

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS FOTOVOLTAICOS - UMA ABORDAGEM DIDÁTICA

Lucas Santos de Melo¹ – lucas.melo@ee.ufcg.edu.br
Núbia Silva Dantas Brito³ – nubia@dee.ufcg.edu.br
Karcius Marcelus Colaço Dantas³ – karcius@dee.ufcg.edu.br
Rivanildo Alves Soares² – rivanildo.soares@ee.ufcg.edu.br
Melyna Candice Silva Simões² – melyna.simoes@ee.ufcg.edu.br
Marcus Vinicius Bezerra Medeiros² – marcus.medeiros@ee.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande, ¹COPELE, ²CGEE, ³Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. O artigo apresenta o uso didático do software Matlab®/SIMULINK como ferramenta de modelagem de fontes fotovoltaicas. A partir das equações que caracterizam o circuito elétrico equivalente, o software fornece as curvas características elétricas do modelo, ou seja, as curvas P-V e I-V. O estudo considerou diversas condições ambientais de irradiância e temperatura e avaliou três modelos de fontes fotovoltaicas. Os resultados obtidos para cada modelo foram comparados com os resultados fornecidos pela folha de dados de um fabricante, utilizando três pontos nas curvas P-V e I-V, que foram o ponto de circuito aberto, o ponto de curto-circuito e o ponto de potência máxima. Ao final, os resultados mostraram que o modelo de um diodo com resistência em série e paralela proporciona uma maior exatidão nas características de saída do painel PV.

Palavras-chave: Fontes Fotovoltaicas, Modelagem, Circuito Equivalente, Ferramenta Didática.

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo desenvolvimento sustentável representa hoje um dos grandes desafios da humanidade e dentre as muitas ações que podem ser realizadas, o aumento da participação das energias renováveis na composição da matriz energética mundial constitui, sem dúvida, uma das mais importantes. Dentre as energias renováveis, a fotovoltaica é certamente a que vem recebendo mais atenção da comunidade científica atual e, das várias linhas de pesquisas em andamento, o desenvolvimento de modelos representa uma das mais importantes. O uso de modelos constitui fato corriqueiro, porém importante na prática da engenharia e consiste resumidamente, em fazer uma representação de um fenômeno físico, sistema ou processo. No caso particular das fontes fotovoltaicas, aqui denominadas geradores solares fotovoltaicos (GSF), é comum o uso de modelos constituídos de um circuito elétrico contendo elementos relacionados com o fenômeno fotovoltaico.

Esse é um tema de interesse atual e crescente, tanto para o mercado quanto para a academia. Neste sentido, apresenta-se neste artigo o uso do software Matlab como ferramenta didática no estudo dos sistemas fotovoltaicos. Em particular, dá-se destaque ao módulo SIMULINK como ferramenta importante para programação de modelos de fontes fotovoltaica, haja vista seu ambiente customizado.

2. UM BREVE HISTÓRICO

Análise do estado da arte mostra que um ponto de inflexão na construção de modelos para fontes fotovoltaicas são sem dúvida, os trabalhos de Gow e Manning, que apresentaram em: i) 1996, um modelo de painéis fotovoltaicos para uso em estudos de simulação de sistemas de conversão de energia solar (Gow e Manning, 1996); ii) 1999, um modelo para simulação de células solares baseado em um circuito elétrico equivalente (Gow e Manning, 1999), o qual foi considerado geral e possui como variáveis de entrada, a irradiância e a temperatura e produz as curvas características I-V e P-V de uma determinada célula.

Em 2003, diversas simplificações foram realizadas no modelo proposto por Gow e Manning (1999), buscando analisar o comportamento das curvas características I-V e P-V sem alguns componentes como, por exemplo, o diodo de recombinação e a resistência em paralelo (Markvart e Castañer, 2003). Machado Neto (2006) e Costa (2010) abordaram os quatro principais modelos de geradores fotovoltaicos na forma de circuitos elétricos equivalentes, incluindo um modelo consistindo apenas de uma fonte de corrente em paralelo com um diodo.

Segundo a literatura especializada, os modelos matemáticos dos módulos fotovoltaicos podem ser classificados em duas grandes categorias (Blas *et al.*, 2002):

- Modelos usados para análise de desempenho de células solares em conexão série ou paralela, nos quais as variáveis independentes são, geralmente, o comprimento de onda, a irradiância e a temperatura. Tais modelos baseiam-se nas leis que regem os fenômenos físicos que ocorrem nas células solares e modelam o transporte de portadores elétron-lacuna e mecanismos de recombinação de portadores (Castañer e Silvestre, 2002).

- Modelos usados para o dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos isolados ou interligados à rede elétrica, nos quais as variáveis independentes são, geralmente, o tempo, a irradiância e a temperatura. Tais modelos descrevem a característica elétrica de células ou módulos, por meio de circuitos equivalentes, em maior ou menor grau de complexidade, utilizando parâmetros concentrados ou distribuídos (Gow e Manning, 1996; Araki e Yamaguchi, 2003). Este trabalho foca-se nos modelos desta categoria.

3. MODELAGEM DE FONTES FOTOVOLTAICAS

Conforme a literatura especializada, os modelos dos módulos fotovoltaicos são usualmente, representados pelos circuitos elétricos equivalentes apresentados a seguir.

