

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA FINS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Fernando Lessa Tofoli – fernandolessa@ufsj.edu.br

Dênis de Castro Pereira – dencastro10@hotmail.com

Fabio Lopes Marinho – fabiolopesmarinho@gmail.com

Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Elétrica

Carlos Alberto Gallo – gallo@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho apresenta uma comparação de desempenho entre modelos matemáticos desenvolvidos para a simulação de painéis solares fotovoltaicos. Para efeitos de análise, são utilizados três modelos propostos na literatura e o modelo físico do painel disponível no aplicativo computacional PSIM®. Os resultados obtidos em termos das curvas características $I \times V$ e $P \times V$ são apresentados para cada um dos modelos supracitados, destacando-se eventuais vantagens e limitações inerentes aos mesmos.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Modelagem Matemática, Simulação Computacional.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, que se traduz no efeito fotovoltaico. Esse fenômeno consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Um arranjo fotovoltaico pode ser entendido como uma estrutura constituída por módulos ou painéis fotovoltaicos, que por sua vez são formados por células fotovoltaicas interconectadas.

As células monocristalinas comerciais têm eficiência em torno de 18%. As células policristalinas são os tipos mais populares, com uma eficiência média de 14%. As células de filme fino têm um custo de fabricação potencialmente mais baixo que as cristalinas, porém sua eficiência varia de 7 a 13%. Assim, os módulos fotovoltaicos são produzidos com potências de 50 Wp até 300 Wp (Casaro e Martins, 2008).

Para se desenvolver um sistema baseado na utilização da energia solar fotovoltaica, o uso de um aplicativo computacional simulador é imprescindível, bem como deve-se adotar um modelo computacional que reflita o comportamento do arranjo fotovoltaico de maneira adequada (Casaro e Martins, 2007).

Neste contexto, o trabalho desenvolvido por Gow e Manning (1999) foi o primeiro a propor um modelo capaz de interagir com circuitos eletrônicos de potência em aplicativos computacionais que empregam simulação numérica. Entretanto, a dificuldade para se implementar essa proposta estimulou a busca por versões simplificadas desse modelo.

Assim, um modelo próprio para integração com conversores estáticos baseados em eletrônica de potência foi proposto por Casaro e Martins (2008), onde foram obtidos resultados nos aplicativos Simulink® e PSIM®. Além disso, foi desenvolvido um procedimento para que o comportamento do modelo seja ajustado precisamente àquele obtido com módulos fotovoltaicos comerciais. Por outro lado, a utilização de rotinas implementadas em linguagem C requer a utilização de um compilador em conjunto com o aplicativo PSIM para a realização das simulações.

Outra proposta de modelo foi introduzida por Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho (2009), onde se afirma que os valores obtidos para os pontos da corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e máxima potência são exatamente aqueles fornecidos pelo fabricante do dispositivo, validando desta forma o modelo. Entretanto, a obtenção dos parâmetros do modelo é complexa em função da utilização de algoritmos para ajuste dos parâmetros intrínsecos à célula fotovoltaica.

Buscando um modelo simplificado, Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010) propuseram um modelo mais simples onde se desconsidera a presença da resistência em paralelo que normalmente é parte da representação matemática da célula fotovoltaica. Embora sejam mostrados resultados para um painel associado a um conversor *buck* em um carregador de baterias simples, há certo erro no que tange aos valores reais dos parâmetros do painel.

Diante do exposto, este trabalho busca estabelecer uma comparação quantitativa entre os resultados fornecidos pelos modelos supracitados com o modelo do painel disponível no aplicativo PSIM®. Para esta finalidade, todos os arranjos em questão são implementados no ambiente do simulador, sendo que por meio das curvas $I \times V$ e $P \times V$ do painel é possível identificar a exatidão dos valores intrínsecos ao mesmo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Módulo Fotovoltaico

A célula solar é o dispositivo mais importante do sistema fotovoltaico, visto que é responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica. Uma célula solar é, basicamente, uma lâmina que coleta os raios solares, absorvedora dos fótons e um contato metálico posterior. A célula é fabricada de modo a conter em seu interior um campo elétrico que permita separar os portadores de carga elétrica gerados pela luz. Nas células solares de silício cristalino, o campo elétrico interno é fabricado por processos de contaminação controlada e seletiva do material semiconductor. Para uma utilização prática, é necessário conectar várias células em série. Este conjunto de células conectadas é chamado módulo fotovoltaico, onde normalmente são empregadas diversas unidades de modo a se obter um dado nível de tensão desejado. Assim, quando um módulo de 12 V é exposto ao sol, ele gera energia elétrica em corrente contínua, com tensão máxima variando entre 17 V e 21 V.

2.2 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

O módulo gera energia elétrica em corrente contínua, dependendo da intensidade da radiação solar e da temperatura ambiente. A capacidade de um módulo fotovoltaico é dada pela potência de pico em watt-pico (Wp). A condição padrão para determinação desta potência é definida para o módulo exposto a uma radiação solar de 1000 W/m² (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia) e temperatura da célula de 25 °C.

A corrente elétrica depende da irradiação solar variando significativamente com a variação da intensidade da luz. A tensão elétrica é fortemente influenciada pela temperatura. O aumento da intensidade da luz incidente no módulo aumenta a temperatura das células, diminuindo a tensão do módulo, conseqüentemente reduzindo sua eficiência.

