

Estimação de Parâmetros de Modelo de Sistemas Fotovoltaicos utilizando Algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado

R. A. P. FRANCO*, F. H. T. VIEIRA, M. S. DE CASTRO e G. A. DEUS JUNIOR

Recebido em Dezembro 26, 2016 / Aceito em Março 01, 2018

RESUMO. Este artigo propõe um algoritmo para estimação de parâmetros de um modelo para sistemas fotovoltaicos. Propõe-se uma modificação no algoritmo de Levenberg-Marquardt para aprimorar a estimação de duas resistências (série e paralelo) no modelo do módulo fotovoltaico de um diodo. A precisão do algoritmo de estimação proposto é comparada com outros três métodos. A simulação dos sistemas fotovoltaicos utilizando os parâmetros obtidos fornece a curva característica e a potência gerada pelo sistema. Aplicam-se métodos para interpolar os pontos das curvas IxV obtidos via simulações para que fosse possível a comparação destas com a curva IxV fornecida no *datasheet* do módulo fotovoltaico Kyocera KC200GT. Os resultados mostram que a curva característica IxV gerada através de simulação com os parâmetros do módulo fotovoltaico estimados por meio do algoritmo proposto neste trabalho, apresenta o menor erro quadrático médio comparado as outras abordagens consideradas.

Palavras-chave: Energia solar, estimação de parâmetros, modelagem de painéis FV.

1 INTRODUÇÃO

A energia solar proporciona grandes contribuições à humanidade por ser uma energia limpa e ilimitada. No entanto, deve-se garantir que se obtenha a utilização ótima dos módulos fotovoltaicos, responsáveis por transformar a energia solar em energia elétrica, pois os módulos possuem elevado custo de investimento. Portanto, é essencial a realização de simulações confiáveis, otimizadas e precisas do Sistema Fotovoltaico a ser implementado, visando garantir a configuração ótima do sistema [7].

Há diversas propostas de simulações de módulos/sistemas fotovoltaicos descritas na literatura. O trabalho [13] propõe procedimentos para simulações de sistemas fotovoltaicos visando obter a interface ótima entre estes e a rede elétrica. Já o trabalho [11] objetiva projetar e simular um Sistema Fotovoltaico na rede elétrica utilizando Simulink, considerando duas técnicas para o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT).

Em [4], é apresentada uma modelagem e simulação de um Sistema Fotovoltaico que utiliza o método *Lookup Table*. O trabalho [12] apresenta uma modelagem e simulação de um sistema de

*Autor correspondente: Ricardo Augusto Pereira Franco – E-mail: ricardofranco3@gmail.com.

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, EMC, Universidade Federal de Goiás, Av. Universitária, nº 1488 - quadra 86, 74605-010, Goiânia, GO, Brasil.

E-mails: flavio_vieira@ufg.br; mcastro@emc.ufg.br; gdeusjr@emc.ufg.br

energia fotovoltaica de 100 kWp instalada e em operação, utilizando duas técnicas para o MPPT. Em [9], é realizada a análise e a modelagem de um Sistema Fotovoltaico de 10 kW, simulando-o de forma isolada e conectada à rede, aplicando um esquema de controle do sistema sob diferentes condições de carga. O trabalho apresentado em [10], propõe uma modelagem para a simulação de sistemas fotovoltaicos utilizando a curva característica do módulo fotovoltaico. O trabalho [15] apresenta um método para a modelagem de módulos fotovoltaicos utilizando dados contidos no *datasheet* (folha de dados do painel solar) para calcular parâmetros dos módulos fotovoltaicos. Após isso, os parâmetros são inseridos no Sistema Fotovoltaico a ser simulado.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de simulação de sistemas fotovoltaicos, verificando o comportamento do módulo Kyocera KC200GT [5] na configuração de sistema isolado. Primeiramente, propõe-se um método de cálculo de parâmetros do módulo fotovoltaico (resistência série e resistência paralelo), por meio de uma proposta de modificação do algoritmo de Levenberg-Marquardt. Em seguida, é apresentada a simulação de um Sistema Fotovoltaico onde o sistema é composto por apenas um módulo. Os resultados da curva característica gerada pela estimação de parâmetros e da simulação do Sistema Fotovoltaico, são comparados com os dados apresentados pelo *datasheet* e pelos trabalhos [7], [10], [15], [14], [2].

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 apresenta-se a modelagem do módulo fotovoltaico utilizado; a Seção 3 introduz o algoritmo de Levenberg-Marquardt em conjunto com o algoritmo proposto, isto é, o algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado; o modelo proposto para sistemas fotovoltaicos utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado é apresentado na Seção 4; as simulações e os resultados obtidos são mostrados na Seção 5; a Seção 6 apresenta as conclusões finais deste trabalho.