3.1 Modelo I

Markvart e Castañer (2003) apresentaram um circuito elétrico equivalente de um módulo fotovoltaico, o qual consiste em uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, conforme mostrado na Fig. 1. Na literatura especializada, este modelo é comumente chamado de “modelo ideal”, o qual é constituído de (Machado Neto, 2006; Costa, 2010):

- Uma fonte de corrente, que representa a corrente na célula fotovoltaica quando a radiação solar incide sobre a mesma. O módulo da fonte de corrente é proporcional ao nível de radiação que incide sobre a célula;
- Um diodo que representa o material semicondutor do qual é feito a célula fotovoltaica. O comportamento da corrente na junção PN é representado pela corrente do diodo.

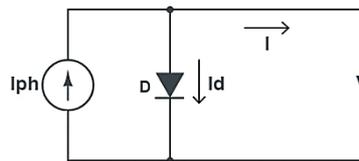


Figura 1 - Modelo I.

Aplicando-se a Lei de Kirchhoff ao circuito da Fig. 1, tem-se:

$$I = I_{ph} - I_d. \quad (1)$$

Sendo:

- I Corrente de saída do módulo (A);
- I_{ph} Corrente fotogerada (A);
- I_d Corrente do diodo de difusão (A).

Aplicando-se um curto-circuito aos terminais do diodo, obtém-se a Fig. 2. Conforme se vê, a corrente gerada é a própria corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico, a qual varia de acordo com a irradiância e a temperatura de operação, sendo expressa por (De Soto et al, 2006):

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{G}{G_r} [I_{ccr} + K_i(T - T_r)]. \quad (2)$$

Sendo:

- I_{cc} Corrente de curto-circuito (A);
- I_{ccr} Corrente de curto-circuito em condição padrão de teste (A);
- G Irradiância do módulo (W/m^2);
- G_r Irradiância de referência ($= 1000 W/m^2$);
- T Temperatura do módulo (K);
- T_r Temperatura de referência ($= 278 K$);
- K_i Coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito (A/K).

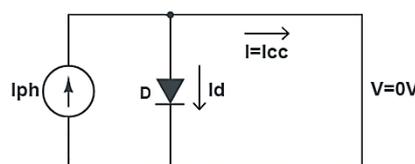


Figura 2 - Modelo I em curto-circuito.

A condição padrão de teste (CPT) é definida para o ensaio do módulo fotovoltaico sobre uma irradiância de 1000 W/m², temperatura de 278 K e velocidade do vento igual a 1,5 m/s. Ao final, obtém-se a corrente do diodo, a qual é expressa por (Costa, 2010):

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{N_s A V_t} - 1 \right) \right]. \quad (3)$$

Sendo:

- I_0 Corrente de fuga do diodo de difusão (A);
- V Tensão de saída do módulo (V);
- N_s Número de células em série que constituem o módulo fotovoltaico;
- A Fator de idealidade do diodo (adimensional), sendo $A \in [1,2]$;
- V_t Tensão térmica (V).

A tensão térmica é determinada pela Eq. (4) (Machado Neto, 2006):

$$V_t = \frac{kT}{q}. \quad (4)$$

Sendo:

- k Constante de Boltzmann ($1,3805 \times 10^{-23}$ J/K);
- q Carga elementar do elétron ($1,609 \times 10^{-19}$ C).

A corrente de saturação reversa do diodo é expressa por (Marques, 2009):

$$I_0 = I_{0r} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \left\{ \exp \left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

Sendo:

- I_{0r} Corrente de saturação reversa do diodo na temperatura de referência (A);
- E_g Energia da banda proibida (1,11 eV).

Fazendo a substituição das Eqs. (3) e (4) na Eq. (1), a corrente de saída do módulo é expressa então, por:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{N_s A k T} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

Para o cálculo da corrente de saturação reversa do diodo na temperatura de referência, faz-se a análise do circuito do módulo fotovoltaico em circuito aberto, como ilustrado na Fig. 3.

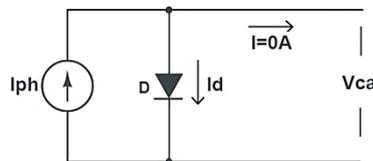


Figura 3 - Modelo I em circuito aberto.

Analisando o circuito do módulo fotovoltaico na condição de circuito aberto via Eq. (7), tem-se (Costa, 2010):

$$0 = I_{ph} - I_{0r} \left[\exp \left(\frac{V_{ca}}{N_s A V_t} \right) - 1 \right], \quad (7)$$

$$I_{ph} = I_{0r} \left[\exp \left(\frac{V_{ca}}{N_s A V_t} \right) - 1 \right], \quad (8)$$

$$I_{0r} = \frac{I_{ph}}{\exp \left(\frac{V_{ca}}{N_s A V_t} \right) - 1}. \quad (9)$$

Sendo, V_{ca} a tensão de circuito aberto (V). Os cálculos dos valores em CPT (I_{ccr} e V_{car}) e os coeficientes de temperatura (K_i) podem ser obtidos através dos fabricantes ou por ensaio do módulo fotovoltaico.

