

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA A PARTIR DE DIFERENTES MODELAGENS E OTIMIZAÇÃO DA MESMA

Bruno de Ávila Sbampato – brunosbampato@gmail.com

Alexander Eick – alexander.eick@outlook.de

Carlos Felipe Gonçalves Souza – carlosfsgs10@gmail.com

Pablo Nunes Agra Belmonte – pablonuneagb@gmail.com

Pedro Henrique Köhler Marra Pinto – pedrokohlerbh@gmail.com

Wadaed Uturbey – wadaed@cpdee.ufmg.br

Davies William de Lima Monteiro – davies@ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica - PPGEE

Resumo. *Existem muitos softwares para simulação e projeto de células fotovoltaicas. SPICE, uma poderosa linguagem para simular circuitos elétricos, pode simular dispositivos fotovoltaicos também, no entanto pesquisadores nessa área normalmente não usam essa linguagem. É demonstrado como o SPICE pode ser uma excelente ferramenta para simular células fotovoltaicas. Neste artigo uma célula fotovoltaica é simulada com PC1D e vários modelos de SPICE, que são modelos de um diodo com e sem corrente de deriva e um modelo comportamental, e comparam-se os resultados dos mesmos. É mostrado que o PC1D não considera a corrente de deriva, a qual não deve ser desprezada, uma vez que representa cerca de 13% do total da densidade de corrente de curto-circuito. Além disso, mostrou-se que o modelo comportamental também pode simular células fotovoltaicas com certa precisão. Cabe ainda ressaltar que esse modelo é mais fácil de usar, uma vez que usa apenas parâmetros elétricos, que são obtidos facilmente.*

Palavras-chave: *Célula fotovoltaica, Corrente de deriva, Modelagem*

1. INTRODUÇÃO

Uma gama de softwares é comumente utilizada para a simulação e projeto de células e dispositivos fotovoltaicos (FV). Pacotes de softwares como PC1D, Solar Studio, Silvaco, Synopsys, entre outros, são muito populares, porém possuem limitações seja na integração de modelos físicos com circuitos, ou no acesso às equações utilizadas pelos mesmos. Enquanto isso, outras áreas de engenharia elétrica utilizam um poderoso simulador de circuitos SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), que raramente é aproveitado por grupos de pesquisa fotovoltaica no Brasil, embora existam diversos estudos da área no exterior que fazem uso do mesmo. Como por exemplo, Brendel (2012) que descreve uma interface gráfica para utilização de modelagens fotovoltaicas a partir de ferramentas SPICE. Já Iero (2014) simula um sistema FV completo permitindo a análise da alteração de seu comportamento de acordo com a mudança de parâmetros dos componentes, irradiação, temperatura e carga. O SPICE resolve malhas e nós em um circuito através de operações matriciais, utilizando modelos dos elementos de circuito. Novos modelos de componentes podem ser diretamente definidos no ambiente de simulação.

A proposta de utilização do SPICE para sistemas fotovoltaicos foi formalizada por (Castañer, 2002), que enxergou ali a possibilidade de integrar aspectos físicos de uma célula com sistemas solares fotovoltaicos, incluindo *strings*, módulos, rastreadores de ponto de máxima potência, controladores de carga, baterias e inversores. Este artigo tem como principal objetivo ratificar como células solares podem ser facilmente simuladas implementando-se equações em linguagem SPICE, atendendo às necessidades de simulações mais precisas, baseadas em equações mais completas que as normalmente utilizadas pelos softwares de simulação fotovoltaica mais populares, permitindo, adicionalmente, uma visão mais transparente do modelo utilizado. O domínio desta possibilidade adicional de simulação pode ser útil frente à considerável expansão do setor no país.

Com esse intuito, foram realizadas quatro diferentes simulações, que visam demonstrar tanto a facilidade de implementação no SPICE, tal como as diferenças que um modelo mais preciso pode provocar no resultado final da simulação de uma célula solar.

Primeiramente, são extraídos parâmetros físicos de uma célula simulada no PC1D e incorporados ao SPICE. Na primeira simulação, compara-se um modelo em SPICE incluindo a corrente de deriva com outro modelo que considera apenas a corrente de difusão. Em seguida, resultados obtidos no PC1D são comparados com os resultados obtidos com o modelo implementado no SPICE com e sem corrente de deriva. Uma terceira simulação visa comparar a estimação de uma espessura ideal para o emissor da célula baseada na eficiência de conversão do modelo que inclui a corrente de deriva e do modelo simplificado (apenas corrente de difusão). Finalmente, a última simulação compara o modelo comportamental implementado em SPICE, com o modelo de célula fotovoltaica de um diodo.