2 MODELAGEM DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Neste trabalho, o modelo escolhido para representar um módulo fotovoltaico possui uma fonte de corrente, um diodo e duas resistências. Isto é, ele possui uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e uma resistência (resistência paralelo), que estão em série com uma outra resistência (resistência série), conforme apresentado na Figura 1.

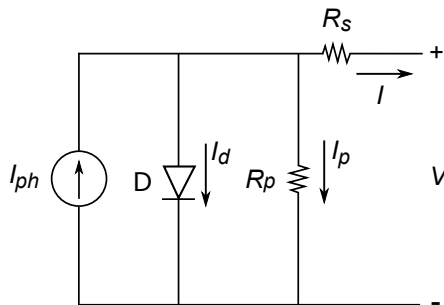


Figura 1: Circuito elétrico equivalente do modelo de uma fonte de corrente, um diodo e resistências série e paralelo.

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

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_s \cdot m \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

onde I_{ph} é a corrente fotovoltaica (A); I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo de difusão (A); I é a corrente de saída do módulo (A); n_s é o número de células em série que constituem o módulo; m é o fator de idealidade do diodo; V é a tensão de saída do módulo (V); V_t é a tensão térmica (V); R_s é a resistência em série (Ω); R_p é a resistência em paralelo ou shunt (Ω).

Os parâmetros a serem estimados do modelo da Figura 1 são: I_{ph} , I_0 , m , R_p e R_s . Neste trabalho, foram utilizadas as equações apresentadas em [3] para o cálculo da corrente de saturação reversa do diodo na temperatura de referência (I_{0r}), da corrente de saturação reversa do diodo (I_0) e da corrente fotovoltaica (I_{ph}), conforme as equações apresentadas abaixo:

$$I_{0r} = \frac{I_{cc}}{\left[\exp \left(\frac{V_{ca} \cdot q}{k \cdot n_s \cdot T_r \cdot m} \right) - 1 \right]} \quad (2.2)$$

$$I_0 = I_{0r} \cdot \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot V_g}{m \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$I_{ph} = G_c \cdot [I_{cc} + \alpha \cdot (T_c - T_r)] \quad (2.4)$$

onde, k é a constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$); T_c é a temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$); T_r é a temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$); q é a carga elemental do elétron ($1,609 \times 10^{-19}$); V_{ca} é a tensão de circuito aberto (V); V_g é a banda proibida (1,11 eV); I_{0r} é a corrente de saturação reversa do diodo na temperatura de referência (A); I_{cc} é a corrente de curto-circuito (A); G_c é o valor da irradiância do módulo (W/m^2); α é o valor do coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito (A/K).

O fator de idealidade do diodo (m), foi considerado o valor de $m = 1,3$ porque outros trabalhos da literatura [7], [14], [2] obtiveram este valor para o mesmo módulo fotovoltaico analisado (módulo Kyocera KC200GT). 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 (R_s e R_p) minimizando o erro entre a curva gerada e os pontos amostrados.

Deve-se observar que a amostragem dos pontos de corrente e tensão (curva IxV) não precisa ser feita somente pelo *datasheet* do módulo. O algoritmo proposto permite realizar a estimação dos parâmetros por meio de pontos que sejam obtidos experimentalmente.

Neste trabalho, propõe-se uma metodologia para modelagem de sistemas fotovoltaicos isolados onde a estimação de parâmetros é baseada em um algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado. Apresenta-se os resultados obtidos das simulações computacionais, comparando-os com

dois modelos encontrados na literatura [10], [15]. O modelo proposto foi desenvolvido e implementado computacionalmente utilizando uma estrutura de simulação similar a aquela proposta em [15]. No entanto, considera-se o equacionamento mais elaborado apresentado em [3]. A diferença principal em relação ao trabalho descrito em [15] é que no modelo proposto os valores dos parâmetros das resistências são calculados segundo o algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado. Os modelos foram implementados utilizando o software MATLAB por meio da *toolbox* Simulink.

3 ALGORITMO DE LEVENBERG-MARQUARDT MODIFICADO

O método de Levenberg-Marquardt (LM) pode ser utilizado para solucionar problemas de mínimos quadrados não linear. O problema de mínimos quadrados conceitua-se da seguinte forma: Seja $x \in \mathfrak{R}^n$ e dada uma função $f : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$ com $m \geq n$, o problema dos mínimos quadrados consiste em encontrar x^* , onde x^* é um mínimo local da função [6]:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(x))^2 \quad (3.1)$$

O algoritmo de LM tem como objetivo ajustar um conjunto de dados de forma a minimizar o problema dos mínimos quadrados, isto é, minimizar a soma dos quadrados das distâncias entre os pontos ajustados e os pontos amostrados [6].

