

Implementação e Verificação Experimental do Modelo de Cinco Parâmetros para Módulos Fotovoltaicos em Fortaleza Ceará

Nestor Rocha Monte Fontenele (Instituição - a informar) - nestorfontenele@gmail.com
Douglas Aurélio Carvalho Costa (IFCE - Campus Cedro) - douglas.aurelio84@gmail.com
Francisco Jeandson Rodrigues da Silva (UFC) - jeandson@dee.ufc.br
Jaime Alex Boscov (Instituição - a informar) - aboscov@gmail.com
Amnon Amoglia Rodrigues (UFC) - eng.agro.amnon@gmail.com
Antonia Fernandes da Rocha (Instituição - a informar) - ntonia.mec@gmail.com
Bruno Ferro de Menezes (UFC) - bmenezes@live.com
Elcid Rodrigues de Oliveira Filho (LEG) - elcidrdof@gmail.com
PAULO C. M. CARVALHO (UFC) - carvalho@dee.ufc.br
Herivelton Alves de Oliveira (UFC) - herivelt@gmail.com
Elder Alves de Sousa Junior (UNI7) - elderasj@gmail.com
Pollyana Rodrigues de Carvalho (IFCE) - pollycr94@gmail.com

Resumo:

Vários modelos matemáticos têm sido propostos na literatura para representar um módulo fotovoltaico (FV). O presente artigo tem como objetivo apresentar a modelagem, para as condições encontradas em Fortaleza, CE, e, posteriormente, a verificação experimental de dois módulos de 20 W, um monocristalino (mSi) e outro policristalino (pSi), usando o modelo de 5 parâmetros (M5P). Nesse modelo, a corrente de saída é obtida por meio do cálculo de cinco variáveis, sendo estas dependentes de alguns valores de referência do módulo FV. As correntes calculadas pelas simulações para diferentes condições de irradiância e temperatura do módulo são comparadas com os valores medidos nos dois sistemas, mostrando que o modelo é capaz de prever a corrente de saída de maneira bastante eficaz, com erros médios de 5,46% e 5,79%, para os módulos pSi e mSi, respectivamente.

Palavras-chave: *Sistema fotovoltaico, Curva I-V, Modelo de cinco parâmetros*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

IMPLEMENTAÇÃO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO DE CINCO PARÂMETROS PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM FORTALEZA CEARÁ

Nestor Rocha Monte Fontenele – nestorfontenele@gmail.com
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Douglas Aurélio Carvalho Costa – douglas.aurelio84@gmail.com
Instituto Federal de Ensino, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Cedro
Francisco Jeandson Rodrigues da Silva – jeandson.silva@unifanor.edu.br
Centro Universitário 7 de Setembro, Departamento de Engenharia Elétrica
Centro Universitário UniFanor Wyden, Departamento de Engenharia Elétrica
Jaime Alex Boscov – aboscov@gmail.com
Amnon Amoglia Rodrigues – eng.agro.amnon@gmail.com
Antonia Fernandes da Rocha – antonia.mec@gmail.com
Bruno Ferro de Menezes – Bmenezes@live.com
Elcid Rodrigues de Oliveira Filho – elcidrdof@gmail.com
Herivelton Alves de Oliveira – herivelt@gmail.com
Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Elder Alves de Sousa Junior – elderasj@gmail.com
Centro Universitário 7 de Setembro, Departamento de Engenharia Elétrica
Pollyana Rodrigues de Carvalho – pollycr94@gmail.com
Instituto Federal de Ensino, Ciência e Tecnologia do Ceará

Resumo. *Vários modelos matemáticos têm sido propostos na literatura para representar um módulo fotovoltaico (FV). O presente artigo tem como objetivo apresentar a modelagem, para as condições encontradas em Fortaleza, CE, e, posteriormente, a verificação experimental de dois módulos de 20 W, um monocristalino (mSi) e outro policristalino (pSi), usando o modelo de 5 parâmetros (M5P). Nesse modelo, a corrente de saída é obtida por meio do cálculo de cinco variáveis, sendo estas dependentes de alguns valores de referência do módulo FV. As correntes calculadas pelas simulações para diferentes condições de irradiância e temperatura do módulo são comparadas com os valores medidos nos dois sistemas, mostrando que o modelo é capaz de prever a corrente de saída de maneira bastante eficaz, com erros médios de 5,46% e 5,79%, para os módulos pSi e mSi, respectivamente.*