2. BASE TEÓRICA

Células fotovoltaicas monojunção são dispositivos semicondutores compostos por uma junção p-n na qual ocorre o efeito fotovoltaico. Este se trata da conversão de fótons em energia elétrica devido à sua absorção no interior da célula solar. Neste caso um elétron é excitado da banda de valência para a banda de condução, criando assim um par elétron-buraco. O campo elétrico embutido estabelecido na região de junção p-n é responsável por separar esses portadores de carga fotogerados, causando uma diferença de potencial entre os eletrodos da célula solar e uma corrente fotogerada, que por sua vez depende da intensidade da luz.

2.1 Corrente de deriva e otimização da espessura do emissor

Os pares elétron-buraco podem ser gerados em três regiões: emissor, base e região de depleção. Quando eles se formam nesta última, na qual há um campo elétrico embutido, as cargas são necessariamente separadas pelo mesmo e invariavelmente resultam em corrente externa. À parcela da corrente total devida a este fenômeno dá-se o nome corrente de deriva.

Já os pares elétron-buraco gerados no emissor ou na base podem ou não resultar em corrente externa. Isto porque somente as cargas que atingem a região de depleção, por difusão, são separadas pelo campo elétrico, e os portadores minoritários têm grandes probabilidades de se recombinarem antes de chegarem à região de depleção. À parcela da corrente total devida a este fenômeno dá-se o nome de corrente de difusão.

Apesar de todos os pares elétron-buraco sujeitos ao campo elétrico da junção resultarem em corrente externa, ao passo que somente parte dos pares gerados nas outras regiões (emissor e base) pode ser aproveitada pela carga externa, a corrente de difusão é sempre maior que a corrente de deriva em junções p-n simples. Isto é devido às dimensões da região de depleção serem muito menores que a espessura da célula, resultando em uma maior absorção de luz fora da região de depleção.

Sendo assim, a otimização da espessura do emissor pode resultar em maiores eficiências da célula, já que se uma maior quantidade de fótons for absorvida dentro da região de depleção, a porcentagem de pares elétron-buraco gerados que atingem o circuito externo será maior, haja vista que o campo elétrico embutido nesta região irá separar as cargas e disponibilizá-las para o circuito externo.

2.2 Modelo de um diodo

Na comunidade fotovoltaica existem diversos modelos para representar células solares. O modelo esquemático que mais se utiliza é o modelo de um diodo, representado pela Fig. 1. Nesse modelo, a célula é representada por uma fonte de corrente e um diodo conectado em paralelo. A fonte de corrente tem o propósito de simular a corrente fotogerada (I_{ph}) e sua magnitude é calculada internamente no SPICE a partir de equações que incluem modelos físicos da geração de pares elétron-buraco a partir das características construtivas da célula (material base, dopagem, profundidade da junção), reflexão na superfície, espectro da luz incidente e área superficial. O diodo D_1 implementa a equação de Shockley, obtida originalmente para o mecanismo de difusão de portadores de carga. Adicionalmente, duas resistências são usadas, uma em série (R_s) e uma em paralelo (R_{sh}), relacionadas à resistividade das regiões de emissor, base e contato e à condutância finita da região de depleção, respectivamente.

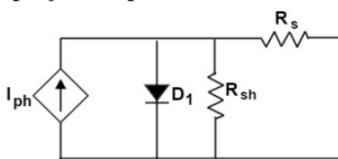


Figura 1 - Modelo de uma célula solar fotovoltaica no SPICE.

2.3 Modelo comportamental

Outra possível maneira de simular células fotovoltaicas é com o modelo comportamental analítico (*Analytical Behavioral Model - ABM*) descrito por Castañer (2002). Nesse modelo não se usa parâmetros físicos ou construtivos da célula FV, como por exemplo, comprimento de difusão, tempo de vida dos portadores ou profundidade de junção, mas sim parâmetros elétricos. São eles: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}), ponto de máxima potência (P_m) com seus respectivos valores de tensão (V_m) e corrente (I_m), coeficientes de variação por temperatura dos parâmetros V_{oc} ($\beta = \partial V_{oc} / \partial T$) e I_{sc} ($\alpha = \partial I_{sc} / \partial T$) e a temperatura de condições de operação nominal (NOCT). Geralmente, esses valores são dados pelo fabricante da célula. No entanto, caso não estejam disponíveis, é possível obtê-los com testes de bancada relativamente simples, sendo essa a grande vantagem em relação a outros modelos, uma vez que parâmetros físicos e construtivos são de difícil extração experimental, além de não serem revelados pelos fabricantes.