Uma vez que o algoritmo de LM minimiza o quadrado das distâncias entre duas curvas, este trabalho propõe o modelo de Levenberg-Marquardt Modificado (LMM), no qual são acrescentados pesos em determinados pontos da curva IxV gerada pela função objetivo (Eq. 3.2). Esses pesos irão influenciar os parâmetros estimados de forma que a curva do modelo passe pelos pontos desejados de maior peso. Neste caso, a curva IxV obtida pelo algoritmo proposto é tal que minimiza o erro quadrático entre os pontos da curva do modelo e da curva real e ainda fazendo com que a curva obtida passe pelo ponto de máxima potência (MPP).

A equação a ser minimizada pelo algoritmo LMM pode ser definida como:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (w_i \cdot f_i(x))^2 \quad (3.2)$$

onde w_i corresponde ao valor do peso atribuído para o índice i .

4 MODELO PROPOSTO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO ALGORITMO DE LEVENBERG-MARQUARDT

Nesta seção, apresentamos a metodologia proposta para a simulação de sistemas fotovoltaicos. Este modelo consiste em estimar os parâmetros do Sistema Fotovoltaico, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado. Em seguida, utiliza-se esses parâmetros para simular o Sistema Fotovoltaico de forma isolada. O fluxograma abaixo (Figura 2) apresenta o modelo proposto.

Para poder simular os módulos fotovoltaicos, foram estimados os valores para os parâmetros das duas resistências (R_s e R_p) utilizando a equação transcendental, Eq. 2.1 e o algoritmo de

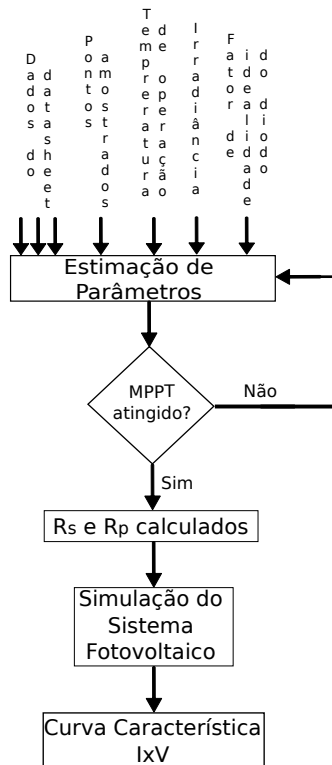


Figura 2: Fluxograma do modelo proposto.

Levenberg-Marquardt Modificado, para o cálculo da corrente (I). Para a resolução da Eq. 2.1, foi implementado o método de Newton-Raphson [1].

Após calculados os valores das duas resistências (R_s e R_p), estes valores são fornecidos como entrada para o modelo fotovoltaico desenvolvido, apresentado na Figura 3. Os dados de entrada, neste modelo, são compostos pelas resistências série e paralelo e o fator de idealidade do diodo do módulo fotovoltaico utilizado no sistema, além dos valores da temperatura ambiente e da irradiância incidente no módulo. Já os dados de saída são obtidos dos medidores de tensão e corrente para analisar os valores gerados, conforme mostra a Figura 3.

O componente Sistema Fotovoltaico, da Figura 3, implementa as equações apresentadas até o momento, isto é, Eq. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 3.2, assim como as equações para calcular a tensão térmica (V_t) e a tensão de circuito aberto (V_{ca}):

$$V_t = \frac{k \cdot T_c}{q} \quad (4.1)$$

$$V_{ca} = V_t \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (4.2)$$

Nota-se que as resistências série e paralelo estão multiplicadas pelo número de módulos em série e divididas pelo número de módulos em paralelo. Esse circuito apresentado na Figura 3 é o

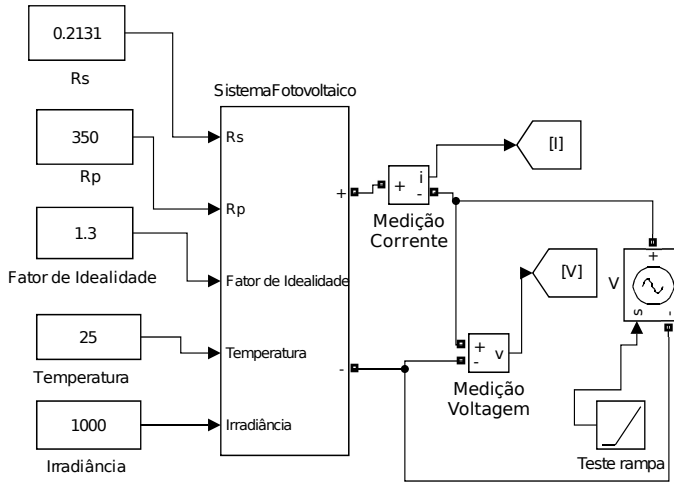


Figura 3: Sistema Fotovoltaico do modelo proposto de forma isolada.

modelo equivalente (circuito equivalente de Thévenin) do circuito com um determinado número de strings em série e em paralelo.

