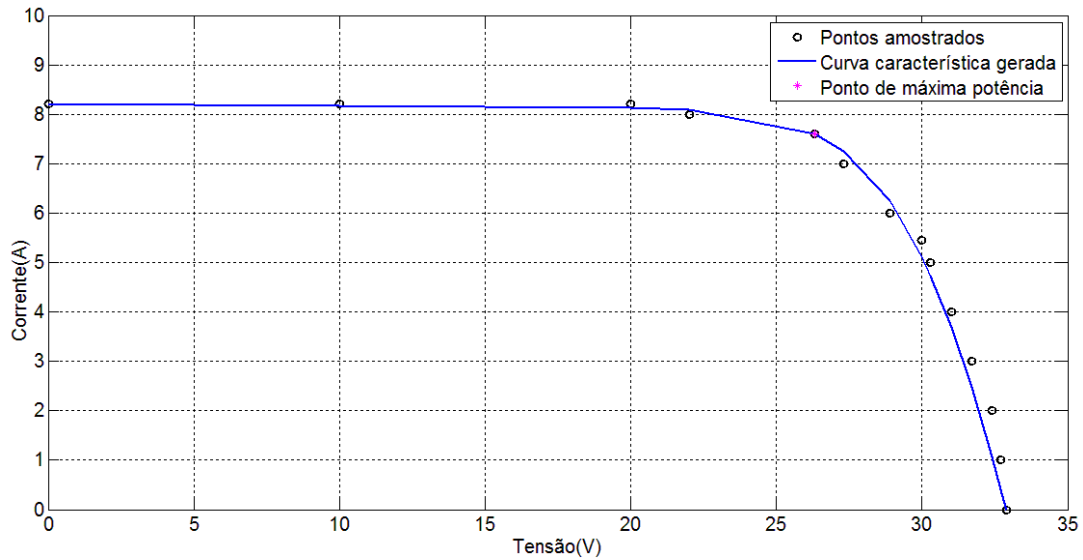


Figura 2 - Curva característica I-V estimada e pontos amostrados da curva característica real do módulo Kyocera KC200GT.

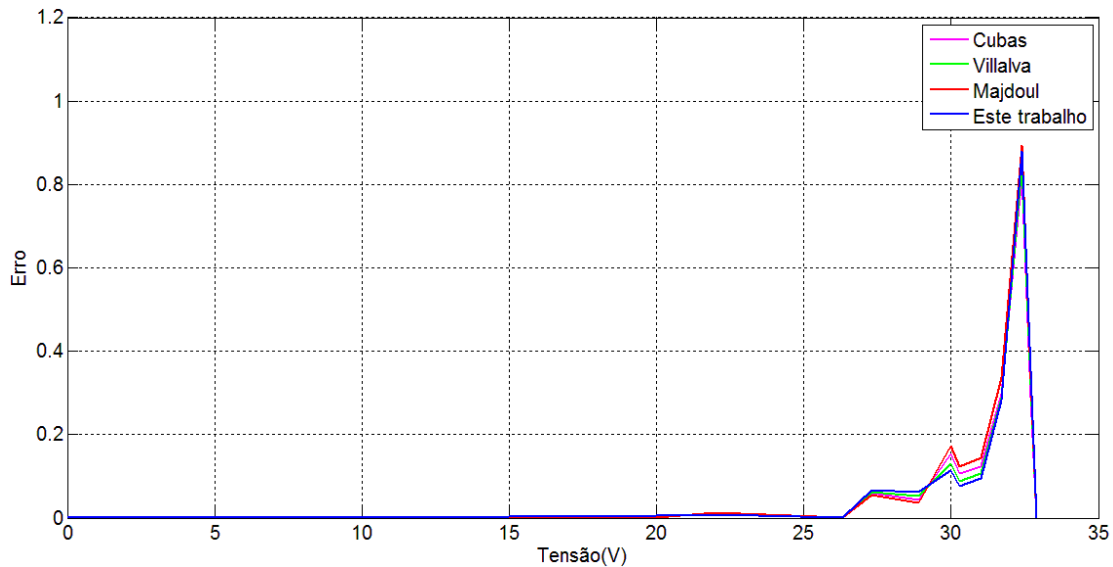


Figura 3 - Erro quadrático medido entre as curvas características deste trabalho e das curvas características implementadas segundo resistências estimadas em (Cubas, et. al., 2014), (Villalva, et. al., 2009), (Majdoul, et.al., 2015).