3.2 Modelo II

Celik e Acikgoz (2007) desenvolveram um circuito equivalente para um módulo fotovoltaico constituído de uma fonte de corrente, um diodo e uma resistência em série, a qual foi introduzida para representar as perdas dos contatos metálicos do módulo fotovoltaico, ou seja, as perdas por efeito Joule (Fig. 4).

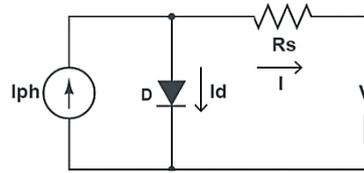


Figura 4 - Modelo II.

Neste caso, a corrente de saída do módulo é computada conforme Eq. (10):

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{N_s AV_t} \right) - 1 \right]. \quad (10)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (10), obtém-se a corrente de saída I que pode ser expressa de acordo com a Eq. (11):

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{N_s AkT} \right] - 1 \right\}. \quad (11)$$

3.3 Modelo III

Alternativamente, Celik e Acikgoz (2007) acrescentaram ao modelo ideal, além da resistência em série, uma resistência em paralelo para representar as perdas por correntes parasitas que circulam no módulo, conforme mostrado na Fig. 5.

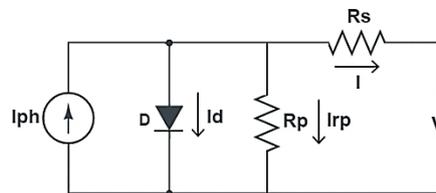


Figura 5 - Modelo III.

Neste caso, tem-se:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{N_s AV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}. \quad (12)$$

Sabendo que a tensão térmica é determinada pela Eq. (4) e substituindo-a na Eq. (12), tem-se:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{N_s AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}. \quad (13)$$

Esta equação resulta na corrente de saída do módulo fotovoltaico.

4. PROGRAMAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS

A programação computacional dos modelos foi feita na ferramenta SIMULINK do *software* Matlab[®]: um ambiente gráfico amigável, customizável, que possui um conjunto de bibliotecas e possibilita a construção de modelos na forma de diagramas de blocos, através de operações do tipo “clique” e “arraste”. Neste trabalho, os modelos foram implementados em quatro etapas conforme apresentado a seguir.

4.1 Cálculo da corrente fotogerada

A primeira etapa consistiu em construir o módulo responsável por solucionar a Eq. (2) conforme mostrado na Fig. 6. As entradas desse módulo são: corrente de curto-circuito em condição padrão de teste, temperatura de operação em Kelvin, temperatura de referência em Kelvin, constante de temperatura da corrente de curto-circuito, irradiância de operação, irradiância de referência.

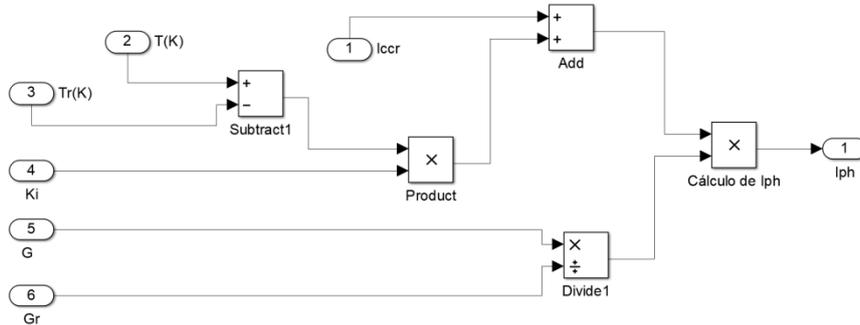


Figura 6 - Módulo que resolve a Eq. (2).

4.2 Determinação da corrente de saturação reversa na temperatura de referência

Em seguida, construiu-se o módulo responsável por solucionar a Eq. (9) conforme mostrado na Fig. 7. As entradas desse módulo são: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, carga do elétron, fator de idealidade do diodo, número de células em série, temperatura de referência em Kelvin, constante de Boltzmann.

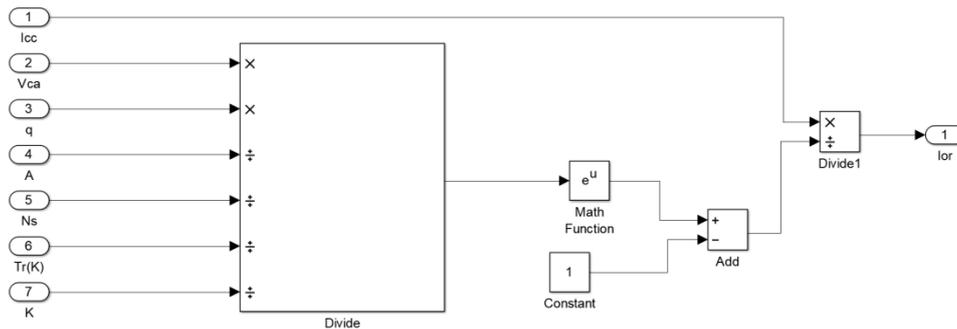


Figura 7 - Módulo que resolve a Eq. (9).

4.3 Cálculo da corrente de saturação reversa do diodo

O próximo módulo a ser construído soluciona a Eq. (5), conforme mostrado na Fig. 8. Como se vê, a solução dessa equação requer o cálculo da corrente de saturação reversa na temperatura de referência, (I_{0r}), o que foi feito no diagrama de blocos da Fig. 7.