A tensão térmica do sistema é calculada de acordo com a implementação dada na Figura 4.

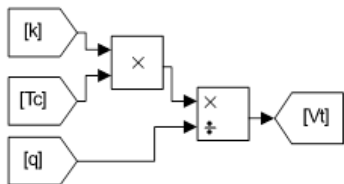


Figura 4: Implementação da tensão térmica do Sistema Fotovoltaico.

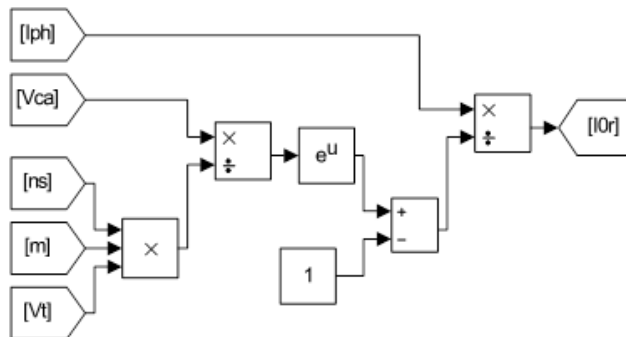


Figura 5: Implementação da corrente de saturação reversa do diodo de difusão na temperatura de referência.

O cálculo da corrente de saturação reversa do diodo na temperatura de referência é implementada de acordo com a Figura 5.

Já a corrente de saturação reversa do diodo é implementada conforme apresentado na Figura 6.

A tensão de circuito aberto é apresentada na Figura 7. A tensão de circuito aberto varia em função da irradiância no(s) módulo(s) e da temperatura de operação do(s) módulo(s) do Sistema Fotovoltaico.

A corrente fotovoltaica é calculada caso os valores da irradiância no(s) módulo(s) e temperatura de operação seja(m) diferente(s) dos valores padrões (temperatura igual a 298 K e irradiância

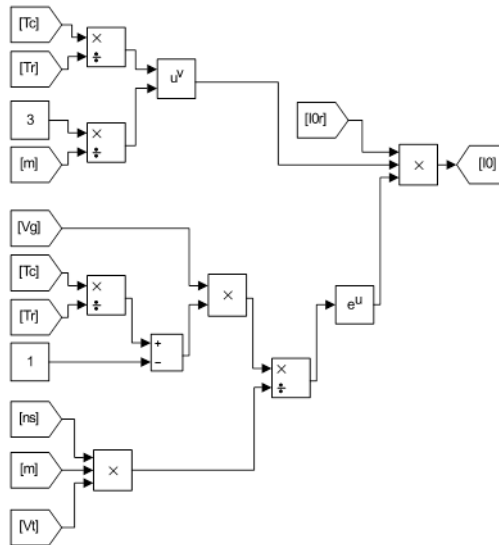


Figura 6: Sistema Fotovoltaico do modelo proposto de forma isolada.

igual a 1.000 W/m^2). A Figura 8 mostra como foi implementado no Simulink o cálculo da corrente fotovoltaica gerada pelo Sistema Fotovoltaico.

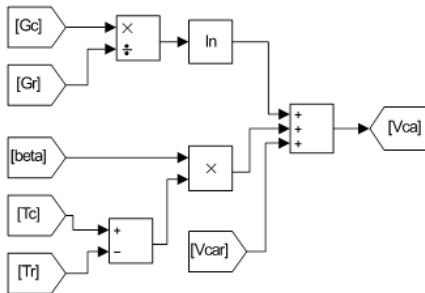


Figura 7: Sistema Fotovoltaico do modelo proposto de forma isolada.

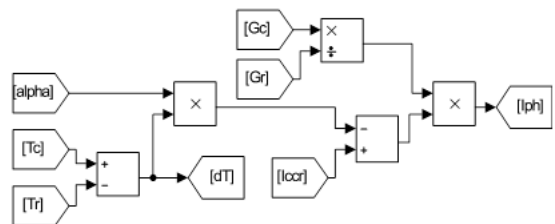


Figura 8: Sistema Fotovoltaico do modelo proposto de forma isolada.