As Fig. 4 e Fig. 5 descrevem o comportamento do módulo, através da curva característica estimada (comparando-a com os pontos amostrados da curva característica real) e da potência gerada, respectivamente, operando em temperaturas diferentes (25 °C, 50 °C e 75 °C). Nota-se que a curva I-V do módulo é proporcional à temperatura, isto é, quanto maior a temperatura de operação do módulo, menores os valores da curva I-V. Portanto, pode-se observar que o modelo proposto descreve de forma adequada o módulo fotovoltaico para temperaturas próximas da temperatura de referência. A Fig. 5 mostra a perda de potência pelo módulo fotovoltaico caso a temperatura do módulo esteja acima da temperatura de referência, ou seja, quanto maior a temperatura do módulo, menor a corrente fotovoltaica e a tensão de circuito aberto e, conseqüentemente, menor é a potência gerada pelo módulo.

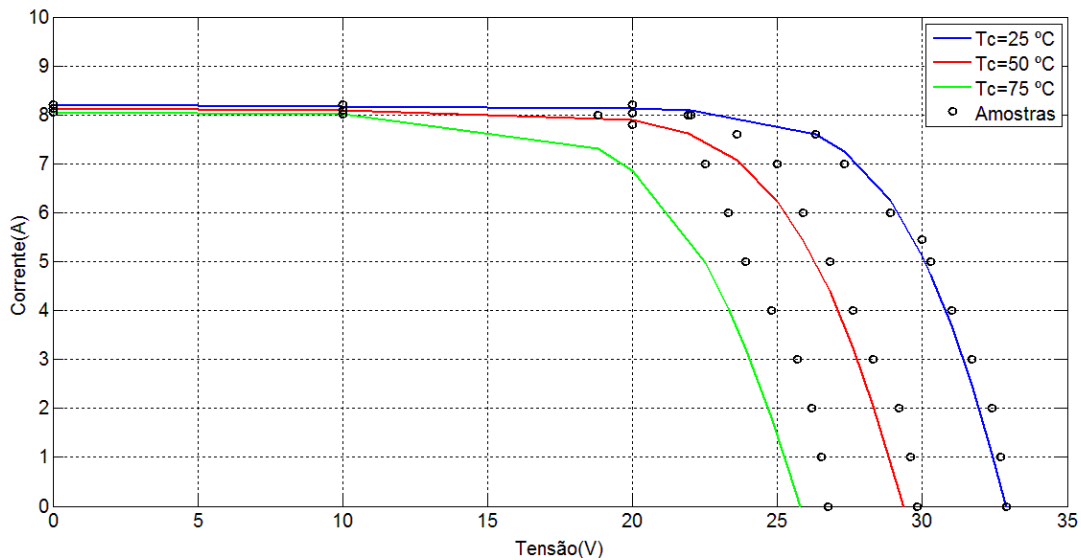


Figura 4 - Curva característica e pontos amostrados do módulo Kyocera KC200GT com temperaturas de operação distintas.