Normalmente, o fabricante fornece os valores dos parâmetros elétricos sob condições de teste padrão (STC). As STC têm irradiância $G = 1000 \text{ W/m}^2$, temperatura da célula $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e o espectro de irradiância padrão AM1.5G. Os parâmetros elétricos sob as condições STC são denominados valores referência, e geralmente são indicados empregando um sub índice r . De posse dos valores de referência, é possível calcular, com o modelo comportamental, os valores de

Voc, Isc, Vm, Im e Tc sob várias outras condições de irradiância (G) e temperatura ambiente (T_a). Castañer (2002) usa as Eq. (1), (2), (3), (4), (5), (6), que são baseadas no modelo de um diodo, no qual se assume a resistência paralela como infinita:

$$V_{oc} = V_{ocr} + \left(\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right)_G (T_{cell} - T_r) + V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_{scr}} \right) \quad (1)$$

$$I_{sc} = \frac{I_{scr} A}{1000} G + \left(\frac{\partial I_{scr}}{\partial T} \right)_G (T_{cell} - T_r) \quad (2)$$

$$I_{diodo} = \frac{I_{sc}}{\frac{V_{oc}}{V_T}} \left(e^{\frac{V_{diodo}}{V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$V_m = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}} \left(e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1 \right) \right) - I_m R_s \quad (4)$$

$$I_m = I_{mr} \frac{G}{G_r} + (area) Coef_jsc (T_{cell} - T_r) \quad (5)$$

$$T_{cell} - T_a = \frac{NOCT-20}{800} G \quad (6)$$

Nessas equações, o V_T é a tensão térmica (kT/q), I_{diodo} e V_{diodo} são a corrente e o tensão sobre o diodo e o T_r é a temperatura de referência, ou seja, a temperatura da célula nas condições para as quais os valores de referência foram determinados. Castañer (2002) também calcula o valor da resistência série, mas assume que essa resistência não vai se alterar com a temperatura da célula, utilizando apenas os valores de referência na Eq. (7):

$$R_s = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} - \frac{P_{max}}{FF_0 I_{sc}^2} \quad (7)$$

Com as Eq. (1) até (7) é possível simular a célula fotovoltaica em SPICE, onde se utiliza fontes de tensão controladas por tensão e fontes de corrente controladas por tensão. Para plotar a curva I-V foi utilizado o modelo de um diodo, onde R_{sh} não é levado em consideração, porque é tratada como infinita (Castañer, 2002) e comporta-se como um circuito aberto. O diodo representa uma fonte de corrente controlada por tensão que contraria a corrente fotogerada. Assume-se que a corrente fotogerada é I_{sc}.

3. METODOLOGIA

3.1 Comparação entre modelos analítico de resposta espectral no SPICE com e sem corrente de deriva

O objetivo dessa simulação é comparar a mesma célula solar sob condições padrão de operação, usando dois modelos diferentes. Foi avaliada principalmente a densidade de corrente espectral de curto-circuito, isto é, a densidade de corrente J_{sc} para cada comprimento de onda dentro da faixa espectral analisada. O espectro de irradiância para essa simulação foi o AM1.5G.

No primeiro modelo, apenas a corrente de difusão, definida nas regiões fora da região de depleção é considerada. No segundo modelo, com as mesmas componentes de corrente de curto-circuito de difusão do modelo anterior, é adicionado o equacionamento da componente referente à deriva (Castañer, 2002). As densidades de corrente espectrais são comparadas, bem como as densidades de corrente totais integradas ao longo da faixa espectral. Os valores de J_{sc} espectrais, com e sem deriva, integrados ao longo da faixa de comprimentos de onda até 1,1 μm, e multiplicados pela área superficial da célula compõem o valor utilizado para corrente de curto-circuito nas seções seguintes.

Foram usadas para essa simulação espessura da base: W_b=300 μm; espessura do emissor: W_e=0,3 μm; espessura da região de depleção na região n: X_n = 50 nm; e espessura da região de depleção na região p: X_p = 300 nm.

3.2 Comparação entre o modelo do PC1D com o modelo em SPICE

Para esta simulação, o arquivo de exemplo "PVcell" do PC1D foi tomado como base. No entanto foram alterados diversos parâmetros de forma a aproximá-los ao máximo dos adotados na simulação em SPICE. Assim a área da célula considerada foi de 100 cm², com reflectância de 10% para todos os comprimentos de onda e sem texturização da superfície. A velocidade de recombinação de elétrons na superfície do emissor considerada foi S_n = 2x10⁵ cm/s, e a de buracos na superfície da base foi S_p = 10³ cm/s. A irradiância é de 1000 W/m² e a temperatura inicial da célula é de 335 K. Os perfis de dopagem considerados foram uniformes, valendo 10¹⁶ cm⁻³ na base e 10¹⁹ cm⁻³ no emissor. O comprimento de difusão dos elétrons na região p foi definido como L_n = 162 μm, resultando em um tempo de vida de elétrons τ_n = 7,208 μs, e para se obter um comprimento de difusão de buracos de L_p = 0,43 μm, foi ajustado τ_p = 5,4x10⁻⁴ μs. Os valores de resistência R_s (série) e R_{sh} (paralelo) usados foram 5 mΩ e 10 MΩ, respectivamente.

Para a determinação da corrente de saturação reversa a ser utilizada no modelo de um diodo em SPICE, a irradiância foi zerada no PC1D e, na curva I-V, os valores de corrente para tensões negativas foram considerados.

