

AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE CARACTERIZAÇÃO SIMPLIFICADO PARA CELULAS FOTOVOLTAICAS MULTIJUNÇÃO

Elena Peñaranda Chenche, LEST, ing.elenap@gmail.com
Oscar Saul Hernandez, LEST, oscarshm5@gmail.com
Enio Pedone Bandarra, LEST, bandarra@mecanica.ufu.br

Resumo. Foi realizada a simulação em Matlab® de um novo modelo simplificado para caracterização de células fotovoltaicas multijunção. A fim de reproduzir da melhor forma possível o comportamento real destes dispositivos, foram utilizados os dados encontrados na literatura, para definir cinco dos parâmetros próprios de um célula solar (I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} e n) para o modelo elétrico de um diodo sob duas diferentes condições de radiação. Assim foram avaliadas as vantagens e as dificuldades que apresenta o modelo simplificado para caracterização de células fotovoltaicas multijunção em referência ao modelo tradicional SEM.

Palavras chave: fotovoltaico, caracterização, multijunção, modelagem, Matlab.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no campo de energia solar, as células fotovoltaicas multijunção apresentam rendimentos que as põem em posição de destaque como os dispositivos de maior eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica, atingindo até 44% (Nishioka et al. 2010; King et al. 2009). Para alcançar esses altos valores na geração de potência elétrica, estes dispositivos são usados em aplicações de alta concentração solar, através de lentes de Fresnel ou espelhos parabólicos. No entanto, como acontece em todos os outros sistemas para geração de energia elétrica, é de suma importância conhecer as características elétricas do mesmo. Porém, enquanto há uma grande experiência na modelagem do comportamento dos sistemas fotovoltaicos tradicionais ou monojunção, nem todos estes modelos são diretamente aplicáveis para as células fotovoltaicas de alta concentração. Assim, a fim de compreender melhor o comportamento elétrico das células fotovoltaicas multijunção, em referência às condições de funcionamento (irradiância, temperatura, distribuição espectral, etc.), nos últimos anos diferentes autores vêm desenvolvendo modelos matemáticos que permitam a previsão adequada da curva característica IV, e o deslocamento da mesma para distintas condições ambientais. Particularmente neste trabalho é realizada a avaliação do modelo proposto por Fernandez et al. (2013). Esse modelo é baseado na modelagem tradicional de um diodo (SEM), porém apresentando algumas variações que visam diminuir a complexidade na implementação do modelo.

2. MODELOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE CELULAS FOTOVOLTAICAS

2.1. Modelo de um diodo ou SEM

Uma célula solar multijunção pode ser encarada como um arranjo de células solares tradicionais (monojunção) ligadas em série como é mostrado na Fig. 1, onde as fontes de corrente representam a corrente fotogerada (I_{ph}) de cada subcélula ou subcamada, os diodos modelam as junções PN responsáveis pela corrente de saturação reversa (I_0) e pelo fator de idealidade (n) de cada subcélula, a resistência em série (R_s) modela a queda de tensão devido à resistência do material na célula (em alguns modelos esta resistência pode ser totalizada como a soma das resistências em série de cada subcélula) e finalmente, representando uma fuga de corrente, é adicionado um resistor paralelo (R_{sh}). Este modelo também é conhecido pela sigla em inglês SEM (*Single Exponential Model*). Porém, existe uma variante do esquema elétrico onde é incorporado um diodo em paralelo com o diodo da Fig. 1, com o propósito de modelar o fenômeno de difusão e recombinação de portadores minoritários na região de depleção da junção PN. A Eq. (1), modela a corrente de saída da subcélula i , onde V_{th} é a diferença de potencial elétrico ganho devido a temperatura. Este termo fica definido mediante a Eq. (2) na qual k é a constante de Boltzmann e q é a carga do elétron.

$$I^i = I_{ph}^i - I_0^i \left[\exp \left(\frac{V^i + I^i R_s^i}{n^i V_{th}^i} \right) - 1 \right] - \frac{V^i + I^i R_s^i}{R_{sh}^i} \quad (1)$$