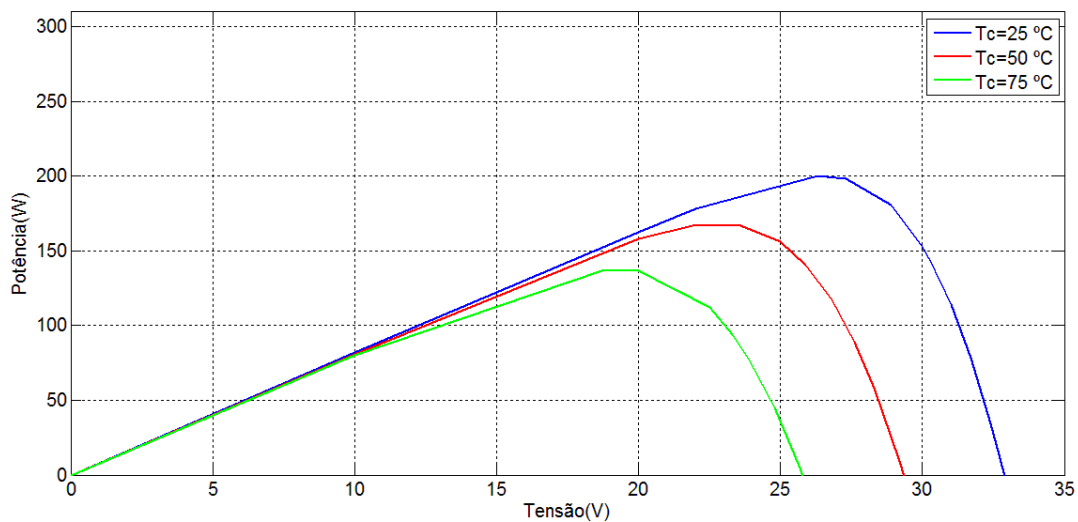


Figura 5 - Potência gerada pelo módulo Kyocera KC200GT com temperaturas de operação distintas.

A Fig. 6 e a Fig. 7 mostram, respectivamente, a curva característica estimada e a potência gerada por este módulo para diferentes valores de irradiância (1.000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2 e 400 W/m^2). Observa-se, de forma semelhante à variação na temperatura de operação do módulo, que quanto mais a irradiância estiver próxima do valor de referência, mais fiel este modelo se comporta, comparando-os com os valores amostrados do *datasheet*. Nota-se, também, que a corrente fotovoltaica é proporcional à irradiância no módulo, dada pela Eq. (5), e que este modelo pode ser utilizado para calcular a corrente gerada em locais que possuam irradiâncias com valores diferentes dos valores apresentados. A potência gerada é apresentada na Fig. 7 e percebe-se que a irradiância influencia tanto a corrente fotovoltaica quanto a potência gerada pelo módulo. Contudo, a irradiância tem menor influência na tensão de circuito aberto. A diminuição da potência com a variação da irradiância está mais relacionada à diminuição da corrente gerada pelo módulo.

Nota-se, portanto, que os parâmetros estimados proporcionaram curvas características I-V e gráficos da potência geradas semelhantes aos gráficos encontrados na literatura e no *datasheet*. Os módulos devem operar, de preferência, nas condições de referência ou o mais próximo desses valores.

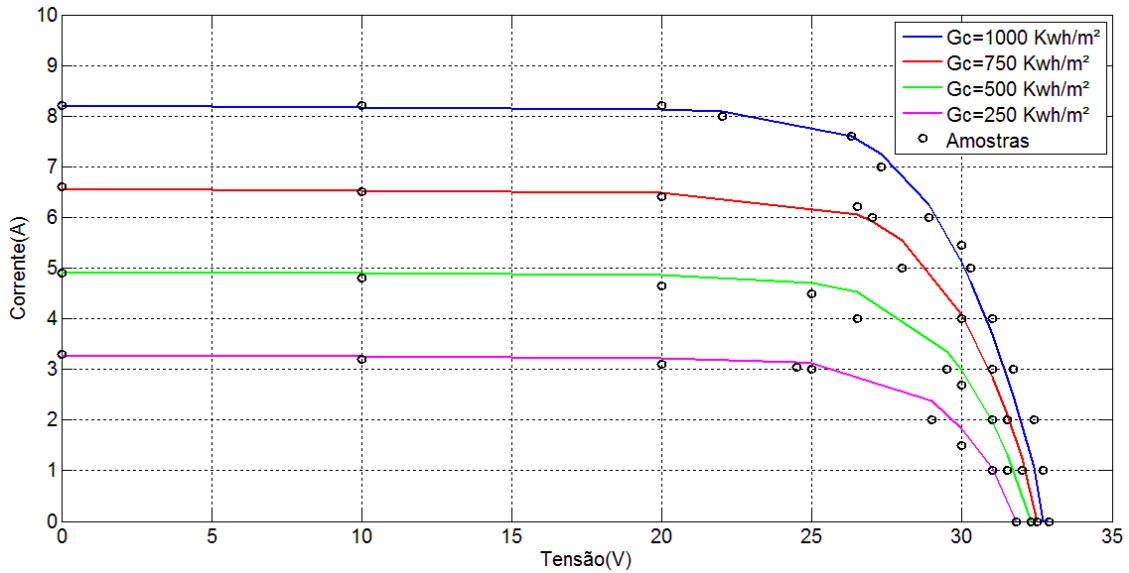


Figura 6 - Curva característica do módulo Kyocera KC200GT com diferentes valores de irradiância.