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, Curva I-V, Modelo de cinco parâmetros

1. INTRODUÇÃO

A modelagem de células fotovoltaicas (FV) é um tópico de relevância para as pesquisas referente à tecnologia. Os modelos matemáticos adequados podem facilitar e reduzir a incerteza na estimativa e planejamento de energia de plantas FV (ZARKOV et al., 2016). Os modelos de células FV geralmente são desenhados a partir do circuito elétrico equivalente, (CELIK; ACIKGOZ, 2007). Todavia, Souza et al (2016), afirmam que não existe um único modelo capaz de representar com precisão todas as células solares FV. Com o avanço da tecnologia, tem se encontrado vários tipos de módulos, células e geradores FV comercialmente disponíveis no mercado. Dessa maneira, faz-se necessário selecionar o módulo que é mais adequado para uma determinada localidade (SOUZA et al., 2016).

Zarkov et al (2016) apresentam um estudo de caso analisando o modelo e o desempenho de geradores FV de diferentes tecnologias: silício monocristalino (mSi), silício policristalino (pSi), silício microcristalino (μ Si), seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e Telureto de cádmio (CdTe). Esta modelagem do painel FV baseou-se no modelo de Durisch et al (2007), que determina a eficiência no ponto de máxima potência (MPP) em função das condições meteorológicas e de operação.

No trabalho de Celik e Acikgoz (2007) é apresentada a modelagem e a validação experimental da corrente de operação de um módulo FV mSi de 120 W, usando os modelos de quatro parâmetros (M4P) e cinco parâmetros (M5P). A modelagem do M5P considera a corrente fotogerada, a corrente de saturação reversa de diodo, a resistência em série, a resistência shunt e fator de idealidade do diodo. Já no M4P, a resistência shunt é considerada como infinita, sendo desconsiderada nos cálculos. Ao comparar os dois modelos, foram observados que o M5P apresentou melhores resultados.

Villalva, Gazoli e Filho (2009) apresentam a equação da curva I-V para um módulo FV ajustando a curva em três pontos: circuito aberto, potência máxima e curto-circuito (dados fornecidos por fabricantes). O método proposto encontra a equação de I-V incluindo o efeito das resistências em série e em paralelo.

Soto, Klein e Beckman (2005) desenvolvem equações semi-empíricas para estimação de dados de entrada do M5P que não são disponibilizados pelos fabricantes nas condições de padrões. O modelo apresenta ótimos resultados quando comparados com dados reais referentes a instalações com módulos mSi, pSi e de filme fino em diversas situações de irradiação e temperatura ambiente.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo verificar se o M5P pode representar de forma satisfatória módulos FV para as condições encontradas em Fortaleza, CE, com base no erro entre os valores da corrente calculada através do modelo proposto e da corrente medida para módulos pSi e mSi.

2. METODOLOGIA APLICADA

Na literatura, existem vários modelos matemáticos que podem ser utilizados para representar um módulo FV (BORGES NETO e CARVALHO, 2012). O modelo ideal de um módulo FV é mostrado na região pontilhada da Figura 1, sendo representado apenas por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, levando-se em consideração unicamente o efeito de difusão (efeito de condução predominante em tensões altas), pois este é o efeito mais significativo na região de funcionamento típica da célula (CARVALHO, 2014). A partir desse modelo mais simplificado, alguns autores têm proposto modelos bastante sofisticados que reproduzem com maior precisão as características reais dos módulos, como, por exemplo, modelos que levam em consideração também o efeito de deriva da corrente (dois diodos) e incluem as resistências parasitas (resistências série e paralelo).

2.1 Modelo de 5 Parâmetros (M5P)

O modelo considerado no presente artigo para representar a célula FV é o M5P, sendo quatro destes parâmetros mostrados na Figura 1, apresentando um diodo e sua corrente de saturação reversa (I_o), uma fonte de corrente para representar a corrente fotogerada (I_L), duas resistências, uma em série (R_S) e uma em paralelo (R_{Sh}) e o quinto parâmetro é o fator de idealidade (m) (SOTO, KLEIN e BECKMAN, 2006).