Apesar de a temperatura para ambos os modelos ser de 335 K, foi utilizada a mesma corrente de curto circuito do item anterior, referente a 300 K, porque a variação para esta faixa de temperatura seria irrelevante (como evidenciado pelo valor de α no item 4.4).

Cabe ainda ressaltar que o modelo de diodo utilizado foi o Dbreak com capacitância da junção de 0.1 pF.

Então foi possível, através da escolha de uma corrente de saturação reversa adequada dentro da faixa considerada aceitável pela análise anterior e através do ajuste do fator de idealidade, obter curvas I-V e P-V para ambos os modelos bastante semelhantes ao se desconsiderar a corrente de deriva. Estas informações são apresentadas no resultado comparativo com o modelo SPICE na Seção 4.2.

3.3 Espessura ótima do emissor

Para o cálculo da espessura ótima do emissor, W_e , foi calculada a eficiência de conversão de energia para diversos valores desta grandeza (W_e), utilizando-se o modelo analítico de resposta espectral. O cálculo foi feito com W_e variando de 0,050 μm , o comprimento da região de depleção no emissor, a 300 μm , o tamanho da célula diminuído do comprimento da região de depleção na base. No modelo utilizado, como o valor da espessura da região de depleção X_n não depende de W_e , valores de espessura do emissor menores que o comprimento da região de depleção no mesmo resultariam em cálculos incorretos, tendo em vista que a região de depleção do emissor não pode ser maior que o próprio, o que ocasionaria a redução concomitante da espessura da região de depleção na base. A espessura total da célula foi fixada em 300,3 μm e a cada simulação a base diminuía conforme o emissor aumentava em passos de 0,010 μm .

Ambos os modelos de SPICE, com e sem corrente de deriva, foram simulados com a variação de W_e e tiveram suas eficiências comparadas. Um gráfico contendo as eficiências de conversão de energia por espessura do emissor para cada caso e o erro associado a não inclusão da corrente de deriva foi traçado e é apresentado na seção 4.3.

3.4 Comparação do modelo comportamental com o modelo de um diodo

O objetivo aqui foi utilizar o modelo comportamental analítico para reconstruir a curva I-V a partir dos parâmetros elétricos de uma célula arbitrária concebida a partir de um modelo físico. Primeiro foi simulada uma célula fotovoltaica no SPICE com o modelo de um diodo. Para tal, usamos a densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) calculada com o modelo analítico de resposta espectral, em que se considera a corrente de difusão e de deriva. Assumindo uma célula com área de 100 cm^2 , temos que a corrente de saturação reversa (I_0) para o diodo aqui definido é de 1 nA. Esse valor foi calculado usando a densidade de corrente de escuro (J_0), calculada por (Castañer, 2002), e multiplicando-a pela área da célula. Além disso, foi utilizado um fator de idealidade $n=1$. Os valores de R_s e R_{sh} usados foram 1 m Ω e 10 M Ω , respectivamente. De posse desses parâmetros, a célula fotovoltaica foi simulada e os valores elétricos (V_{oc} , I_{sc} , P_m , V_m , I_m) foram extraídos, sendo esses necessários para o modelo comportamental.

Utilizando os valores típicos para células FV de silício cristalino para a NOCT, α e β , e os parâmetros elétricos extraídos, foi possível simular a célula novamente, em SPICE, de forma a poder comparar os resultados dos dois modelos considerados.

4. RESULTADOS

4.1 Comparação entre modelos analítico de resposta espectral no SPICE com e sem corrente de deriva

No SPICE foram criados dois blocos de circuito: um deles representando a célula solar usando o modelo sem deriva, e outro com a inclusão da deriva no equacionamento. Ambos os blocos têm como saídas em comum as correntes espectrais de curto-circuito para a base, para o emissor, e a soma total; além da corrente total integrada ao longo da faixa de comprimentos de onda. No entanto, o bloco com a corrente de deriva tem uma saída a mais: a corrente espectral devido à deriva. A Fig. 2 indica os gráficos supracitados.

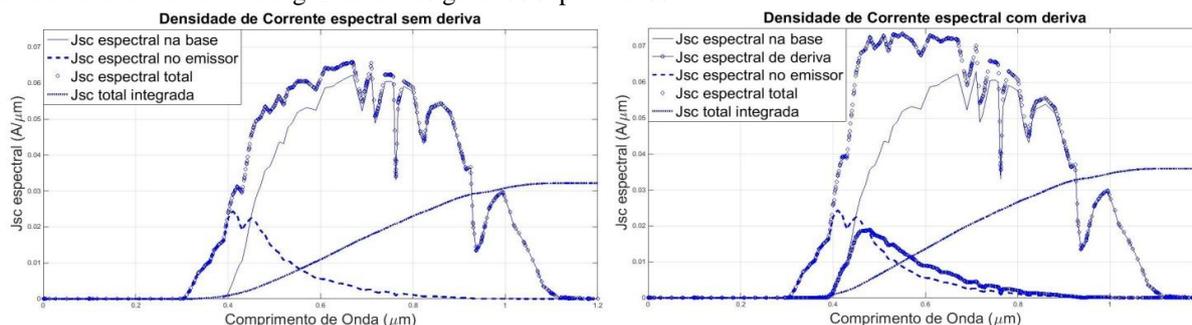


Figura 2 – Densidade de Corrente espectral sem deriva (esquerda) e com deriva (direita)