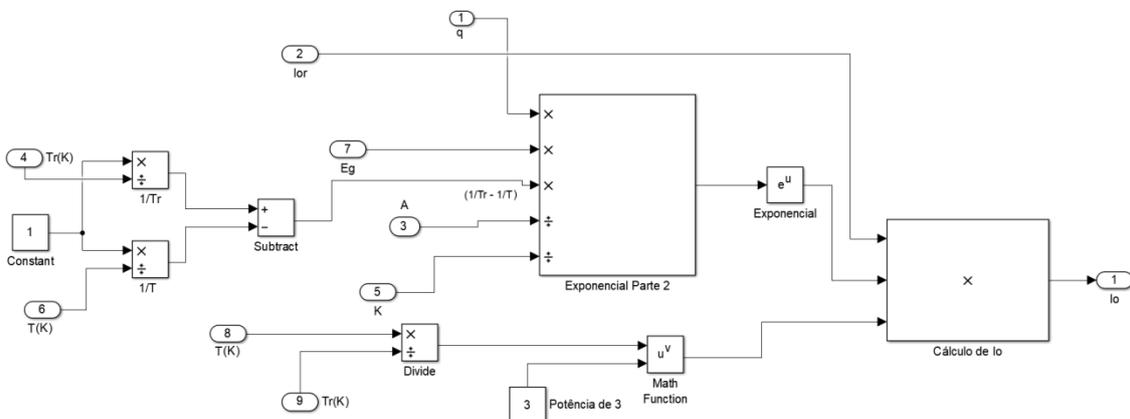


Figura 8 - Módulo que resolve a Eq. (5).

4.4 Cálculo da corrente de saída

Em seguida, construiu-se o módulo que soluciona a Eq. (6), conforme mostrado na Fig. 9. Como se vê, a solução dessa equação requer o valor da corrente de saturação reversa do diodo (I_0), o que foi feito no diagrama de blocos da Fig. 8.

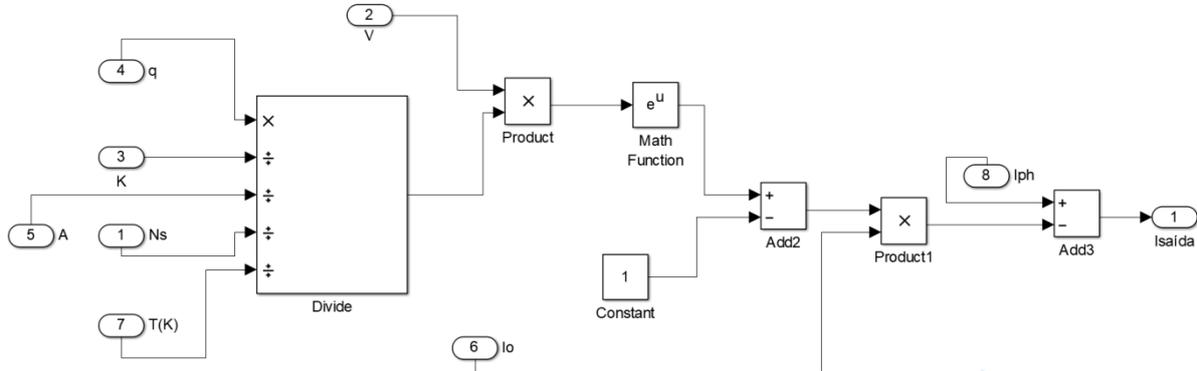


Figura 9 – Diagrama de blocos que resolve a Eq. (6).

4.5 Determinação das curvas características dos modelos

A etapa final consistiu na conexão de todos os módulos. Neste trabalho, adotou-se o procedimento usual que consiste em avaliar o comportamento das curvas sob variações de irradiância e temperatura, as quais foram consideradas como as variáveis de entradas. Entretanto, outras variáveis de entrada como fator de idealidade do diodo, corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto poderão ser consideradas, conforme necessidade do usuário. Ao final, o *software* fornece as curvas características I-V e P-V.

O processo de construção dos modelos foi essencialmente o mesmo, haja visto que os Modelos I e II constituem simplificações do Modelo III. Para ilustrar, apresenta-se na Fig. 10, o modelo final referente ao Modelo I.

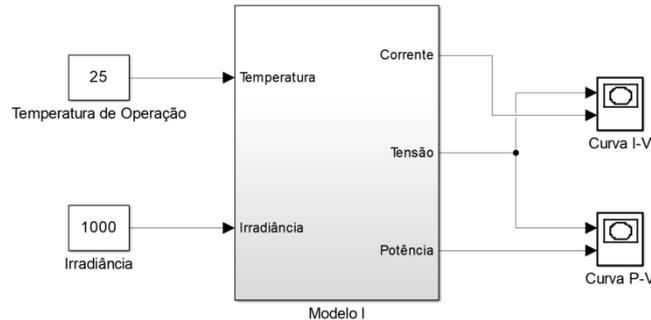


Figura 10 – Modelo I implementado no *software* MATLAB/SIMULINK®.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

A análise dos modelos foi feita avaliando as respectivas curvas características I-V e P-V, considerando variação nas condições ambientais de irradiância e temperatura, além de parâmetros físicos, tais como, resistências em série e paralelo. Um resumo dessa etapa é apresentado a seguir.