O ponto de potência máxima (P_{max}) consiste no ponto da curva $I \times V$ onde a máxima potência é extraída, que pode ser obtida pelo produto da tensão (V_{max}) e corrente (I_{max}) nas quais a potência é máxima, isto é:

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (1)$$

2.3 Circuito Equivalente de Uma Célula Solar Fotovoltaica

A Fig. 1 mostra o modelo do circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica, que pode ser entendido como um circuito elétrico.

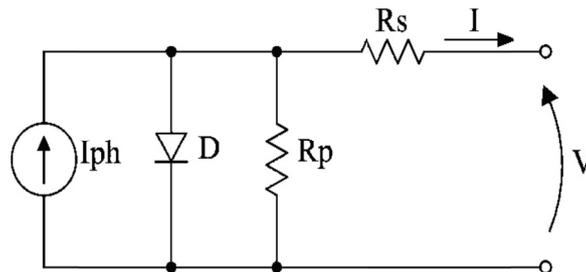


Figura 1 – Circuito equivalente de uma célula solar (Casaro e Martins, 2008).

A característica $I \times V$ de uma célula fotovoltaica pode ser expressa por:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2)$$

onde I_{ph} é a fotocorrente, I_0 é corrente de saturação reversa, R_s é a resistência série e R_p é a resistência paralelo. Além disso, a tensão V_t é dada por $(m \cdot k \cdot T)/e$, sendo que para $m=1$, $V_t=25\text{mV}$ a $T=300\text{ K}$, de modo que m é definido como fator de qualidade do diodo, k é a constante de Boltzmann, e é a carga elétrica do elétron e T é a temperatura da célula solar.

A Eq. (2) fornece uma representação adequada do comportamento intrínseco de uma célula típica de silício cristalino. Entretanto, esta não pode ser empregada diretamente para obter o comportamento da célula. Isto se justifica porque alguns parâmetros, particularmente I_L e I_0 , não podem ser determinados a partir de informações disponíveis na folha de dados do fabricante. Essa dificuldade é superada quando as seguintes premissas são adotadas:

- O efeito da resistência paralelo é desprezível;
- A fotocorrente e a corrente de curto-circuito I_{SC} são iguais;
- $\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t}\right) \gg 1$ ao longo de toda a faixa de operação da célula.

Assim, isso permite que a Eq. (2) possa ser escrita como:

$$I = I_{SC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t}\right) \right] \quad (3)$$

Para $I=0$, a tensão de circuito aberto V_{OC} poderá ser obtida como:

$$V_{OC} = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right) \quad (4)$$

sendo que

$$I_0 = I_{SC} \cdot \exp\left(-\frac{V_{OC}}{V_t}\right) \quad (5)$$

Substituindo-se a Eq. (5) em (3), obtém-se:

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I \cdot R_s}{V_t}\right) \right] \quad (6)$$

A expressão (6) é muito útil, pois os valores de todos os parâmetros que estão do lado direito da equação são facilmente obtidos, permitindo a aplicação imediata da expressão. Entretanto, uma inconsistência surge pelo fato de que $I(V=0) \neq I_{SC}$. Porém, em todas as células solares disponíveis na prática, tem-se que $V_{OC} \gg I \cdot R_s$, o que implica $I(V=0) \cong I_{SC}$ e torna a constatação anterior irrelevante. Somente é possível resolver a Eq. (6) de forma iterativa, através de métodos numéricos como Newton Raphson, pois a variável I aparece em ambos os lados da expressão.

Pode-se calcular a potência diretamente como sendo $P=V \cdot I$. Os parâmetros V_{max} e I_{max} são a tensão e a corrente no ponto de máxima potência e podem ser obtidos a partir de $dP/dV=0$. Contudo, a natureza implícita da expressão resultante restringe sua utilização. Assim, é mais conveniente adotar um método mais simples baseado na relação existente entre a máxima potência efetiva e a máxima potência teórica. Uma expressão empírica que define essa relação é:

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = FF_0 \cdot (1 - r_s) \quad (7)$$

onde:

$$FF_0 = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0.72)}{v_{OC} + 1} \quad (8)$$

$$v_{OC} = \frac{V_{OC}}{V_t} \quad (9)$$

$$r_s = \frac{R_s \cdot I_{SC}}{V_{OC}} \quad (10)$$

Os valores de V_{max} e I_{max} são dados por:

$$\frac{V_{max}}{V_{OC}} = 1 - \frac{b}{v_{OC}} \cdot \ln(a) - r_s \cdot (1 - a^{-b}) \quad (11)$$

$$\frac{I_{max}}{I_{SC}} = 1 - a^{-b} \quad (12)$$

onde:

$$a = v_{OC} + 1 - 2 \cdot v_{OC} \cdot r_s \quad (13)$$

$$b = \frac{a}{1 + a} \quad (14)$$

Esse conjunto de expressões é válido para $V_{OC} > 15$ e $r_s < 0,4$, obtendo-se uma precisão de 99%. Para prever a curva $I \times V$ de um arranjo fotovoltaico, é necessário tecer algumas considerações a fim de se conseguir uma boa exatidão, dadas a seguir

1) A corrente de curto-circuito de uma célula solar depende exclusiva e linearmente da radiação.

$$I_{SC}(G) = \frac{I_{SC}^*}{G^*} \cdot G_{eff} \quad (15)$$

onde G_{eff} é o valor efetivo da irradiância solar e G^* é a irradiância solar em STC (*standard test conditions* – condições de teste padrão), que corresponde a 1000 W/m² e 25 °C.

2) A tensão de circuito aberto V_{OC} depende da temperatura das células solares T_c , mas esta tensão decresce linearmente com o aumento da temperatura.

$$V_{OC}(T_c) = V_{OC}^* + (T_c - T_c^*) \cdot \frac{dV_{OC}}{dT_c} \quad (16)$$

sendo que o coeficiente de temperatura da tensão dV_{OC}/dT_c é negativo.