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

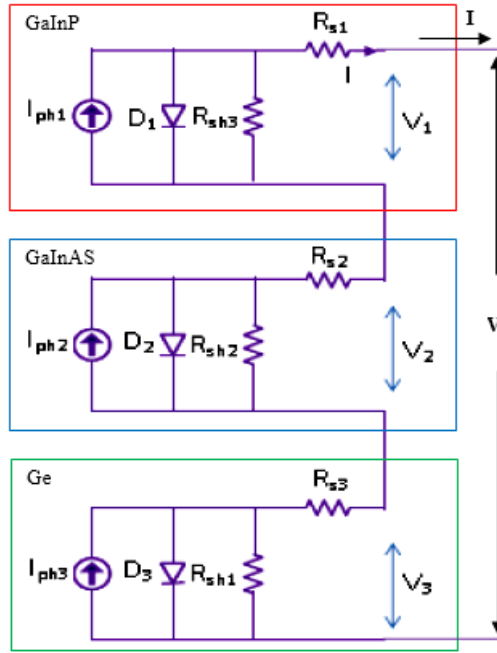


Figura 1. Modelo de um diodo aplicado a uma célula multijunção

Não obstante, o que verdadeiramente interessa é conhecer a corrente e a tensão da célula multijunção como um único elemento. Assim, por se tratar de um arranjo em série a corrente total da célula multijunção será limitada pela subcélula que gere a mínima corrente como se indica na Eq. (3). De maneira oposta a tensão total da célula multijunção é dada pela soma das tensões de cada subcélula como mostra a Eq. (4).

$$I = \min \left(I^i \right) \quad (3)$$

$$V = \sum V^i \quad (4)$$

2.2. Modelo Simplificado de Fernandez

O modelo proposto por Fernandez (2012) plantea algumas considerações que modificam a Eq. (1):

- O valor de R_{sh} é muito elevado, assim os efeitos deste termo no modelo podem ser desprezados;
- O termo exponencial é muito maior do que 1 e;
- Na condição de curto circuito ($V=0$), a corrente é igual a corrente fotogerada.

Estas mudanças ficam evidentes na Eq. (5), onde I_{sc} representa a corrente de curto circuito. Consequentemente, a tensão pode ser descrita segundo a Eq. (6).

$$I^i = I_{sc}^i - I_0^i \exp \left(\frac{V^i + I^i R_s^i}{n^i V_{th}} \right) \quad (5)$$

$$V^i = n^i V_{th} \ln \left(\frac{I_{sc}^i - I^i}{I_0^i} \right) - I^i R_s^i \quad (6)$$

Este modelo baseia-se na utilização de uma célula multijunção equivalente de dupla junção, esta inovação foi criada a partir do análise da Eq. (3), devido as próprias características do material semiconductor da subcélula inferior (Ge) que não permitem, em nenhum dos casos, que a corrente fotogerada desta subcélula seja menor que as correntes fotogeradas das outras camadas. Assim é possível omitir este termo da análise da Eq. (3). Porém, mesmo tendo uma célula equivalente de só duas junções, a tensão total da célula deve ser igual a tensão da célula de tripla junção, este fato é evidenciado nas Eq. (7) e (8), onde o índice e significa “equivalente”.

$$I_{sce} = \min \left[I_{sc1}, I_{sc2} \right] \quad (7)$$

$$V_{oc} = V_{oc1e} + V_{oc2e} \quad (8)$$

A corrente de saturação inversa da nova célula equivalente é obtida substituindo na Eq. (6) a condição de tensão em circuito aberto ($V=V_{oc}$, $I=0$). Assim, esta pode ser definida como mostra a Eq. (9), onde m é o fator de idealidade do diodo equivalente e é tratado como um parâmetro de ajuste.

$$I_0^i = I_{sc}^i \exp \left(\frac{V_{oc}^i}{mV_{th}} \right) \quad (9)$$

Em consequência, a tensão da célula multijunção é exposta na Eq. (10), onde o índice j representa cada um dos pontos da curva característica de célula, e a resistência em série é totalizada como a soma de cada uma das resistências em series de cada subcélula.