A corrente gerada pelo Sistema Fotovoltaico é apresentada na Figura 9.

Os equacionamentos apresentados pelos esquemas da Figura 4 até a Figura 9 representam o bloco do Sistema Fotovoltaico apresentado na Figura 3. O resultado final é a geração da corrente fotovoltaica, a curva característica e a potência gerada pelo Sistema Fotovoltaico.

O Sistema Fotovoltaico é escalável e configurável, isto é, o sistema permite que seja expandido de acordo com a configuração a ser implantada e que se determine quantos módulos fotovoltaico serão inseridos em paralelo e em série, desde que atualize os valores das variáveis do sistema (N_s e N_p).

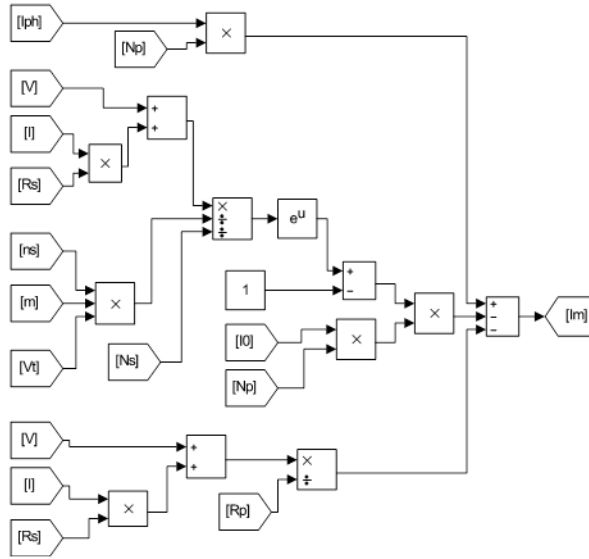


Figura 9: Sistema Fotovoltaico do modelo proposto de forma isolada.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os valores estimados dos parâmetros do modelo escolhido do painel fotovoltaico com a representação de um diodo e serão mostrados os resultados da simulação dos sistemas fotovoltaicos implementados (conforme a Figura 2).

Os resultados foram gerados a partir dos valores padrões de temperatura do ambiente de operação do módulo e de irradiância no módulo. A temperatura de operação utilizada foi de 25 °C (298 K) e a irradiância no módulo foi de 1.000 W/m². Todo este trabalho foi realizado para o módulo KC200GT da empresa Kyocera.

Esse painel foi escolhido como referência porque outros autores [7], [14] e [2] 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. A Tabela 1 apresenta os dados de referência providos pelo fornecedor e utilizados neste trabalho.

5.1 Simulações e Resultados

A Tabela 2 mostra os valores obtidos para as resistências estimados por este trabalho através do algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado e pelos demais trabalhos [7], [14] e [2], juntamente com o Erro Quadrático Médio (EQM).

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 [14]. Porém, percebe-se que os valores da corrente de máxima potência obtidos ($I_{m[calculado]}$) pelos demais trabalhos estão mais distan-

Tabela 1: Especificações elétricas do módulo Kyocera KC200GT para as condições de irradiância 1.000 W/m^2 , temperatura de célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Característica	Valor
Máxima Potência	200,14 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

Tabela 2: Valores estimados e valores dos parâmetros para o módulo Kyocera KC200GT para as condições de irradiância 1.000 W/m^2 e temperatura da célula 25°C .

Parâmetros	Parâmetros calculados por:				
	LM	LMM	Majdoul [7]	Villalva [14]	Cubas [[2]]
R_s	0,1063 Ω	0,2131 Ω	0,2307 Ω	0,2210 Ω	0,2308 Ω
R_p	69,01 Ω	350,00 Ω	603,83 Ω	415,41 Ω	597,39 Ω
I_{ph}	8,210 A	8,205 A	8,213 A	8,214 A	8,210 A
I_m	7,610 A	7,610 A	7,610 A	7,610 A	7,610 A
V_m	26,3 V	26,3 V	26,3 V	26,3 V	26,3 V
$I_{m[\text{calculado}]}$	7,488 A	7,610 A	7,6053 A	7,6088 A	7,6101 A
$V_{m[\text{calculado}]}$	26,3 V	26,3 V	26,3 V	26,3 V	26,3 V
EQM	0,1401	0,1392	0,1508	0,1366	0,1366

tes do valor da corrente de máxima potência fornecida pelo *datasheet* (I_m), se considerarmos a precisão de até a quarta casa decimal. O algoritmo LM sem a influência dos pesos visa obter uma curva $I \times V$ que apenas minimize os pontos sem garantir que essa curva passe pelo ponto de máxima potência, portanto, se faz necessária a modificação proposta por este trabalho.