3) A resistência série é uma propriedade das células solares, não sendo afetada pelas condições de funcionamento.

4) A temperatura de operação da célula solar acima da temperatura ambiente é proporcional à da radiação incidente.

$$T_c = T_a + C_t \cdot G_{eff} \quad (17)$$

onde a constante C_t é dada por:

$$C_t = \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800 \text{ W/m}^2} \quad (18)$$

Os valores de NOCT para módulos comerciais variam de 42 °C a 46 °C e os valores de C_t estão entre 0,027 e 0,032 °C/(W/m²). Porém, se o parâmetro NOCT for desconhecido, adota-se $C_t=0,030$ °C/(W/m²) (Fuentes, 1984).

No que se refere ao modelo da Fig. 1, é importante ressaltar ainda a influência de R_s e R_p , sendo que Casaro e Martins (2008) afirmam que R_s interfere na inclinação da curva I-V após o ponto de operação de máxima potência, justamente quando os módulos fotovoltaicos passam a se comportar como fonte de tensão. Por sua vez, o parâmetro R_p regula a inclinação antes do ponto de operação de máxima potência.

3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

Para a realização da comparação entre os modelos de painel fotovoltaicos, considera-se o painel KC200GT, que foi empregado nos trabalhos desenvolvidos por Casaro e Martins (2008), Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho (2009) e Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010). Os modelos supracitados são brevemente discutidos e comparados com os resultados fornecidos pelo modelo físico do painel disponível no aplicativo computacional PSIM®, conforme a discussão apresentada na sequência.

As características do painel KC200GT fabricado por Kyocera são (Kyocera, 2013):

- Tensão no ponto de máxima potência (STC) = 26,3 V;
- Corrente no ponto de máxima potência (STC) = 7,61 A;
- Tensão de circuito aberto (STC) = 32,9 V;
- Corrente de curto-circuito (STC) = 8,21 A;
- Coeficiente de temperatura de $I_{SC} = 3,18 \cdot 10^{-3}$ A/°C.

3.1 Modelo Proposto por Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010)

A proposta do trabalho de Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010) consiste no desenvolvimento de um modelo de painel fotovoltaico simples que pode ser integrado a conversores estáticos, mas sem considerar o valor de R_p , citando ainda o uso de uma relação que define a máxima potência efetiva como uma porcentagem da máxima potencia teórica, de acordo com as expressões vistas na Seção 2.3. O circuito implementado para um nível de radiação de 1000 W/m² e 25 °C é mostrado na Fig. 2.

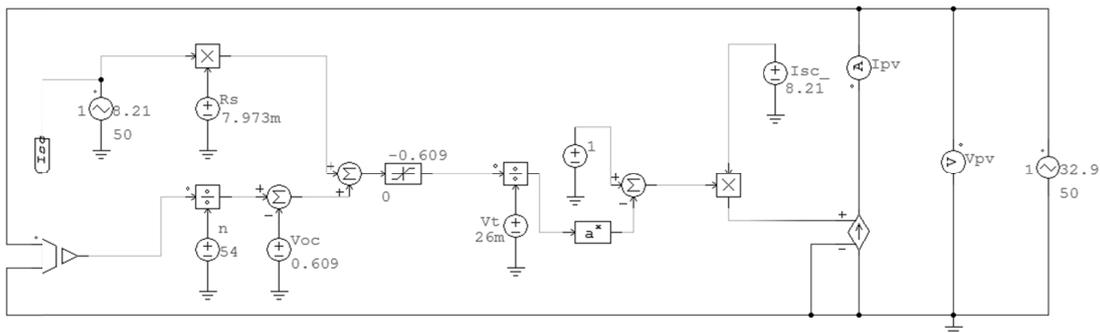


Figura 2 – Modelo proposto por Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010).

Assim, as curvas características $I \times V$ e $P \times V$ obtidas pelo modelo da Fig. 2 são mostradas na Fig. 3, onde se obtém aproximadamente 202 W para a máxima potência, o que corresponde a um erro de aproximadamente 1% se comparado ao valor de 200 W para a máxima potência, fornecido pela folha de dados do fabricante do painel KC200GT.

Na Fig. 2, constata-se que $R_s=7,973$ mΩ foi empregado, sendo esta uma aproximação fornecida pela seguinte equação:

$$R_s = \frac{V_{OC} - V_{max} + V_t \cdot \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}}\right)}{I_{max}} \quad (19)$$