5.1 Influência da irradiância nas curvas características I-V e P-V

Inicialmente, manteve-se a temperatura constante em 25°C e variou-se a irradiância em valores de 250W/m², 500W/m², 750W/m² e 1000W/m². Os resultados obtidos são apresentados nas Figs. 11, 12 e 13. Conforme se vê para todos os modelos: i) a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico é fortemente influenciada pela irradiância incidente: quanto maior a irradiância, maior será a corrente produzida; ii) tensão de saída é pouco influenciada pela irradiância, visto que manteve-se praticamente constante; iii) aumento da irradiância resulta em aumento no ponto de operação da máxima potência gerada.

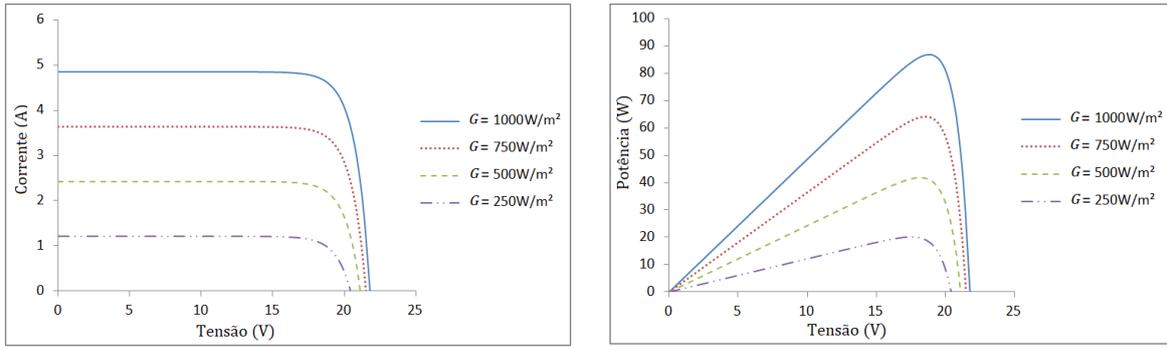


Figura 11 – Curvas I-V e P-V para o modelo I (Temperatura = 25°C).

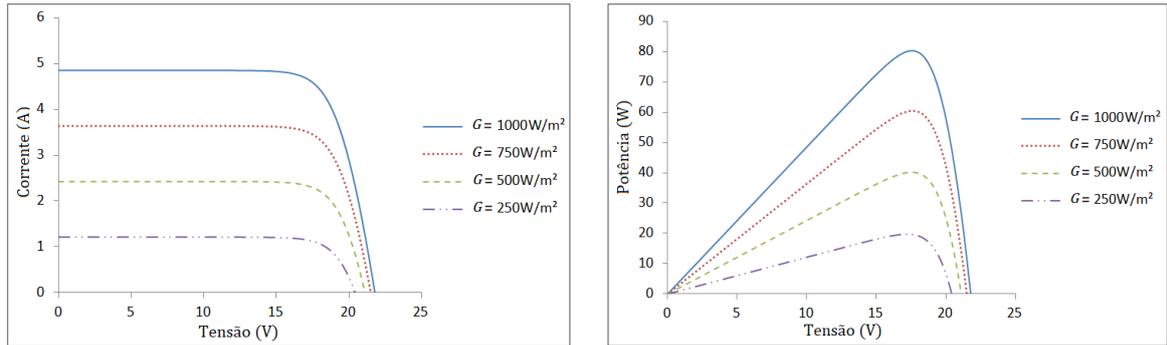


Figura 12 – Curvas I-V e P-V para o modelo II (Temperatura = 25°C).

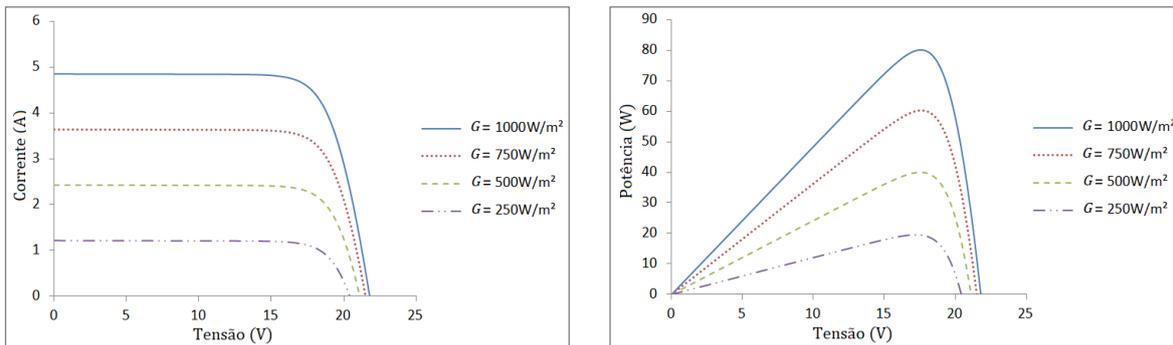


Figura 13 – Curvas I-V e P-V para o modelo III (Temperatura = 25°C).