Nota-se primeiro, que as curvas para o emissor começam a gerar corrente para comprimentos de onda (λ) da ordem de $\lambda=300$ nm, que é quando o espectro AM1.5G começa a exibir irradiância considerável. À medida que se aumenta λ , os fótons ficam menos energéticos e têm maior profundidade de penetração. Logo, a maior porção de fótons absorvida no emissor são para fótons mais energéticos. Da mesma forma, nota-se que grande parte da corrente espectral se deve aos fótons absorvidos na base, uma vez que essa região é bem maior e mais profunda que o emissor, absorvendo a maioria dos fótons menos energéticos.

A curva de J_{sc} espectral devido à deriva na à direita na Fig. 2, se dá para um comprimento de onda compatível com a profundidade da junção, e essa componente faz com que haja um aumento considerável da corrente espectral total.

As curvas de J_{sc} integradas ao longo do espectro mostram qual o valor final de densidade de corrente que será gerada por tal célula, sendo $J_{sc} = 35,96 \text{ mA/cm}^2$ com deriva e $J_{sc} = 31,88 \text{ mA/cm}^2$ sem deriva, como indicado na Fig. 2. Há um aumento considerável de J_{sc} de aproximadamente 13%, o que leva a crer que a incorporação da componente de deriva nos modelos é essencial.

4.2 Comparação entre o modelo do PC1D com o modelo em SPICE

No PC1D foram extraídos os gráficos do perfil de dopagem e de campo elétrico, de onde se pode extrair a profundidade de junção, isto é, a posição na qual as concentrações de dopantes tipo p e tipo n se igualam, encontrando-se o valor de 285,6 nm. O campo elétrico máximo, que se dá na junção metalúrgica, acontece em 281,6 nm, consideravelmente próximo à profundidade de junção.

No SPICE, a profundidade de junção trabalhada foi de 300 nm. Apesar de não ter sido obtido exatamente este valor no PC1D, o mesmo é próximo o suficiente tendo em vista que nos processos de fabricação FV não se tem tamanha precisão, devido ao uso do processo de difusão de dopantes no silício. A resistência de folha da superfície superior também foi obtida pelo PC1D, e é de $164,2 \Omega/\square$. Apesar dos valores de X_n e X_p extraídos do PC1D, através do gráfico de campo elétrico, e os valores padrão utilizados no SPICE ($X_n=50$ nm e $X_p=300$ nm) não serem idênticos, a própria variabilidade do processo de fabricação impede que se tenha tal precisão. Além disso, simulações foram feitas variando o valor de X_n em uma faixa de valores iniciada no menor valor desta grandeza dentre SPICE e PC1D, até o maior valor obtido dentre estes mesmos softwares. O mesmo se repetiu para os valores de X_p . Assim, percebeu-se que não houve diferença significativa para V_{oc} ou I_{sc} na curva I-V, portanto, os valores iniciais de cada um dos softwares foram, respectivamente, mantidos.

Por fim, as curvas P-V e I-V obtidas através de ambos os modelos foram comparadas através da Fig. 3.