$$V_j = mV_{th} \left[\ln \left(\frac{I_{sc}^1 - I_j}{I_0^1} \right) + \ln \left(\frac{I_{sc}^2 - I_j}{I_0^2} \right) \right] - I_j R_s \quad (10)$$

Por último, a Eq. (11) apresenta uma correção devido à resistência paralela na corrente de saída da célula multijunção.

$$I_j^R = I_j - \left(\frac{V_j + I_j R_s}{R_p} \right) \quad (11)$$

3. METODOLOGIA E RESULTADOS

Foi implementado o modelo SEM e o modelo simplificado de Fernandez et al. (2013), para realizar a caracterização de uma célula tripla junção em duas diferentes condições de concentração ($X=1000W/m^2$), porém mantendo constantes a condição de temperatura ($25^\circ C$) e do espectro da irradiância. A fim de reproduzir da melhor forma possível o comportamento real da célula fotovoltaica, foram utilizados os dados experimentais dos trabalhos de Sakurada et al. (2011) e Segev et al. (2012), os quais estão sumarizados na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades de uma célula multijunção para diferentes concentrações

Concentração	1 X			350 X		
Parâmetro	InGaP	InGaAs	Ge	InGaP	InGaAs	Ge
I_{ph} (A)	6.7522×10^{-3}	7.7126×10^{-3}	10.094×10^{-3}	4.292	4.792	6.101
I_0 (A)	3.30×10^{-15}	6.00×10^{-11}	3.00×10^{-5}	1.101×10^{-13}	2.813×10^{-13}	8.543×10^{-7}
n	1.97	1.75	1.96	1.993	1.278	1.421
R_s (Ω)	0.0236	0.0012	0.0008	7.195×10^{-3}	3.352×10^{-3}	2.492×10^{-4}
R_{sh} (Ω)	16.0×10^6	4.5×10^6	540	587	389	100

Foi utilizado o método Newton-Raphson para resolver a Eq. (1) devido à não linearidade da mesma. Para a implementação do modelo de Fernandez (2012), o autor recomenda utilizar 1.96 como valor inicial para o fator de idealidade do diodo equivalente da célula.

Tabela 2. Resultados obtidos a partir dos modelos implementados.

Concentração	1 X			350 X		
Parâmetro	SEM	Fernandez	Experimental*	SEM	Fernandez	Experimental*
I_{sc} (A)	6.7522×10^{-3}	6.7522×10^{-3}	6.74×10^{-3}	4.292	4.292	4.308
I_{mpp} (A)	6.4618×10^{-3}	6.4794×10^{-3}	--	4.1158	4.2053	4.215
P_{mpp}	14.760×10^{-3}	14.756×10^{-3}	14.475×10^{-3}	11.372	11.880	11.991
V_{oc} (V)	2.5697	2.5697	2.53	3.1818	3.1818	3.2
V_{mpp} (V)	2.2842	2.2774	--	2.7631	2.8251	2.845
FF	0.85067	0.85045	0.849	0.8427	0.86996	0.87

*Sakurada et al. 2011 e Segev et al. 2012

Na Tabela (2), são mostrados os principais pontos da curva característica da célula tripla junção, obtidos mediante os modelos implementados, sendo possível também apreciar os pontos experimentais extraídos dos trabalhos de Sakurada et al. (2011) e Segev et al. (2012). Na Fig. (2), podem-se determinar as principais diferenças entre os dois modelos implementados para as duas condições de operação.