5.2 Influência da temperatura nas curvas características I-V e P-V

A próxima etapa do estudo consistiu em manter a irradiância constante no valor de 1000W/m² e variar a temperatura em 25 °C, 50 °C e 75 °C. Os resultados obtidos são mostrados nas Figs. 14, 15 e 16. Conforme se vê para todos os modelos: i) a corrente gerada é pouco influenciada com a temperatura; ii) aumento da temperatura provocou redução na tensão de saída e conseqüentemente, na potência gerada pelo módulo fotovoltaico.

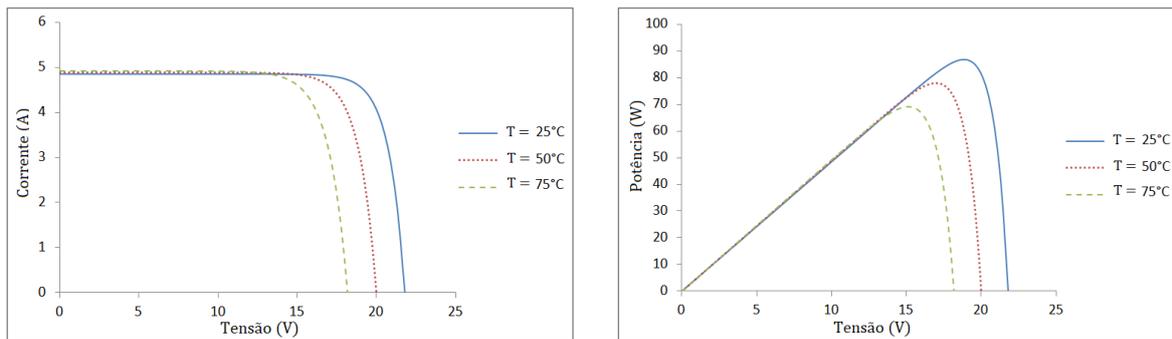


Figura 14 – Curvas I-V e P-V para o modelo I (Irradiância = 1000W/m²).

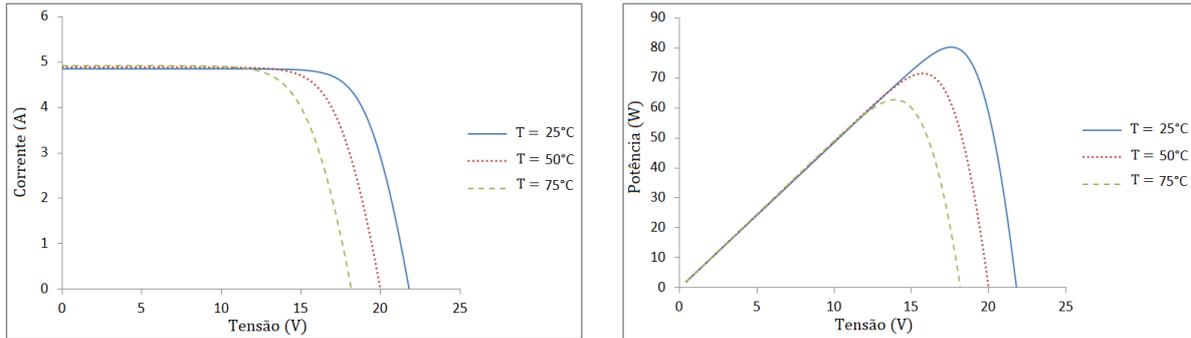


Figura 15 – Curvas I-V e P-V para o modelo II (Irradiância = 1000W/m²).

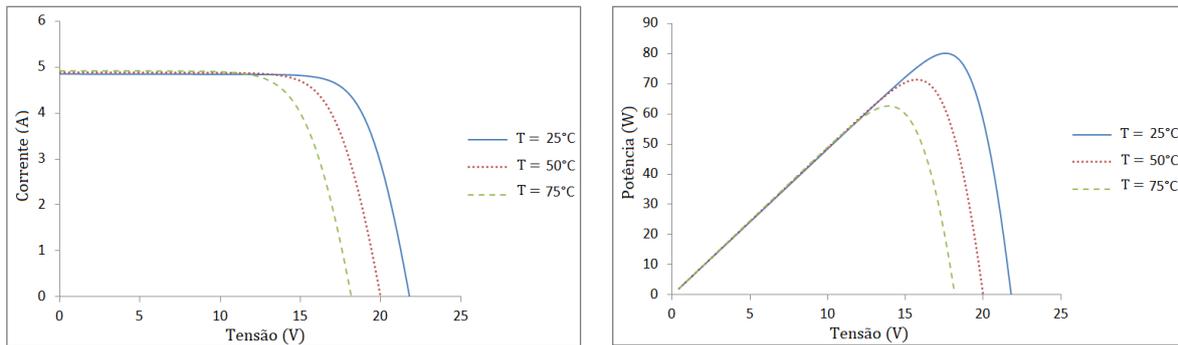


Figura 16 – Curvas I-V e P-V para o modelo III (Irradiância = 1000W/m²).