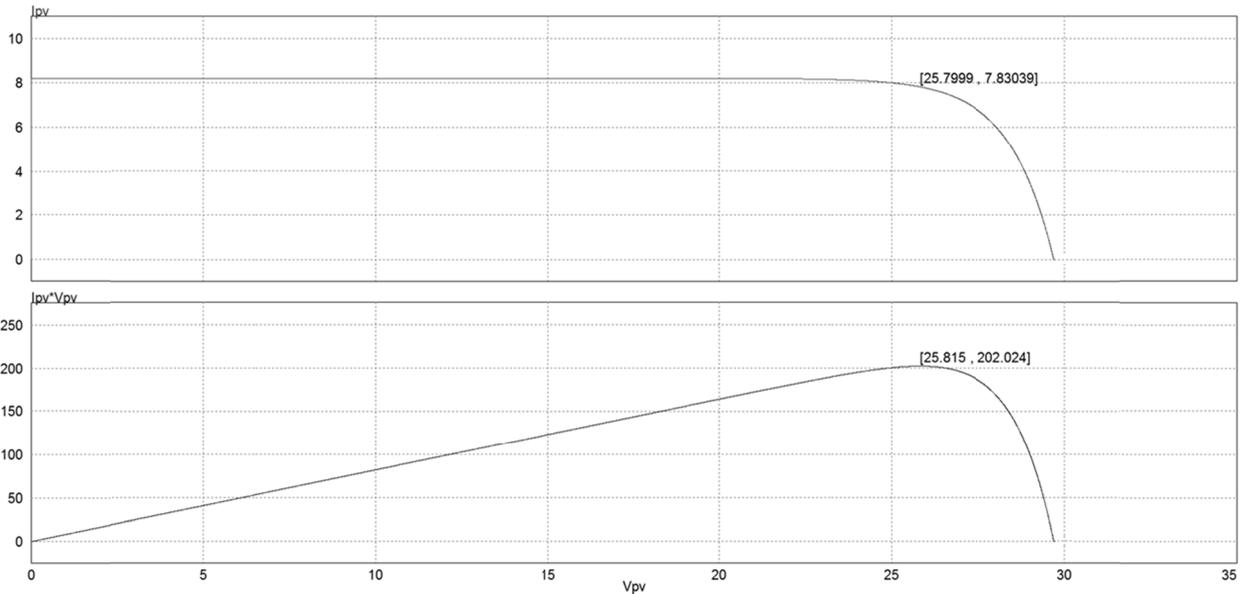


Figura 3 – Curvas características do painel KC200GT para 1000 W/m^2 e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli, 2010).

Porém, no trabalho de Casaro e Martins (2008), foi obtido $R_s=8,745 \text{ m}\Omega$, sendo este um modelo mais realista que considera a presença de R_p . Assim, ajustando-se o parâmetro R_s no modelo da Fig. 2, obtêm-se as curvas da Fig. 4, onde o valor da máxima potência é praticamente o mesmo fornecido pelo fabricante.

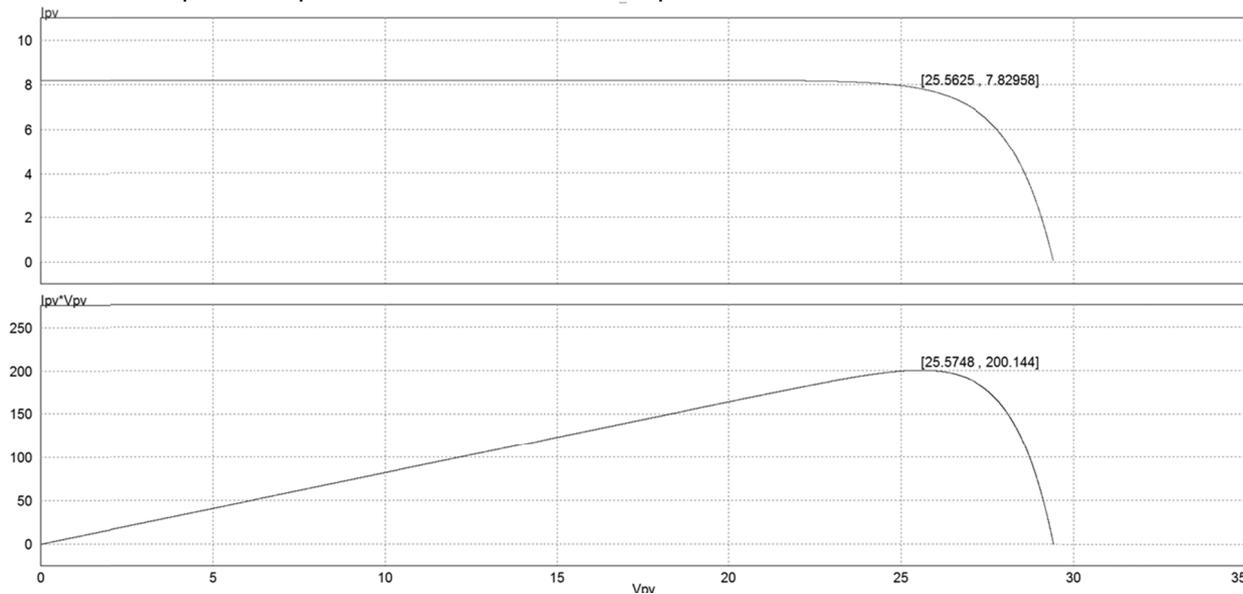


Figura 4 – Curvas características do painel KC200GT para 1000 W/m^2 e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli, 2010) obtidas com o ajuste de R_s .

3.2 Modelo Proposto por Casaro e Martins (2008)

A modelagem do painel fotovoltaico proposta por Casaro e Martins (2008) considera que a precisão da modelagem aumenta quando as não linearidades são adotadas e representadas através das resistências série e paralela. Assim, considera-se a forma completa da Eq. (2), sendo que a corrente I é determinada através do Método de Newton-Raphson:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (20)$$

Além disso, desenvolve-se uma DLL (*Dynamic Link Library* – Biblioteca de Acesso Dinâmico), escrita em linguagem C++, a qual pode ser utilizada no aplicativo PSIM®, como mostra a Fig. 5. As curvas mostradas na Fig. 6 demonstram que os valores obtidos são muito próximos das características fornecidas pelo fabricante.