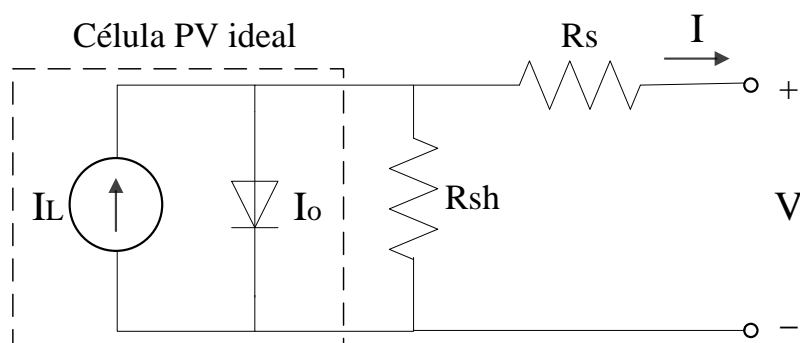


Figura 1 - Circuito elétrico equivalente de um módulo FV.

A equação básica da teoria dos semicondutores que descreve matematicamente a característica I-V da célula FV ideal é a Equação (1).

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{n_1 kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Em que I_L é a corrente fotogerada, I_o é a corrente de saturação reversa do diodo, q é a carga do elétron ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C), k é a constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura da junção p-n em K e n_1 é a constante de idealidade do diodo. A Figura 2 mostra a curva I-V originada a partir dessa equação.

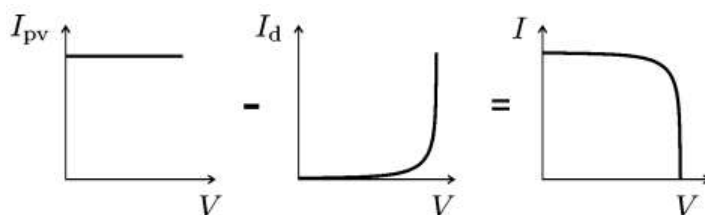


Figura 2 - Curva I-V do modelo ideal da célula fotovoltaica (VILLALVA, GAZOLI e FILHO, 2009).

Com a inclusão das resistências em série e em paralelo, aproximando-se mais o modelo a uma célula FV real e considerando a presença de N_s células em série, a curva I-V de um módulo FV pode ser representada pela Equação (2).

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{N_s n_1 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

Em que R_s é a resistência em série, R_{sh} é a resistência em paralelo, N_s é o número de células em série e V_t é a tensão térmica, que depende da temperatura da célula T_c e é definida pela Equação (3).

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (3)$$

A Equação (2) origina-se da curva mostrada na Figura 3, em que se destacam três pontos: curto circuito $(0, I_{sc})$, MPP (V_{mp}, I_{mp}) e circuito aberto $(V_{oc}, 0)$.

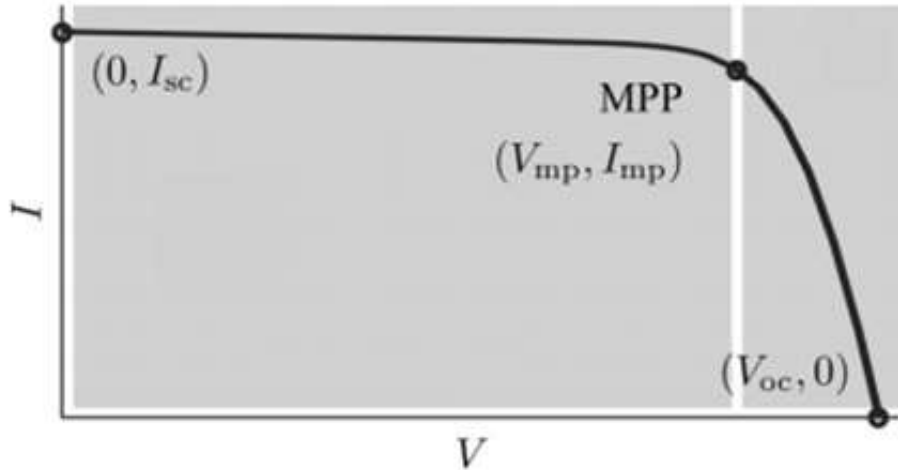


Figura 3 - Curva I-V do modelo de 5 parâmetros (VILLALVA, GAZOLI e FILHO, 2009).