5.3 Influência da resistência em série nas curvas características I-V e P-V

Em seguida, avaliou-se a influência da resistência em série, mantendo-se constantes os valores de irradiância em 1000W/m² e de temperatura em 25°C. Para realizar este estudo, considerou-se o modelo II, cujos resultados são apresentados na Fig. 17. Inicialmente, utilizou-se um valor de resistência de 0,3085 Ω, a qual foi obtida conforme o método de estimação de parâmetros proposto por Shongwe e Hanif (2015), onde os autores utilizaram o módulo solar fotovoltaico Shell SQ80, o qual foi também empregado neste trabalho. Em seguida, o valor da resistência foi aumentado para 200%, 300% e 400% do seu valor inicial. Conforme se vê: i) os resultados demonstram a forte influência da resistência em série na inclinação da curva I-V, em valores de tensão próximos à tensão de circuito-aberto; ii) quanto maior o valor da resistência em série, maior será a dissipação de energia.

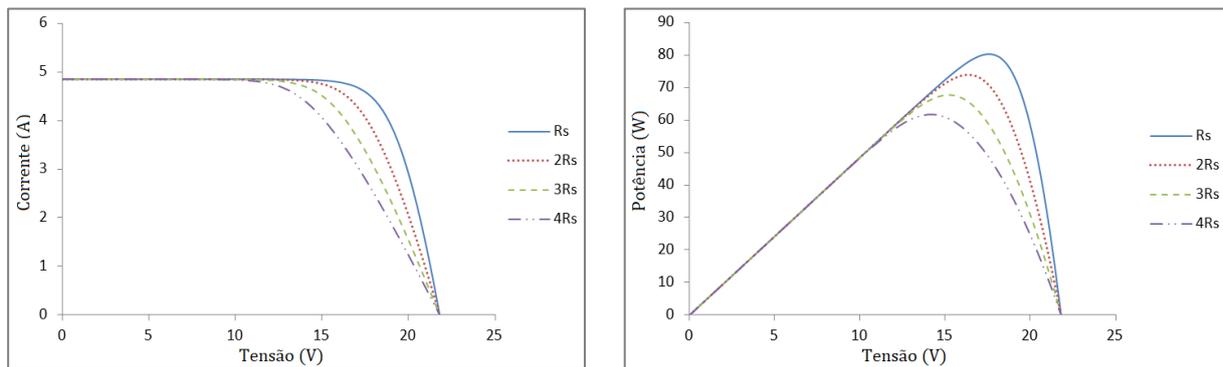


Figura 17 – Curvas I-V e P-V para o modelo II (Irradiância = 1000W/m² e Temperatura = 25°C).

5.4 Influência da resistência em paralelo

Por fim, avaliou-se a influência da resistência em paralelo, mantendo-se constantes os valores de irradiância em 1000W/m², de temperatura em 25°C e resistência em série de 0,3085 Ω. Para realizar este estudo, considerou-se o modelo III, cujos resultados são apresentados na Fig. 18. Inicialmente, utilizou-se um valor de resistência em paralelo de 1676 Ω, a qual foi obtida também, conforme o método de estimação de parâmetros proposto por Shongwe e Hanif (2015). Em seguida, o valor da resistência foi reduzido para 10% e 1% do seu valor inicial. Conforme se vê, à medida

que o valor da resistência em paralelo é reduzido, as correntes de fuga crescem e como consequência, provoca redução na potência produzida pelo painel.

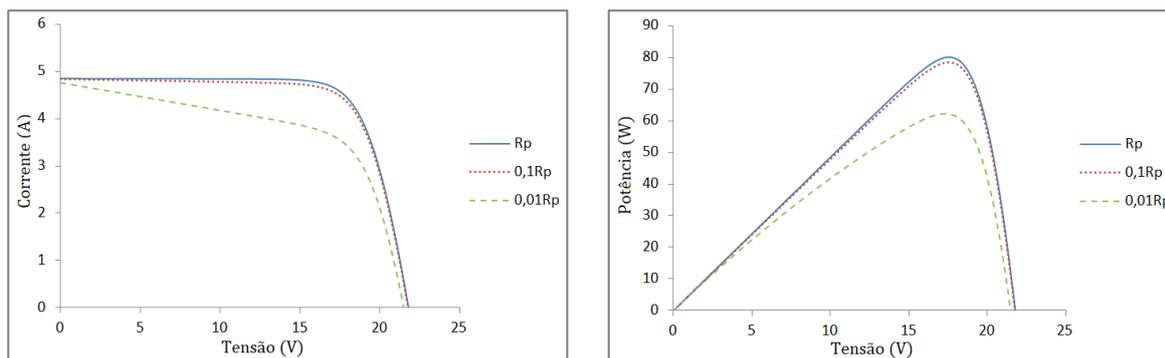


Figura 18 – Curvas I-V e P-V para o modelo III (Irradiância = 1000W/m² e Temperatura = 25°C).

5.5 Análise comparativa das grandezas elétricas obtidas para cada um dos modelos na CPT

Para comparar o desempenho dos modelos, foram utilizados os dados de um módulo solar fotovoltaico com 36 células em série da Shell Solar[®], transcritos na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo SQ80 (Shell Solar) na CPT.