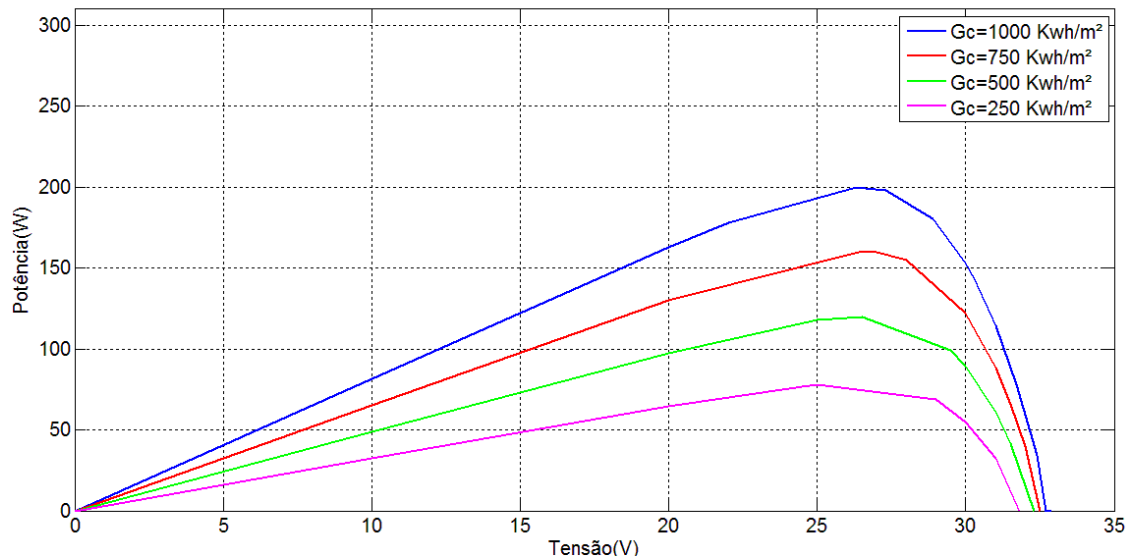


Figura 7 - Potência gerada pelo módulo Kyocera KC200GT com diferentes valores de irradiância..

5. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a estimação de parâmetros de módulos fotovoltaicos, principalmente a resistência série e a resistência paralelo do modelo de diodo com duas resistências. Outras metodologias e algoritmos estimam os parâmetros em função do ponto de máxima potência, utilizando fórmulas analíticas, métodos numéricos ou algoritmos de otimização. Este trabalho, porém, propôs um método alternativo para a estimação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando apenas valores amostrados da curva característica I-V. A implementação analisa o comportamento da curva perante os pontos amostrados e realiza o cálculo dos parâmetros visando minimizar o erro quadrático e atender ao ponto de máxima potência.

A validade desta abordagem é demonstrada pelos parâmetros estimados pelo algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt, gerando uma curva característica mais próxima dos valores amostrados, com um comportamento mais adequado do que os outros trabalhos analisados (Cubas, et. al., 2014), (Villalva, et. al., 2009) e (Majdoul, et.al., 2015), zerando o erro no ponto de máxima potência. Os gráficos do erro e erro aproximado validam esta abordagem, visto que a estimação utilizando o algoritmo Levenberg-Marquardt gerou valores mais próximos dos valores amostrados.

Os gráficos da curva característica I-V e da potência gerada mostram os comportamentos do módulo, para os parâmetros estimados, operando em diferentes temperaturas e com níveis de irradiação distintos. Eles demonstram que o módulo teve o comportamento esperado, se comparados aos demais trabalhos da literatura e com seu *datasheet*.