Os fabricantes de módulos FV fornecem apenas alguns dados experimentais referentes às características elétricas e térmicas. Alguns dos parâmetros necessários para o ajuste dos modelos não são encontrados nas especificações dos fabricantes, tais como a corrente fotogerada, as resistências em série e em paralelo, a constante de idealidade do diodo e a corrente de saturação reversa do diodo. Os *datasheets* dos módulos FV informam basicamente a tensão nominal de circuito aberto V_{oc} , a corrente nominal de curto circuito I_{sc} , a tensão no ponto de máxima potência V_{mp} , a corrente no ponto de máxima potência I_{mp} , o coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto $\mu_{V_{oc}}$ e o coeficiente de corrente de curto circuito $\mu_{I_{sc}}$, sendo todos os dados referentes às condições de teste padrão de temperatura e irradiância solar.

Como a Equação (2) é não linear, esta pode ser resolvida por um método iterativo. Porém, necessita-se dos parâmetros iniciais para alcançar a convergência. O seguinte método analítico é utilizado no presente artigo para encontrar esses parâmetros. Os cinco parâmetros I_L , I_o , R_s , R_{sh} e m ($N_s n_1$) são calculados para determinadas condições de temperatura do painel e irradiância solar a partir dos valores de V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} e I_{mp} e usando as seguintes definições de R_{so} e R_{sho} :

$$R_{so} = - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} \quad (4)$$

$$R_{sho} = - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{sc}} \quad (5)$$

Em que R_{so} e R_{sho} são, respectivamente, as inclinações nos pontos de circuito aberto e curto circuito. Segundo CELIK e ACIKGOZ, (2007), sugere-se R_{so} entre 0,30 e 0,33 Ω e R_{sho} entre 50 e 170 Ω . Os valores usados neste artigo para R_{so} e R_{sho} são, respectivamente, 0,33 e 150 Ω , porém é válido salientar que a análise do MPP é pouco sensível a mudanças nos valores dessas constantes. As equações utilizadas para calcular os cinco parâmetros são as Equações (6), (7), (8), (9) e (10).

$$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_o \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{m V_t} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$I_o = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(- \frac{V_{oc}}{m V_t} \right) \quad (7)$$

$$R_s = R_{so} - \left[\frac{mV_t}{I_o} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) \right] \quad (8)$$

$$R_{sh} = R_{sho} \quad (9)$$

$$m = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_{so} - V_{oc}}{V_t \left[\ln\left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{sh}} - I_{mp}\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}\right]} \quad (10)$$

Em que I_{sc} e V_{oc} são obtidos para valores de irradiação solar e temperatura do painel diferentes dos valores de referência, ou seja, calculados com valores medidos, sendo calculados de acordo com a Equação (11) e (12), respectivamente:

$$I_{sc} = I_{scref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{Isc}(T_c - T_{cref}) \quad (11)$$

$$V_{oc} = V_{ocref} + mV_t \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{Voc}(T_c - T_{cref}) \quad (12)$$

Para calcular a corrente de saída do painel FV, primeiramente, utilizam-se as Equações (11) e (12), assim, encontram-se os valores da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito nas condições dadas de temperatura do painel e irradiação solar. Em seguida, substituem-se esses valores nas Equações (6), (7), (8), (9) e (10) a fim de encontrar os valores dos cinco parâmetros. Finalmente, substituem-se estes valores na Equação (2), obtendo-se a corrente de saída.

2.2 Ponto de Máxima Potência

Como se pode perceber, para o cálculo do parâmetro m , são necessários os valores de V_{mp} e I_{mp} . No presente artigo, para estimar o valor da tensão V_{mp} , foi utilizado, a partir de dados experimentais, o princípio do Método da Tensão Constante, que afirma que a relação entre V_{mp} e V_{oc} é aproximadamente constante para diferentes curvas I-V, ou seja:

$$V_{mp} = k_1 V_{oc} \quad (13)$$

Da mesma forma, para o cálculo da corrente I_{mp} , utilizou-se o princípio do Método da Corrente Constante para se encontrar a constante k_2 :

$$I_{mp} = k_2 I_{sc} \quad (14)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realização da simulação do M5P, foram utilizados os módulos FV Kyocera KS20T (pSi) e Solar Leading (mSi), cujas especificações estão na Tabelas 1 e na Tabela 2. Os valores especificados são para as condições padrões, fornecidas pelo fabricante, obtidas sobre as condições de teste de irradiação de 1000 W/m², AM 1,5 e temperatura do módulo de 25 °C.

Tabela 1 – Especificações elétricas do módulo FV pSi Kyocera KS20T.