Estimados os parâmetros, pode-se traçar a curva característica em conjunto com os pontos amostrados. A Figura 10 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 Figura 11 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 (Figura 11) que o erro quadrático encontrado nesta abordagem foi bem próximo das demais. Entretanto, a abordagem proposta provê estimação dos parâmetros de modo a gerar a curva-característica que passe pelo ponto de máxima potência com maior precisão.

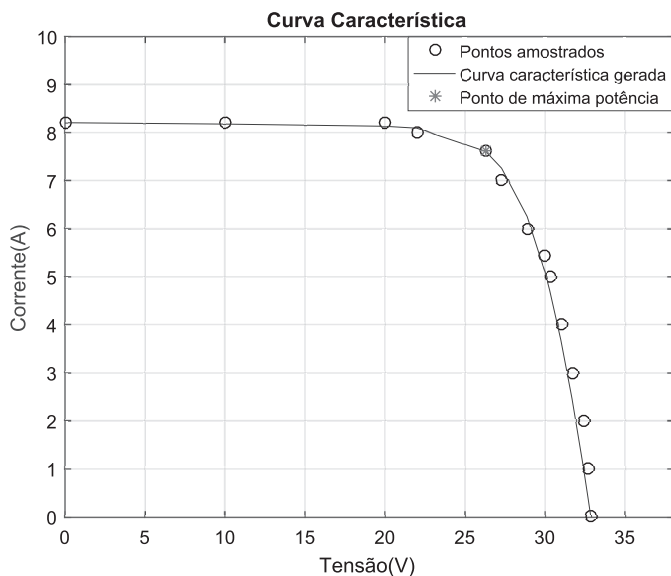


Figura 10: Curva característica I-V estimada e pontos amostrados da curva característica real do módulo Kyocera KC200GT.

5.2 Simulação do Sistema Fotovoltaico

Após obtidos os valores dos parâmetros do módulo fotovoltaico, é possível realizar a simulação do Sistema Fotovoltaico. Inserindo os dados de entrada presentes na Figura 3, a execução da simulação gerará a curva característica de acordo com a modelagem do sistema.

Na configuração utilizada é possível realizar a comparação dos valores gerados da curva característica $I \times V$ da simulação do Sistema Fotovoltaico com os valores amostrados no *datasheet* do módulo, visto que o *datasheet* fornece os valores para esta configuração. Porém, os pontos gerados pela simulação do Sistema Fotovoltaico estão em valores de tensões distintas em relação aos pontos amostrados, portanto, foi necessário utilizar métodos de interpolação para obter os pontos nas respectivas tensões dos dados amostrados, permitindo, assim, a comparação entre os dados amostrados e simulados. Para isto, foram utilizados três métodos de interpolação já implementados no MATLAB: *Linear*, *Cubica* e *Spline* [1], [8]. O método *Spline* utiliza a função de interpolação de dados por splines cúbicos.

Nessa configuração, além da simulação proposta por este trabalho, foram simulados também os modelos propostos em [10] e [15]. Houve, também, a necessidade de utilizar o método da interpolação (*Linear*, *Cubica* e *Spline*) dos pontos das simulações geradas para permitir a comparação com os valores amostrados do *datasheet*. Os valores dos erros quadráticos médio estão apresentados na Tabela 3.

Observa-se que o modelo proposto apresenta os menores valores obtidos de erro quadrático médio comparados aos dos outros modelos. Já para o LMM, o método de interpolação *Linear* gerou o menor valor de erro.

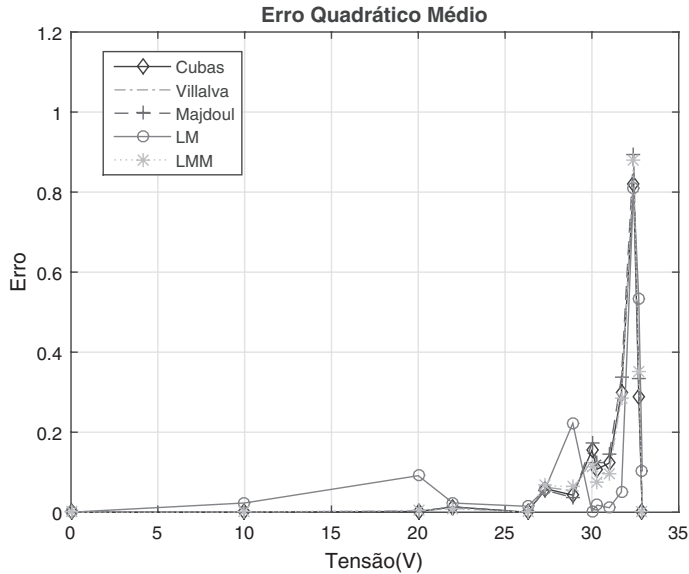


Figura 11: Erro quadrático medido entre as curvas características deste trabalho (LM e LMM) e das curvas características implementadas segundo resistências estimadas em [1], [9], [10].