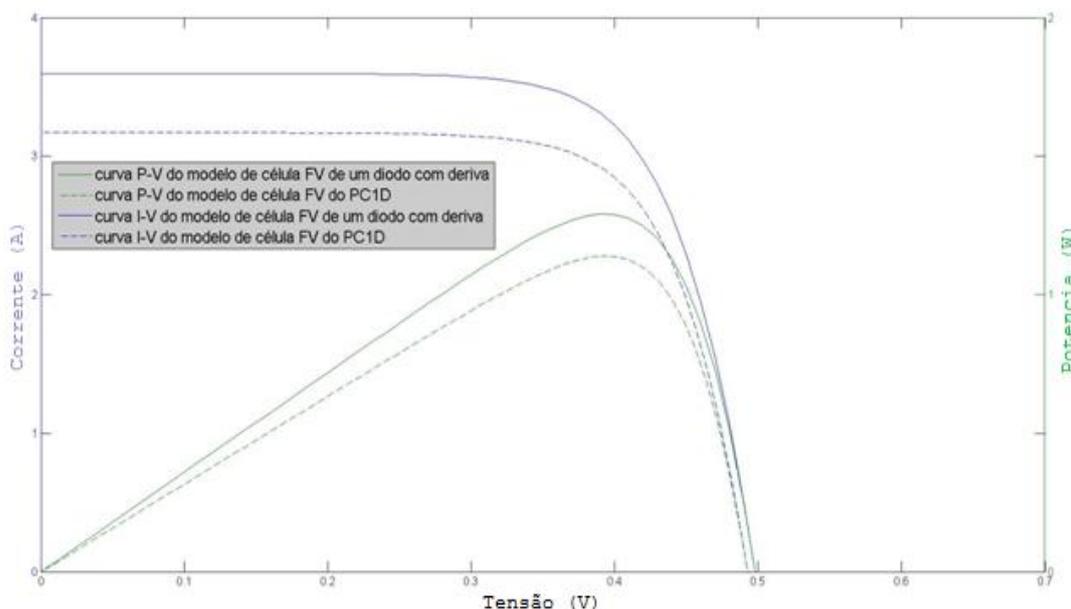


Figura 3 – Comparação de curvas P-V e I-V entre PC1D e SPICE com deriva

Nota-se pela Fig. 3 que a grande diferença entre os dois modelos se dá pela diferença da corrente de curto-circuito I_{sc} que é menor para o PC1D do que para o modelo SPICE. Isso se deve ao fato de o PC1D não levar em consideração a componente da corrente de deriva, mas somente a de difusão. Utilizando o valor de corrente de curto-circuito para o modelo que não considera a corrente de deriva (somente difusão) e comparando com o PC1D, obtém-se o seguinte resultado:

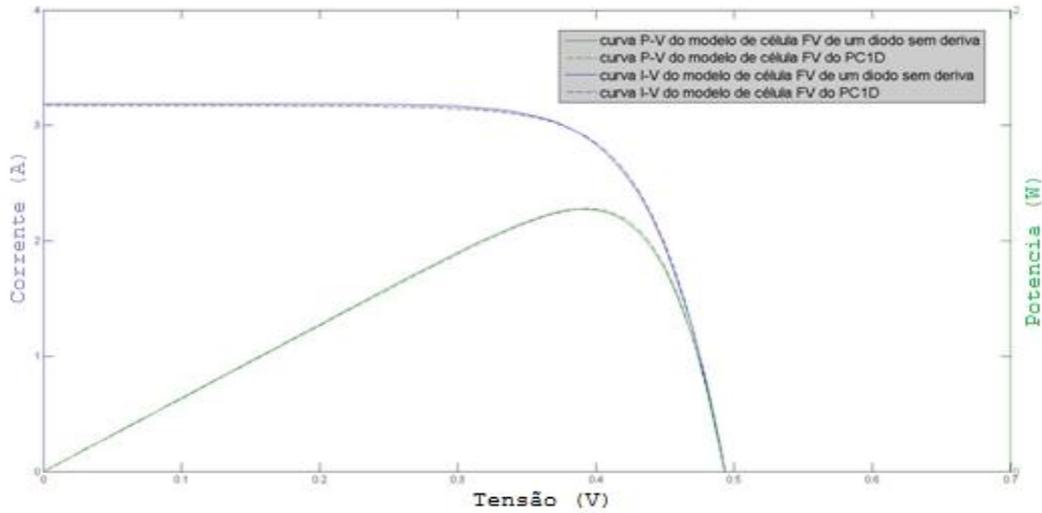


Figura 4 – Comparação de curvas P-V e I-V entre PC1D e SPICE sem deriva

O resultado da Fig. 4 corrobora com o fato de o PC1D não considerar a componente da corrente de deriva em seu modelo, mas sim somente difusão.

4.3 Espessura ótima do emissor

Os resultados de eficiência de conversão de energia obtidos através das simulações com diversas espessuras do emissor são apresentados na Fig. 5, com foco na região de maior eficiência.