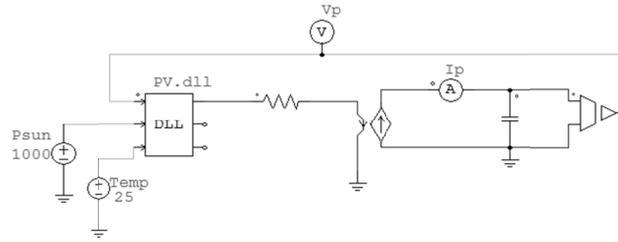


Figura 5 – Modelo proposto por Casaro e Martins (2008).

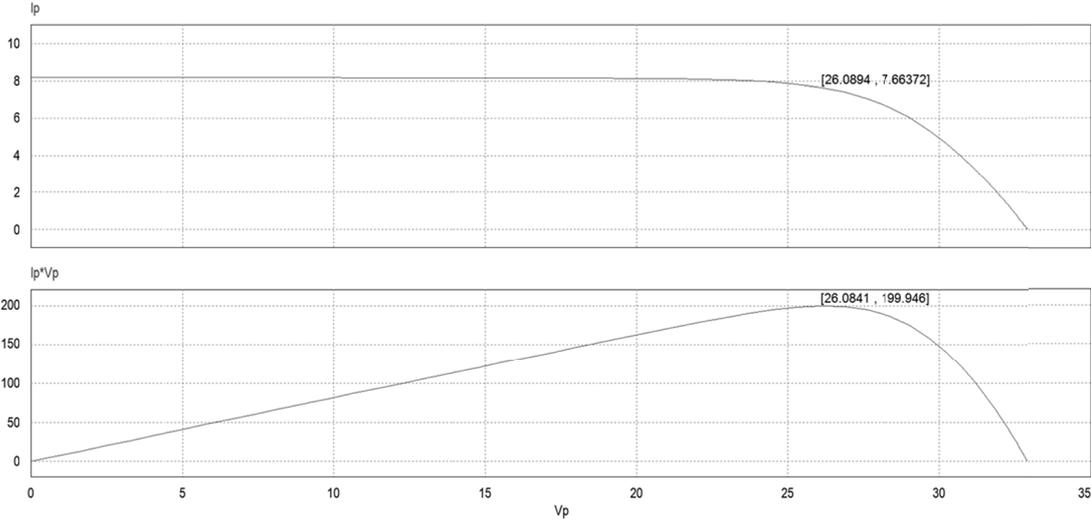


Figura 6 – Curvas características do painel KC200GT para 1000 W/m² e 25 °C (Casaro e Martins, 2008).

3.3 Modelo Proposto por Villalva, Gazoli e Ruppert Filho (2009)

No trabalho de Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho (2009), foi proposto um modelo onde a curva característica do painel solar fotovoltaico é supostamente idêntica àquela do dispositivo físico real. Neste trabalho, são empregadas as seguintes expressões:

$$I_0 = I_{0,n} \cdot \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (21)$$

$$I_{0,n} = \frac{I_{SC,n}}{\exp\left(\frac{V_{OC,n}}{a \cdot V_{t,n}}\right) - 1} \quad (22)$$

A alteração realizada na Eq. (23) visa igualar as tensões de circuito aberto do modelo com os dados experimentais para uma escala maior de temperaturas. A corrente de saturação I_0 atual é fortemente dependente da temperatura e a nova expressão propõe uma abordagem diferente para expressar a dependência de I da temperatura, de modo que o efeito líquido da temperatura seja a variação linear da tensão de circuito aberto.

$$I_0 = \frac{I_{SC,n} + K_I \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{OC,n} + K_V \cdot \Delta T}{a \cdot V_t}\right) - 1} \quad (23)$$

Segundo o trabalho de Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho (2009), esta equação simplifica o modelo e cancela o erro no entorno de V_{OC} e de outras regiões da curva $I \times V$. O coeficiente de temperatura de V_{OC} que aparece na equação traz informações importantes necessárias para o melhor ajuste da curva $I \times V$ para temperaturas diferentes do valor nominal. Para o ajuste do modelo, dois parâmetros ainda são desconhecidos: R_s e R_p . Para determiná-los, é necessário realizar a solução iterativa de R_s e R_p . Este método iterativo fornece $R_s=0,221 \Omega$ e $R_p=415,405 \Omega$ para o modelo da Fig. 7.

$$R_p = \frac{V_{\max} \cdot (V_{\max} + I_{\max} \cdot R_s)}{\left\{ V_{\max} \cdot I_{pv} - V_{\max} \cdot I_0 \cdot \exp\left[\frac{(V_{\max} + I_{\max} \cdot R_s) \cdot q}{N_s \cdot a} \cdot \frac{1}{k \cdot T}\right] + V_{\max} \cdot I_0 - P_{\max,e} \right\}} \quad (24)$$