Tabela 3: Erro quadrático médio do modelo proposto e de dois modelos da literatura [10] e [15].

Interpolação	Modelo proposto (LMM)	Pukhrem [10]	Villalva [15]
Linear	0,1715	0,2762	0,1757
Cubica	0,1718	0,2917	0,1754
Spline	0,1716	0,3090	0,1756

Portanto, conforme o menor erro foi obtido pela interpolação linear, pode-se gerar a curva característica IxV e a curva de potência do Sistema Fotovoltaico simulado. A Figura 12 mostra os valores interpolados obtidos da corrente gerada pelo Sistema Fotovoltaico proposto por este trabalho. A potência gerada pelo Sistema Fotovoltaico, por meio da interpolação linear, é apresentada na Figura 13.

Nota-se na Figura 12 que os pontos interpolados com os três métodos estão próximos, proporcionando a diferença sutil de erro mostrada na Tabela 3. A curva da potência (Figura 13) gerada pelo Sistema Fotovoltaico simulado, em função da tensão, possui comportamento similar da curva amostrada, com algumas diferenças devido a erros de amostragem da curva IxV pelo *datasheet*.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um método alternativo para a estimação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando valores amostrados da curva característica IxV.

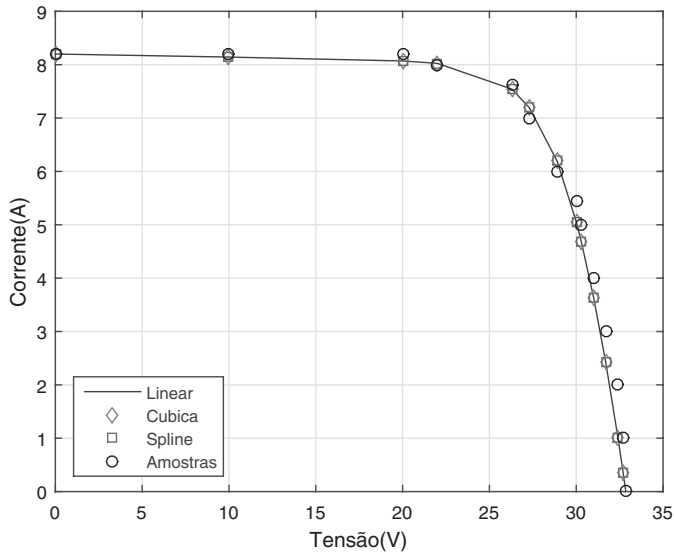


Figura 12: Curva característica do Sistema Fotovoltaico proposto com os três tipos de interpolação realizadas.

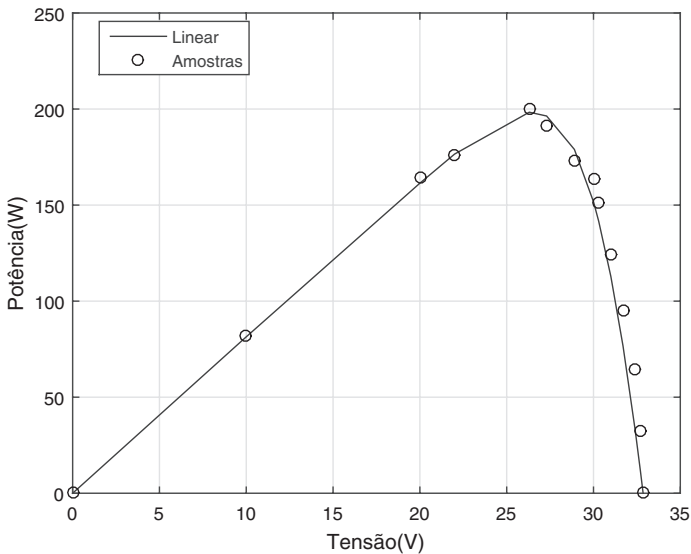


Figura 13: Potência gerada pelo Sistema Fotovoltaico por meio do método de interpolação linear.

A validade e eficiência desta abordagem são verificadas 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 [7], [14] e [2], zerando o erro no ponto de máxima potência. Os gráficos do erro quadrático

validam esta abordagem, visto que a estimação utilizando o algoritmo Levenberg-Marquardt gerou valores mais próximos dos valores amostrados.