Potência nominal	20 W
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,7 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	1,24 A
Corrente de máxima potência (I_{mp})	1,16 A
Tensão de máxima potência (V_{mp})	17,4 V
Coefficiente de temperatura de corrente (μ_{Isc})	0,000315 A/°C
Coefficiente de temperatura de tensão (μ_{Voc})	-0,08 V/°C

Tabela 2 – Especificações elétricas do módulo FV mSi Solar Leading 20 W.

Potência nominal	20 W
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,24 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	1,31 A
Corrente de máxima potência (I_{mp})	1,16 A
Tensão de máxima potência (V_{mp})	17,28 V
Coefficiente de temperatura de corrente ($\mu_{I_{sc}}$)	0,04 %/°C
Coefficiente de temperatura de tensão ($\mu_{V_{oc}}$)	-0,35 %/°C

Foram executadas, para cada módulo FV, simulações sob três condições diferentes de temperatura do painel e irradiação solar. O equipamento utilizado para traçar a curva I-V experimental foi traçador I-V500w, juntamente com a unidade remota Solar02, que mede a irradiação solar local e temperatura do painel FV, ambos do fabricante HT Instruments.

Os resultados dessas simulações foram comparados com medições experimentais e são mostrados na Tabela 3 e Tabela 4. Os erros absolutos médios obtidos foram de aproximadamente 5,46% e 5,79%, respectivamente, para o módulo pSi e para o módulo mSi.

Tabela 3 – Resultados de simulação do módulo FV pSi, Kyocera KS20T.

Dados	G (W/m ²)	T_c (°C)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	Tensão de saída (V)	Corrente de saída		
						Experimental	5 Parâmetros	Erro (%)
1	949,5	34	19,48	1,23	15,56	1,15	1,0864	5,53
2	1035,3	63	19,44	1,36	15,29	1,28	1,2021	6,08
3	1028,7	61	19,49	1,34	15,54	1,25	1,1903	4,78

Tabela 4 – Resultados de simulação do módulo FV mSi, Solar Leading 20 W.

Dados	G (W/m ²)	T_c (°C)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	Tensão de saída (V)	Corrente de saída		
						Experimental	5 Parâmetros	Erro (%)
1	906,7	57	19,92	1,24	15,24	1,18	1,1080	6,10
2	1021,5	59	19,87	1,44	15,45	1,33	1,2580	5,41
3	1003,8	59	19,92	1,44	15,67	1,31	1,2334	5,85

Utilizando-se os parâmetros calculados para os dados da Tabela 3, referente ao módulo FV Kyocera KS20T, foram traçadas as curvas I-V experimental e simulada. A Figura 4 mostra ambas as curvas e, como se pode perceber, a curva I-V obtida a partir do M5P ficou próxima da curva I-V obtida experimentalmente, mostrando que o M5P pode representar de forma satisfatória as características do módulo FV, sendo que o MPP do modelo proposto é um pouco maior que o valor experimental.