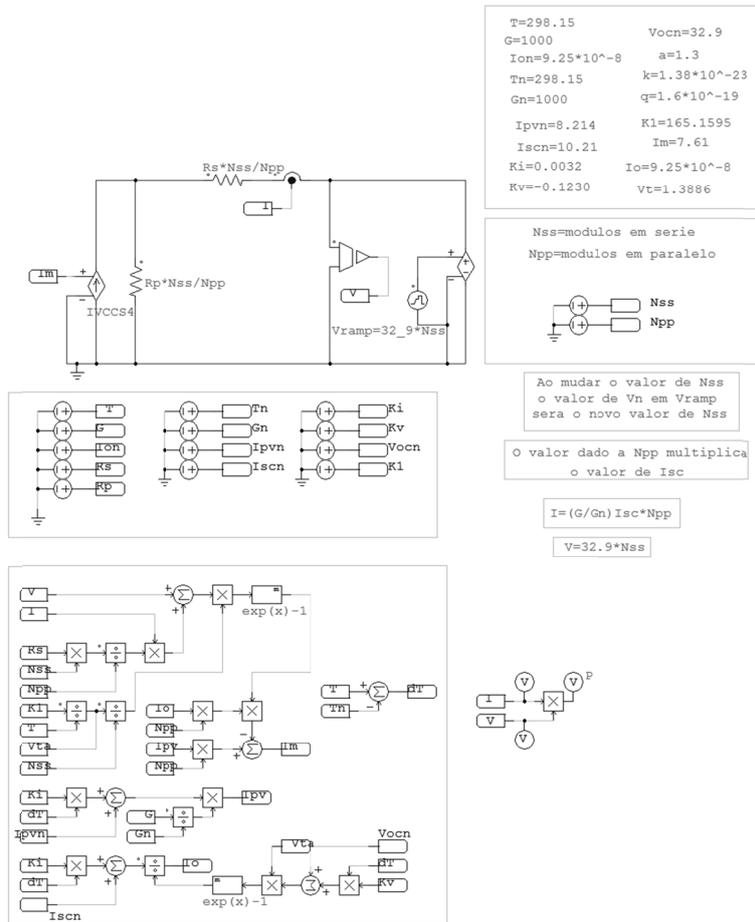


Figura 7 – Modelo proposto por Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho (2009).

São obtidos os valores para o ponto de máxima potência de $P_{max}=201,694$ W, $I_{max}=7,65$ A e $V_{max}=26,385$ V na Fig. 8, havendo um erro inferior a 1% em comparação ao valor informado na folha de dados do fabricante.

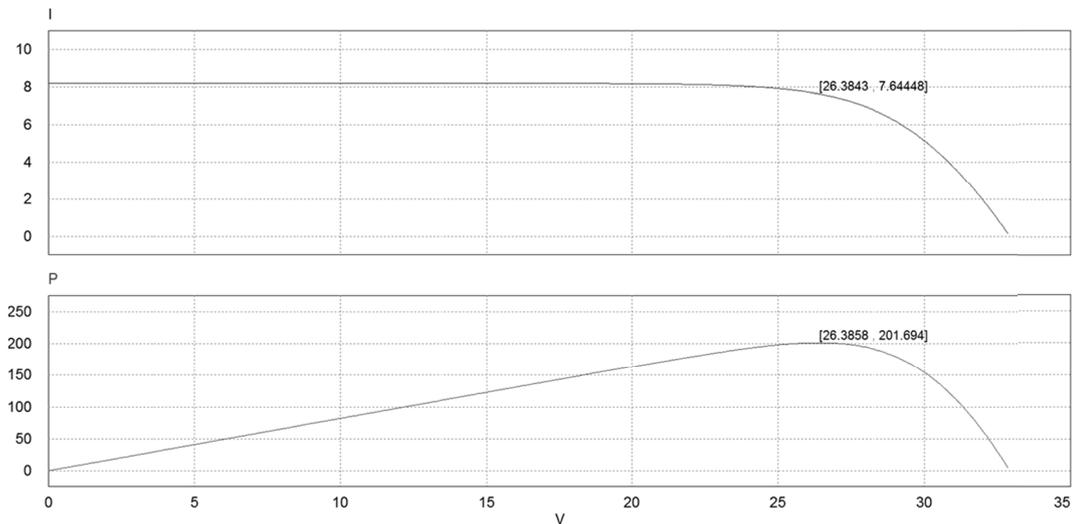


Figura 8 – Curvas características do painel KC200GT para 1000 W/m^2 e 25°C (Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho, 2009).

3.4 Modelo Disponível no Aplicativo Computacional PSIM®

No simulador PSIM®, há o componente *solar module (physical model)*, que agrega todas as características capazes de permitir a geração da curva $I \times V$ de qualquer painel fotovoltaico a partir das características fornecidas pelo respectivo fabricante. Para esta finalidade, deve-se preencher todos os campos mostrados na Fig. 9.