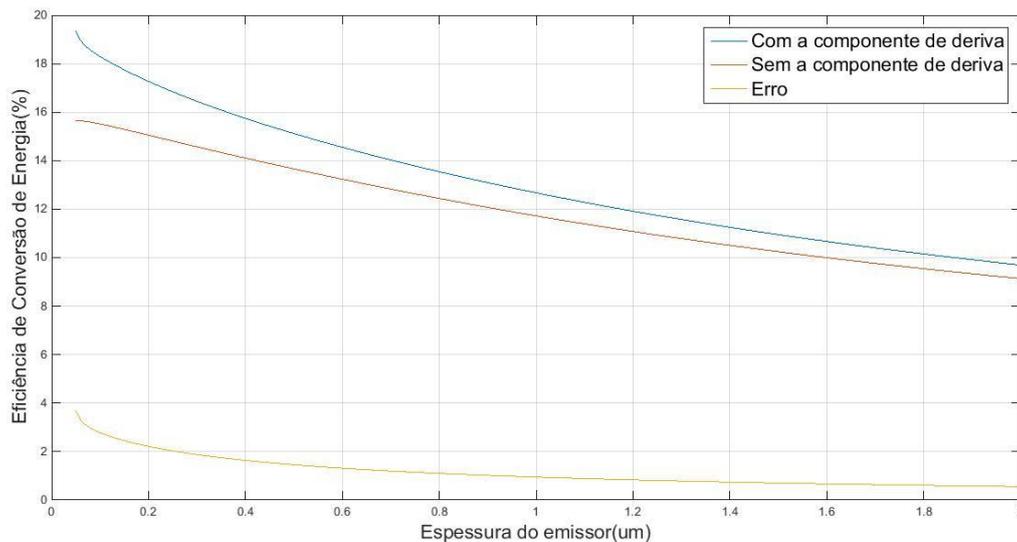


Figura 5 - Eficiência de conversão de energia por espessura do emissor

Nota-se que tanto para o modelo com a corrente de deriva como para o que não a considera, os maiores valores de eficiência se dão com a espessura mínima do emissor, ou seja, quando ela se iguala à X_n . Isto ocorre, pois a maior parte da luz é absorvida em pequenas profundidades (Sze, 2012), sendo assim, uma junção muito profunda diminui as chances dos pares elétron-buraco atingirem o campo elétrico embutido por difusão.

Cabe destacar que a diferença entre os modelos com e sem corrente de deriva é mais pronunciada em valores menores da espessura do emissor. Isto, porque conforme um grande número de fótons passa a ser absorvido dentro da região de depleção, a potência de saída cresce, pois os pares elétron-buraco gerados ali resultam, necessariamente, em corrente externa. Por isso, o fato de considerar a corrente de deriva, resulta em um aumento de eficiência superior ao do modelo sem esta consideração conforme se diminui a espessura do emissor.

4.4 Comparação do modelo comportamental com o modelo de um diodo

A densidade de corrente (J_{sc}) da célula simulada com o modelo analítico de resposta espectral com corrente de deriva é $35,9641 \text{ mA/cm}^2$. Com a área de 100 cm^2 , $I_{sc} = 3,59641 \text{ A}$. A partir dessa simulação, os parâmetros elétricos foram extraídos, e são mostrados na Tab. 1:

Tabela 1- Parâmetros elétricos extraídos através do modelo analítico de resposta espectral.

CARACTERÍSTICA	VALOR
I_{sc}	3,59641 A
V_{oc}	0,56897 V
P_m	1,55618 W
I_m	3,24314 A
V_m	0,47984 V

Valores típicos de α e β para células FV de silício cristalino para a NOCT, são mostrados na Tab. 2 (Virtuani, 2009):

Tabela 2- Parâmetros elétricos extraídos através do modelo analítico de resposta espectral.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Coefficiente α (para I_{sc})	24,3 $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Coefficiente β (para V_{oc})	-2,38 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
NOCT	48 $^\circ\text{C}$
T_r	62 $^\circ\text{C}$

A temperatura de referência (T_r) é de 62 $^\circ\text{C}$, pois ao simular com o modelo de um diodo, utilizou-se a temperatura ambiente (T_a) de 27 $^\circ\text{C}$, e pela Eq. (6), pode-se calcular a temperatura de referência da célula como 62 $^\circ\text{C}$. A Fig. 6 mostra a comparação das curvas de I-V e P-V de modelos físico (com um diodo) e comportamental.

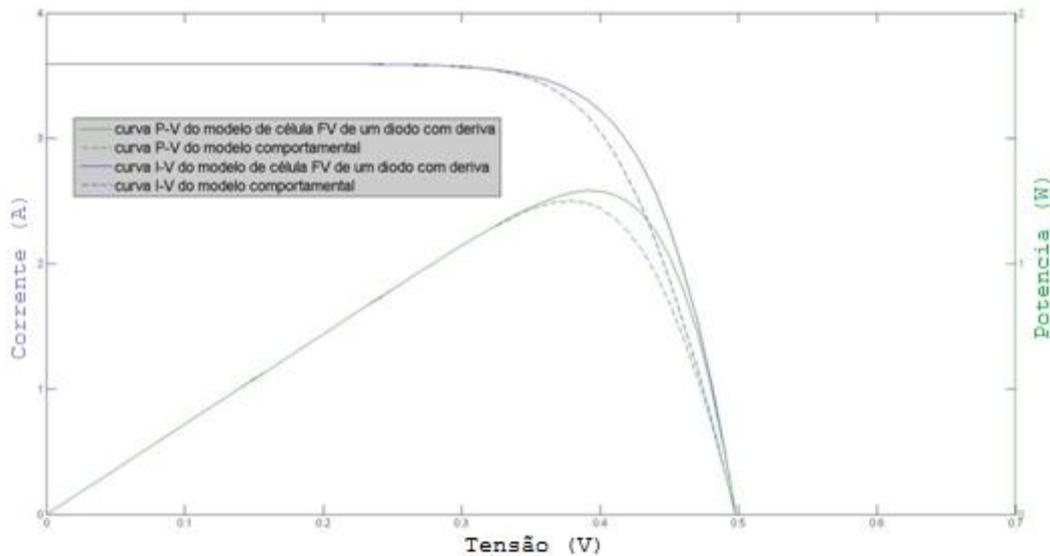


Figura 6 – Comparação de curvas P-V e I-V entre modelos de um diodo (considerando a Corrente de Deriva) e comportamental