Datasheet Shell SQ80 Photovoltaic Solar Module	
Potência nominal (P_n)	80W
Potência de pico (P_{mpp})	80W
Tensão na máxima potência (V_{mpp})	17,5V
Corrente na máxima potência (I_{mpp})	4,58A
Tensão de circuito aberto (V_{ca})	21,8V
Corrente de curto-circuito (I_{cc})	4,85A

Conforme se pode observar da Tab. 1, a potência máxima fornecida pelo módulo solar é de 80W, o qual será considerado como valor de referência para avaliar a precisão dos modelos quanto à potência de pico gerada. Além disso, duas outras grandezas serão avaliadas para cada modelo: a corrente no ponto de máxima potência e a tensão no ponto de máxima potência, tomando como referência os valores da folha de dados do fabricante. Os valores obtidos para cada modelo são descritos na Tab. 2.

Tabela 2 – Análise comparativa dos modelos no ponto de máxima potência.

	Referência (Fabricante)	Modelo I	Modelo II	Modelo III	Erro		
					Modelo I	Modelo II	Modelo III
P_{mpp}	80W	86,79W	80,27W	80,09W	8,49%	0,34%	0,11%
I_{mpp}	4,58A	4,63A	4,60A	4,59A	1,09%	0,44%	0,22%
V_{mpp}	17,5V	18,75V	17,44V	17,44V	7,14%	0,34%	0,34%

Comparando-se os erros percentuais resultantes de cada modelo com os valores de referência, constata-se que o modelo I (ideal) resultou nos maiores erros, apesar de ter apresentado o maior valor de potência. Isso ocorre porque este modelo desconsidera as perdas por efeito Joule e por correntes parasitas, as quais existem na prática. Por outro lado, o modelo III (com resistência em série e paralelo) apresentou maior exatidão nos resultados, sendo, portanto, o modelo que mais se aproxima da operação real de uma célula fotovoltaica.

6. CONCLUSÕES

Os principais tipos de modelos matemáticos e circuitos elétricos equivalentes de células fotovoltaicas, seus parâmetros e suas curvas características foram estudados e programados. Conforme se observou, o uso do

SIMULINK/Matlab® como ferramenta de modelagem possibilita o estudo de uma gama maior de cenários, inclusive um maior entendimento dos conceitos.

As análises realizadas e o levantamento do estado da arte mostraram que do ponto de vista da relação custo *versus* benefício, o modelo de um diodo com resistência série e paralelo é o mais utilizado atualmente. Dentre os modelos analisados, esse modelo apresentou o menor erro percentual para valores de potência de pico, corrente e tensão no ponto de máxima potência. A análise das curvas I-V e P-V corroboraram o estado da arte: i) aumento da irradiância, mantendo-se a temperatura constante, resulta em aumento no ponto de operação da máxima potência gerada; ii) aumento de temperatura, considerando-se a irradiância constante, resulta na redução da potência máxima.

O estudo apresentado neste trabalho prosseguirá com a realização das seguintes etapas: i) análise comparativa em termos da exatidão dos principais métodos utilizados para a estimação dos parâmetros R_s e R_p e o consequente impacto causado nas curvas P-V e I-V; ii) análise da influência do fator de idealidade e do número de células nas curvas características. A meta é aprofundar a compreensão dos modelos, visando identificar qual deles melhor atende aos requisitos exigidos pelos estudos dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

REFERÊNCIAS

- Araki, K.; Yamaguchi, M. Novel equivalent circuit model and statistical analysis in parameters identification. *Solar energy materials and solar cells*, v. 75, n. 3, p. 457-466, 2003.
- Blas, M. A. E. A. Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable energy*, v. 25, n. 3, p. 371-380, 2002.
- Castañer, L.; Silvestre, S. *Modelling photovoltaic systems using PSpice*. John Wiley and Sons, 2002.
- Celik, A. N.; Acikgoz, N. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models. *Applied energy*, v. 84.1, p. 1-15, 2007.
- Costa, W. T. D. Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2010.
- De soto, W.; Klein, S. A.; Beckman, W. A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar energy*, p. 78-88, 2006.
- Gow, J. A.; Manning, C. D. Development of a model for photovoltaic arrays suitable for use in simulation studies of solar energy conversion systems, 1996.
- Gow, J. A.; Manning, C. D. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, v. 146, n. 2, p. 193-200, 1999.
- Machado Neto, L. D. V. B. Caracterização de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de seguidor de potência máxima para sistemas autônomos aplicados à eletrificação rural. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2006.
- Marques, J. P. P. T. Modelação e Controlo de Conversor DC/AC para interligação de painéis fotovoltaicos à Rede. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2009.
- Shell Solar, Photovoltaic solar module, SQ80 Datasheet.
- Shongwe, S.; Hanif, M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 5, n. 3, p. 938-946, 2015.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC MODELS - A DIDACTIC APPROACH

Abstract. *This paper presents the didactic use of Matlab ® / SIMULINK software as a modeling tool for photovoltaic sources. From the equations that characterize the equivalent electrical circuit, this software provides the electrical characteristic curves of the model, that is, the curves P-V and I-V. The study considered several environmental conditions of irradiance and temperature and evaluated three models of photovoltaic sources. The results obtained for each model were compared with the results provided by a manufacturer's data sheet, using three points on the P-V and I-V curves, which were the open circuit point, the short-circuit point and the maximum power point. At the end, the results showed that the model of a diode with series and parallel resistance provides greater accuracy in the output characteristics of the PV panel.*

Key words: *Photovoltaic Sources, Modeling, Equivalent Circuit, Didactic Tool.*