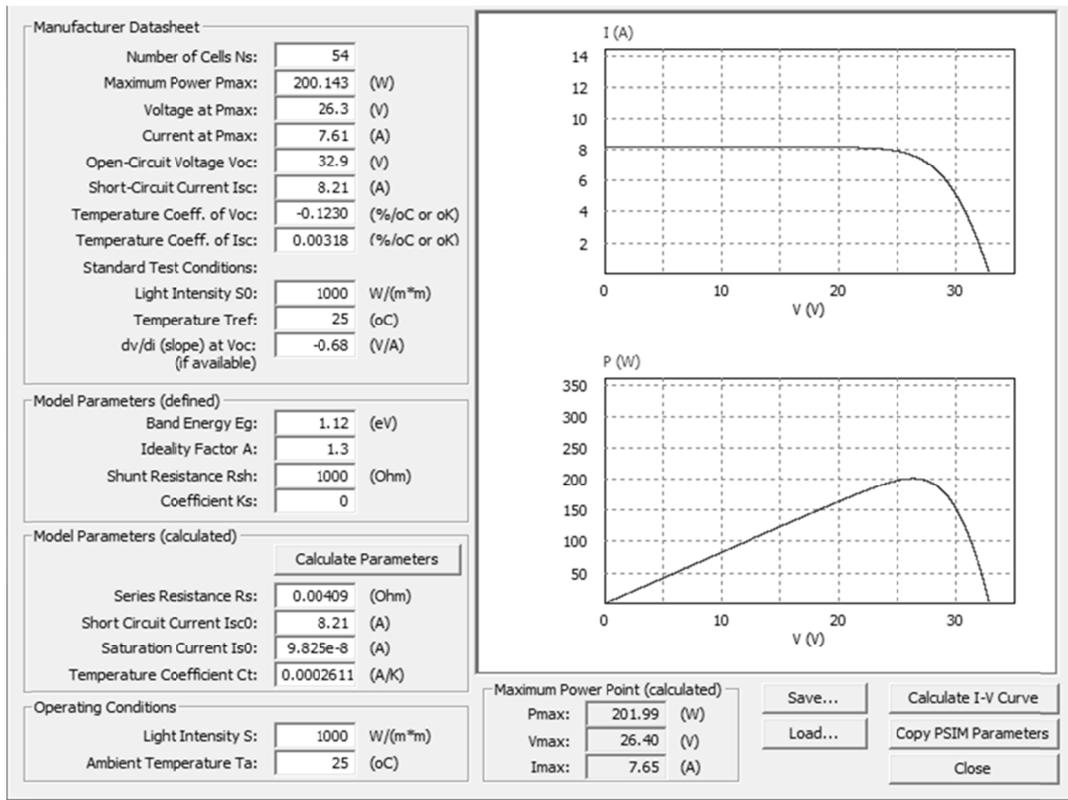


Figura 9 – Dados necessários para a geração e ajuste das curvas características do painel fotovoltaico KC200GT no PSIM®.

Como normalmente não se dispõe dos valores de R_s e R_p , esses parâmetros devem ser ajustados manualmente em uma abordagem do tipo tentativa e erro, sendo que o ajuste fino das curvas para aproximá-las do comportamento real só pode ser obtido dessa forma. Na Fig. 10, tem-se o modelo com os dados que permitem a geração dos gráficos, os quais por sua vez são mostrados na Fig. 11. Novamente, constata-se que a definição do ponto de máxima potência ocorre de forma bastante precisa segundo os dados do fabricante.

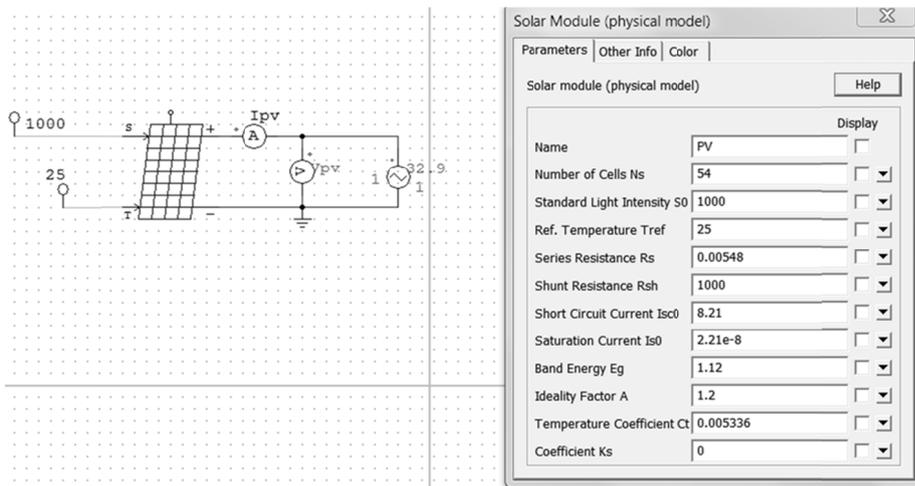


Figura 10 – Circuito para a geração das curvas características do painel fotovoltaico KC200GT no PSIM®.

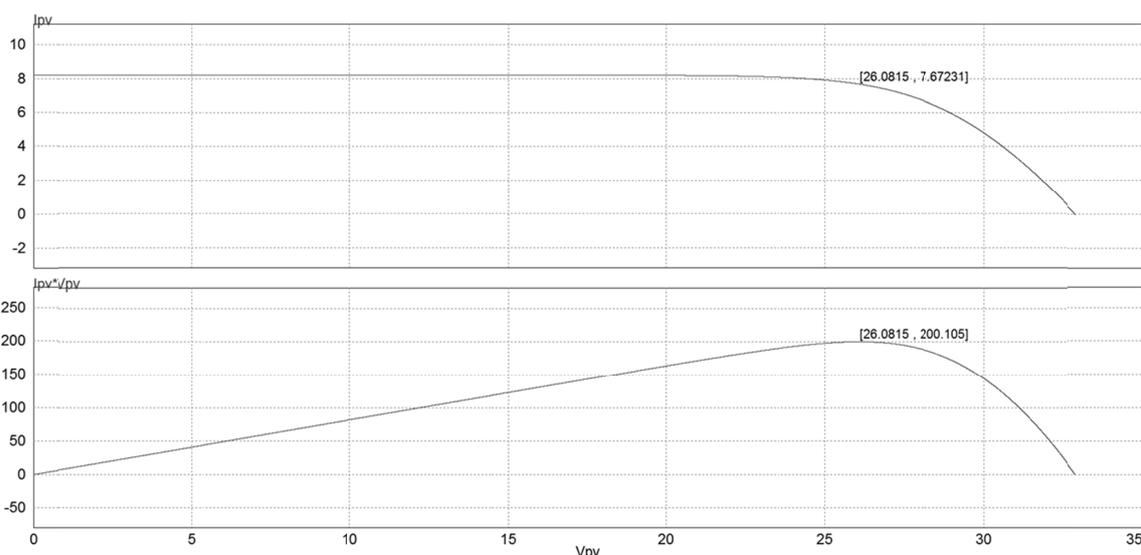


Figura 11 – Curvas características do painel KC200GT para 1000 W/m^2 e 25°C obtidas no PSIM®.