Estes resultados comprovam que a nova abordagem proposta, da geração de parâmetros através da amostragem da curva característica real I-V, proporcionam estimativas adequadas de parâmetros, na qual é encontrada a melhor curva característica estimada em relação a esses pontos amostrados, cujo erro quadrático entre elas é minimizado.

Como trabalhos futuros, pretende-se simular módulos fotovoltaicos e configurações mais complexos utilizando o *software* SIMULINK/MATLAB, incorporando o algoritmo proposto na simulação.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação e à CELG-D pelo suporte ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aramizu, J., 2010. Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica, Monografia, USP, São Paulo.
- Asano, C. H., Coli, E., 2009. Cálculo Numérico — Fundamentos e Aplicações, IME-USP.
- Blas, M. A., Torres, J. L., Prieto, E., García, A., 2002. Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices, *Renewable Energy*, vol. 25, pp. 371-380.
- Chan, D., Phang, J., 1987. Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and double-diode model parameters from I-V characteristics, *IEEE Transactions on Electron Devices* 34, pp. 286 – 293.
- Chegaar, M., Ouennoughi, Z., Guechi, F., 2004. Extracting dc parameters of solar cells under illumination, *Vacuum* 75, pp. 367–372.
- Cubas, J., Pindado, S., Victoria M., 2014. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior, *Journal of Power Sources* 247, pp. 467-474.
- da Costa, W., Fardin, J., Simonetti, D., Neto, L. V., 2010. Identification of photovoltaic model parameters by differential evolution, *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference*, pp. 931–936.
- da Costa, V. T., 2010. Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos, Tese de Doutorado, UFES, Vitória.
- Gong, W., Cai, Z., 2013. Parameter extraction of solar cell models using repaired adaptive differential evolution, *Solar Energy* Vol. 94, pp 209–220.
- Huang, W., Jiang, C., Xue, L., Song, D., 2011. Extracting solar cell model parameters based on chaos particle swarm algorithm, *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, pp. 398–402.
- Ishaque, K., Salam, Z., 2011. An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE), *Solar Energy* 85, pp. 2349–2359.
- Jervase, J. A., Bourdouce, H., Al-Lawati, A., 2001. Solar cell parameter extraction using genetic algorithms, *Meas. Sci. Technol.*, pp. 1922–1925.
- Majdoul, R., Abdelmounim, E., Aboufatah, M., Touati, A. W., Moutabir, A., Abouloifa, A., 2015. Combined analytical and numerical approach to determine the four parameters of the photovoltaic cells models, *1st International Conference on Electrical and Information Technologies ICEIT'2015*, pp 263-268.
- Ortiz-Conde, A., Sanchez, F. J. G., Muci, J., 2006. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, pp. 352 – 361.
- Saleem H., Karmalkar S., 2009. An analytical method to extract the physical parameters of a solar cell from four points on the illuminated J-V curve, *IEEE Electron Device Letters* 30, pp. 349–352.
- Villalva, M., Gazoli, J., Filho, E., 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, pp. 1198–1208.
- Ye, M., Wang, X., Xu, Y., 2009. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization, *Journal of Applied Physics* 105, (094502).

ESTIMATION OF PARAMETERS FOR MODELLING OF PHOTOVOLTAIC PANELS USING A MODIFIED LEVENBERG-MARQUARDT ALGORITHM

Abstract. *This article proposes a method of estimation of parameters for simulating photovoltaic panels. The model used to represent the photovoltaic panel is based on a diode and two resistors. A contribution of this work is the estimation of parameters (parallel and series resistance) of the photovoltaic panel through an algorithm that minimizes the square error of the obtained curve with the real I-V characteristic curve. The real curve is sampled from the datasheet including some provided points (short circuit current, open circuit voltage and maximum power current and voltage). We propose in this work a variation of the Levenberg-Marquardt algorithm for minimizing the error between the curves and, at the same time, passing through the maximum power point of the photovoltaic panel. The results of the proposed algorithm for the model parameters are compared with those of other studies in the literature. The effectiveness of this approach is also validated by comparing the obtained I-V curve with the real curve and those provided by other models from the literature. Finally, the results related to the photovoltaic module's behavior with the estimated parameters are presented.*

Key words: *Parameters estimation, photovoltaic system, characteristic curve*