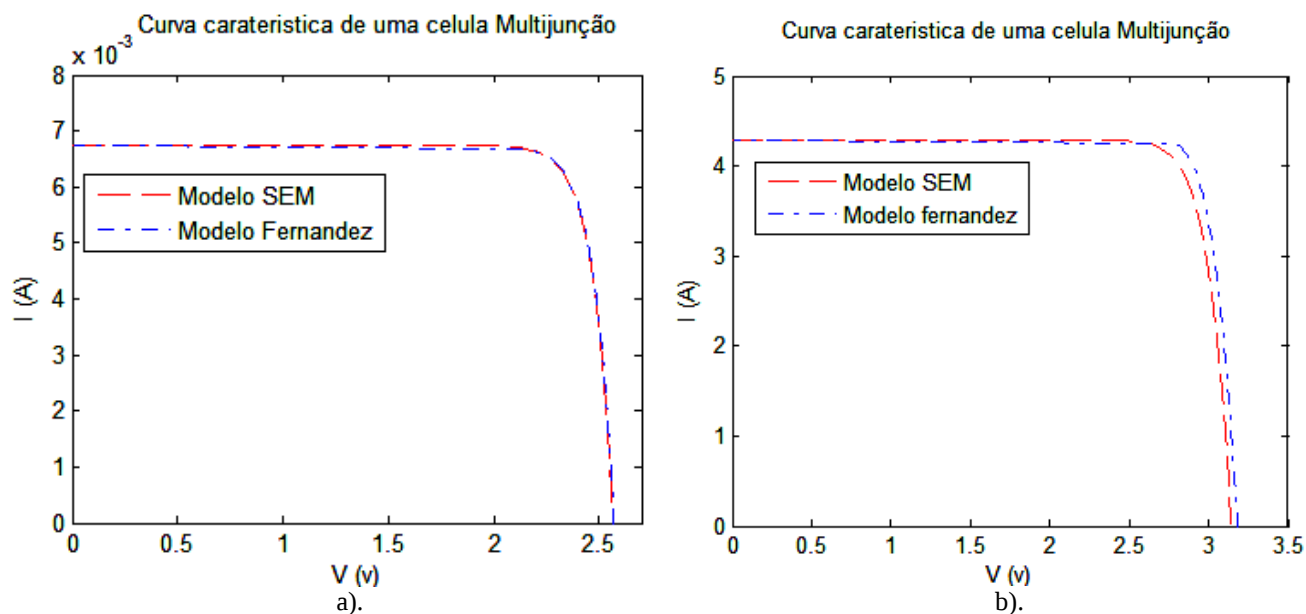


Figura 2. Curva característica de uma célula tripla junção para os modelos implementados: a). Sem concentração ($X=1$) b). Com concentração $X=350$

4. CONCLUSÕES

Como pode ser observado na Tab. (2) e na Fig. (2), o modelo SEM em comparação com os dados experimentais apresentou o menor erro na condição sem concentração, já na condição de concentração ($X=350$) apresentou potência máxima e fator de preenchimento (FF) menores que o esperado. O modelo proposto por Fernandez (2012) apresentou boa concordância nos resultados para as duas condições de radiação, porém mostrou grande dependência dos parâmetros de saída com o parâmetro de ajuste (fator de idealidade do diodo).

No modelo SEM por se tratar de uma expressão não linear, é previsto que a implementação seja um pouco mais complexa que no modelo de Fernandez (2012). No entanto, como o modelo de Fernandez (2012) deve ser realizado por processo iterativo o custo computacional foi maior.

5. REFERÊNCIAS

- Fernández E. F., et al., 2013, "A two subcell equivalent solar cell model for III–V triple junction solar cells under spectrum and temperature variations." *Solar Energy* 92:221–9.
Fernández E. F., 2012, "Modelización y caracterización de células solares III-V multi-unión y de módulos de concentración." PhD thesis, University of Santiago de Compostela.
King RR, et al., 2009, "Band-gap engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells." *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, pp. 55-61
Nishioka K., Sueto T., Uchida M., Ota Y., 2010, "Detailed analysis of temperature characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells." *Journal of Electronic Materials* 39(6):704-708 |
Sakurada Y., Ota Y., Nishioka K., 2011, "Simulation of temperature characteristics of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell under concentrated light." *Japanese Journal of Applied Physics* 50:04DP13
Segev G., Mittelman G., Kribus A., 2012, "Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 98:57-65

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.