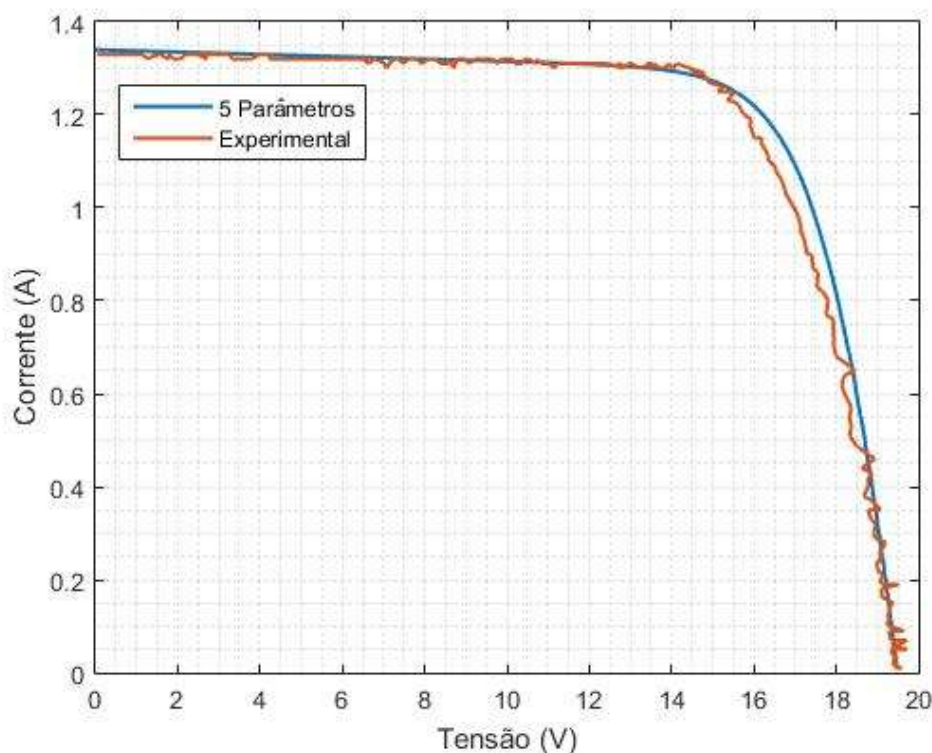


Figura 4 - Curvas I-V experimental e simulada do módulo FV Kyocera KS20T.

4. CONCLUSÃO

No presente artigo foi apresentado o M5P e sua capacidade de representar um módulo FV para as condições de Fortaleza, CE. Como os valores de R_{so} e R_{sho} não são disponibilizados pelos fabricantes, foram adotados valores propostos pela literatura. Porém, foi verificado que o modelo é pouco sensível a mudanças nessas constantes. Para a determinação do ponto de máxima potência, foram utilizados os métodos da tensão e da corrente constante. As correntes obtidas a partir do M5P foram comparadas, então, com medições experimentais em dois módulos FV, sendo obtidos erros absolutos médios de aproximadamente 5,46% (pSi) e 5,79% (mSi) para diferentes condições de irradiação solar e temperatura do módulo, mostrando que o M5P consegue representar melhor o módulo pSi.

Por fim, foram traçadas as curvas I - V referentes à medição experimental e ao M5P, sendo que a curva simulada foi bem próxima da curva experimental. Assim, foi demonstrado que existe uma boa representatividade do modelo com o módulo FV para a região em que o estudo foi realizado. De forma geral, pode-se concluir que o modelo é capaz de representar de maneira eficiente um módulo FV para as condições encontradas em Fortaleza, visto que os erros obtidos foram pequenos, sendo que o MPP do modelo proposto é um pouco maior que o MPP do experimental.

Agradecimentos

Os autores agradecem as instituições de ensino UFC, IFCE, Uni7 e UniFanor pelo apoio para conclusão deste trabalho científico e a CAPES pelas bolsas disponibilizadas de fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Borges Neto, M. R., Carvalho, P. C. M., 2012. Geração de Energia Elétrica – Fundamentos. Editora Érica, (ISBN 978-85-365-0422-3).
- Carvalho, A. L. C. DE., 2014 Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais.
- Celik, A. N., Acikgoz, N., 2007. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. Applied Energy, v. 84, n. 1, p. 1–15.
- Durisch, W.; Bitnar, B.; Mayor, J. C.; Kiess, H.; Lam, K., Close, J., 2007. Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 91, p. 79–84.
- Souza, A. C.; Melo, F. C.; Oliveira, T. L., Tavares, C. E., 2009. Performance Analysis of the Computational Implementation of a Simplified PV Model and MPPT Algorithm. IEEE Latin America Transactions, v. 14, n. 2, p. 792–798, 2016.

- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert Filho, E., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, p. 1198–1208.
- Zarkov, Z.; Stoyanov, L.; Milenov, V.; Voynova, H., Lazarov, V., 2016. Modeling of PV Generators from Different Technologies – Case Study. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), p. 419–424.
- Soto, W. de; Klein, S. A., Beckman, W. A., 2005. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy, v. 80, p. 78-88, 2005.

IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE FIVE PARAMETERS MODEL FOR PHOTOVOLTAIC MODULES IN FORTALEZA

Abstract. *Several mathematical models have been proposed in the literature to represent a photovoltaic (PV) module. This paper aims to present the modeling, for the conditions found in Fortaleza, CE, and, later, the experimental verification of two 20 W modules, one monocrystalline (mSi) and another polycrystalline (pSi), using the 5 parameter model (M5P). In this model, the output current is obtained through the calculation of five variables, these being dependent on some reference values of the PV module. The currents calculated by the simulations for different irradiance and temperature conditions of the module are compared with the values measured in the two systems, showing that the model is able to predict the output current quite effectively, with mean errors of 5.46% and 5.79% for the pSi and mSi modules, respectively.*

Key words: *Photovoltaic system, I-V curve. Five parameter model.*