3.5 Comparação e Discussão dos Resultados Obtidos

Na Tab. 1, tem-se uma comparação dos resultados obtidos pelos modelos no que tange aos diversos parâmetros do painel KC200GT, adotando-se como base os valores fornecidos pelo fabricante Kyocera. Embora seja o arranjo mais simples, o modelo simplificado proposto por Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010) é aquele que apresenta os maiores valores de erro no que tange aos parâmetros reais do painel. Porém, o trabalho desenvolvido por esses autores demonstra que o modelo emula de forma satisfatória o comportamento de um painel conectado a um conversor *buck*, embora essa abordagem não seja recomendada para estudos de algoritmos de busca de máxima potência (Brito et al, 2011).

Tabela 1 – Comparação entre os valores obtidos para os parâmetros do módulo KC200GT.

Parâmetro	Fabricante (Kyocera, 2013)	(Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli, 2010)	(Casaro e Martins, 2008)	(Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho, 2009)	PSIM®
Tensão no ponto de máxima potência (STC) (V_{max})	26,3 V	25,815 V	26,0841 V	26,3858	26,085 V
Corrente no ponto de máxima potência (STC) (I_{max})	7,61 A	7,8258 A	7,665 A	7,644 A	7,672 A
Máxima potência (STC) (P_{max})	200 W (+10%, -5%)	202,02 W	199,946 W	201,694 W	200,105 W
Tensão de circuito aberto (STC) (V_{OC})	32,9 V	29,697 V	32,9 V	32,867 V	32,9 V
Corrente de curto-circuito (STC) (I_{SC})	8,21 A	8,21 A	8,204 A	8,209 A	8,209 A

Por outro lado, os métodos propostos por Casaro e Martins (2008) e Villalva, Gazoli, e Ruppert Filho (2009) agregam ótimos resultados ao custo de uma maior complexidade no que tange à implementação computacional, a qual envolve métodos iterativos e mesmo conhecimento de linguagens de programação. Assim, os arranjos são bastante satisfatórios em estudos de rastreamento do ponto de máxima potência e mesmo na interligação de painéis a conversores estáticos de potência.

Por fim, destaca-se que a abordagem fornecida pelo PSIM® é mais simples no que tange ao ajuste do formato das curvas características sem que seja necessário recorrer a conhecimentos avançados de cálculo numérico e linguagens de programação. Porém, o ajuste da curva no intuito de aproximá-la do comportamento do dispositivo real pode ser bastante oneroso em termos de tempo quando se emprega uma abordagem do tipo tentativa e erro.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados quatro métodos diferentes que visam apresentar um modelo de painel fotovoltaico que se aproxime da forma mais exata possível dos dados de catálogo do fabricante.

O modelo de Gaio, Oliveira Jr. e Tofoli (2010) apresenta limitações no que tange a uma série de simplificações adotadas, como o fato de desprezar o efeito da resistência paralelo da célula fotovoltaica. Desta forma, constata-se que, embora o modelo não seja capaz de fornecer a curva característica $I \times V$ exata do painel fotovoltaico, representa uma solução simples e prática, uma vez que os resultados obtidos são bastante satisfatórios e o erro resultante não é significativo.

Comparando-se as simulações destes trabalhos entre si, percebe-se que o trabalho de Villalva e Ruppert Filho (2009) é aquele que apresenta maior exatidão. Porém, assim como o modelo de Casaro e Martins (2008), esta consiste em uma solução mais complexa em termos da obtenção de parâmetros intrínsecos do painel, a exemplo das resistências R_p e R_s .

O modelo disponível no aplicativo PSIM® aparentemente representa uma solução bastante simples e precisa, visto que o ajuste da curva por meio de tentativa e erro ainda é capaz de produzir resultados de simulação satisfatórios.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG, CNPq e INERGE pelo apoio que possibilitou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Brito, M. A. G.; Sampaio, L. P.; Galotto Junior, L.; Canesin, C. A., 2011. Evaluation of MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1039-1044.
- Casaro, M. M., Martins, D. C., 2007. New Method of MPPT Application for Dual-Stage Inverters. 9th Brazilian Power Electronics Conference, pp. 676-681.
- Casaro, M. M., Martins, D. C., 2008. Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação. Eletrônica de Potência, vol. 13, no. 3, p. 141-146.
- Fuentes M., 1984. A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Arrays. Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., pp. 1341-1346.
- Gaio, J.O., Oliveira Jr., D. S., Tofoli, F.L., 2010. Estudo de Um Modelo Simples e Prático Aplicado à Simulação de Sistemas de Conversão de Energia Solar Fotovoltaica. XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2010), p. 1-6.
- Gow, J. A., Manning, C. D., 1999. Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies. IEE Proc. on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, p. 193-200.
- Kyocera, 2013. KC200GT – High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module. Disponível em <http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5195.pdf>. Acesso em 01/11/2013.
- Villalva, M.G., Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert Filho, E., 2009. Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays. 11th Brazilian Power Electronics Conference, pp. 1244-1254.

COMPARISON AMONG MATHEMATICAL MODELS OF THE PHOTOVOLTAIC CELL FOR COMPUTER SIMULATION PURPOSES

Abstract. *This paper presents the performance comparison of some mathematical models used in the simulation of solar photovoltaic panels. In order to perform the analysis, three models available in literature and also the physical model of the panel in software PSIM® are used. The obtained results regarding $I \times V$ and $P \times V$ curves are presented for each one of the aforementioned models are presented, while some advantages and eventual limitations are discussed.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Mathematical Modeling, Computer Simulation.*