Já a segunda parte deste trabalho apresentou uma proposta de modelo para simular sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, obtendo-se importantes resultados. O modelo proposto apresentou o menor erro quadrático médio da curva característica (em relação aos pontos amostrados), se comparado com dois outros modelos da literatura.

Como trabalhos futuros, podemos citar a realização da simulação do sistema conectado à Rede Elétrica e analisar seu comportamento; efetuar a simulação deste sistema com dados reais de irradiância e temperatura e analisar as distorções harmônicas geradas pelo Sistema Fotovoltaico conectado à Rede Elétrica.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC-UFG) e à CELG-D pelo suporte ao trabalho.

ABSTRACT. This paper proposes an algorithm for the estimation of the parameters of a photovoltaic system model. We propose to use a modified Levenberg-Marquardt algorithm to enhance the estimates of the two resistances (series and parallel) in an one-diode photovoltaic model. The estimation precision of the proposed approach is compared to other three methods. The simulation of the photovoltaic systems using the obtained parameters provides the characteristic curve and the power generated by the photovoltaic system. Methods are applied to interpolate the points of the IxV curves obtained by simulation, so that these IxV curve can be compared with the IxV curves provided by the datasheet of the Kyocera KC200GT photovoltaic module. The results show that the curve generated with the parameters estimated through the proposed algorithm presents the smallest mean square error compared to the other considered methods.

Keywords: Solar energy, estimation of the parameters, modeling of PV panels.

REFERÊNCIAS

- [1] C.H. Asano & E. Coli. *Cálculo Numérico - Fundamentos e Aplicações*. Departamento de Matemática Aplicada - IME - USP, São Paulo (2009). Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~asano/LivroNumerico/LivroNumerico.pdf>. (Acessado: 13-Dez-2016).
- [2] J. Cubas, S. Pindado & M. Victoria. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior. *Journal of Power Sources*, **247**(Supplement C) (2014), 467 – 474. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.008>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313014997>.
- [3] W.T. da Costa. *Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo (2010).

- [4] A. Ilyas, M.R. Khan & M. Ayyub. Lookup table based modeling and simulation of solar photovoltaic system. In 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1–6 (2015). doi:10.1109/INDICON.2015.7443268.
- [5] Kyocera. *KC200GT*. Disponível em: <https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KC200GT.pdf>. (Acessado: 14-Nov-2017).
- [6] K. Madsen, H. Nielsen & O. Tingleff. *Methods for non-linear least squares problems*. Informatics and Mathematical Modelling – Technical University of Denmark, Kongens Lyngby (2004).
- [7] R. Majdoul, E. Abdelmounim, M. Aboufatah, A.W. Touati, A. Moutabir & A. Abouloifa. Combined analytical and numerical approach to determine the four parameters of the photovoltaic cells models. In 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), pp. 263–268 (2015). doi:10.1109/EITech.2015.7162977.
- [8] Mathworks. *Interpolation*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/1-d-interpolation.html>. (Acessado: 13-Dez-2016).
- [9] K. Prerna & G. Shankar. Modelling and simulation of photovoltaic system for isolated and grid connected mode. In 2016 3rd International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), pp. 316–320 (2016). doi:10.1109/RAIT.2016.7507923.
- [10] S. Pukhrem. A photovoltaic panel model in MATLAB/Simulink. (2013).
- [11] S.I. Rasel, R.N. Ali, M.S.U. Chowdhury & M.M. Hasan. Design simulation of grid connected Photovoltaic system using Simulink. In 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), pp. 238–242 (2015). doi:10.1109/ICAEE.2015.7506840.
- [12] R. Rawoof, R. Balasubramanian & N.M. Muthukrishnan. Modeling and simulation of 100 kWp grid-connected Photovoltaic Power System. In 2015 Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth (PCCCTSG), pp. 15–20 (2015). doi:10.1109/PCCCTSG.2015.7503913.
- [13] F. Scapino & F. Spertino. Circuit simulation of photovoltaic systems for optimum interface between PV generator and grid. In IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, volume 2, pp. 1125–1129 vol.2 (2002). doi:10.1109/IECON.2002.1185430.
- [14] M.G. Villalva, J.R. Gazoli & E.R. Filho. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **24**(5) (2009), 1198–1208. doi:10.1109/TPEL.2009.2013862.
- [15] M.G. Villalva, J.R. Gazoli & E.R. Filho. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. In 2009 Brazilian Power Electronics Conference, pp. 1244–1254 (2009). doi:10.1109/COBEP.2009.5347680.