Nota-se que as curvas I-V começam e terminam nos mesmos pontos. A simulação do modelo comportamental recebe um valor de $T_{cell} = 62 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma temperatura ambiental $T_a = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. No modelo de um diodo essas mesmas temperaturas foram consideradas. Existem diferenças entre elas em pontos intermediários que são devidas às diferenças em R_s . Se o valor de R_s for calculado com a Eq. (7), obtém-se o valor usado no modelo de um diodo. No modelo comportamental $R_s = 14 \text{ m}\Omega$. Este valor de resistência série maior que o do modelo de um diodo ($R_s = 5 \text{ m}\Omega$) deteriora a curva de I-V. A mesma observação pode ser feita nas curvas P-V. A Tab. 3 mostra os parâmetros mais importantes da simulação. Pode-se observar que as simulações têm os mesmos valores nas condições de circuito aberto e curto circuito. Apenas nos valores referentes ao ponto de máxima potência, os modelos variam entre si, assim como pode ser visto na Fig. 6.

Tabela 3- Parâmetros elétricos das duas simulações consideradas.

CARACTERÍSTICA	Modelo de um diodo	Modelo comportamental	Erro (%)
Voc (V)	0,496	0,496	0,00
Isc (A)	3,596	3,596	0,00
Pm (W)	1,347	1,310	2,82
Im (A)	3,368	3,358	0,23
Vm (V)	0,400	0,390	2,56

5. CONCLUSÃO

O trabalho demonstra a relevância de se considerar a corrente de deriva nas simulações de células FV, ao passo que esta influencia significativamente a corrente total de curto circuito, representando um aumento de 13% da mesma. Esta consideração torna-se ainda mais relevante quando se deseja projetar uma célula extraindo a maior eficiência possível da mesma, pois a diferença da potência de saída da célula com e sem corrente de deriva torna-se maior conforme se aproxima de valores ótimos.

A comparação entre os modelos em SPICE e PC1D evidencia que o segundo não utiliza a corrente de deriva em suas simulações. Portanto percebe-se que a modelagem em SPICE apresenta-se como mais completa e versátil, possibilitando a obtenção de resultados mais realistas ao passo que viabiliza a implementação e edição de equações. No entanto é preciso ser bastante cauteloso em sua utilização, já que o modelo implementado permite a definição de vários parâmetros de forma independente, sendo que na realidade alguns deles estão relacionados entre si e não podem ser modificados arbitrariamente.

Pode-se concluir ainda que o modelo comportamental pode simular uma célula FV, porém com menor precisão, ao passo que houve uma diferença de 4% na potência de saída entre este e o modelo de um diodo. No entanto este modelo é mais simples de usar, porque só são necessários parâmetros elétricos, que por sua vez são muito mais fáceis de serem obtidos do que parâmetros físicos ou construtivos. Adicionalmente, o modelo comportamental consegue simular células fotovoltaicas em um ambiente que não esteja nas condições padrão, prevendo a saída da célula FV em condições com irradiância e temperatura diferentes das padronizadas.

Cabe ainda ressaltar que o modelo comportamental utilizado possui a limitação de considerar a resistência paralela infinita e, além disso, a resistência em série não varia com a temperatura. Esses aprimoramentos podem ser aplicados ao modelo futuramente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil, CNPq e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- Eidelloth, S. Haase, F. Brendel, R. Simulation Tool for Equivalent Circuit Modeling of Photovoltaic Devices. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 2, p. 572-579, 2012.
- Iero, D. Carbone, R. Carotenuto, R. Felini, C. Merenda, M. Pangallo, G. Corte F. G. D. SPICE modelling of a complete photovoltaic system including modules, energy storage elements and a multilevel inverter. *Solar Energy*, v. 107, p. 338-350, 2014.
- Luis Castañer, S. S. Modelling Photovoltaic Systems using PSPICE. Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona, Spain, 2002.
- S.Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 3rd ed, 2012.
- Virtuani, A. Pavanello, D. Friesen, G. "Overview of Temperature Coefficients of Different Thin Film Photovoltaic Technologies", 2009.

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF A PHOTOVOLTAIC CELL THROUGH DIFFERENT MODELS AND ITS OPTIMIZATION

Abstract. Many different softwares exist to simulate photovoltaic cells. SPICE, a powerful language to simulate electrical circuits, can simulate solar cells as well, however researchers in the photovoltaic community don't use it very often. It is demonstrated how SPICE is an efficient tool in order to simulate photovoltaic cells. A solar cell was simulated with PC1D and various SPICE models, i.e. one-diode models with and without drift current and a behavioral model, and their results were compared. It was found that PC1D does not consider the drift current. However, the drift current should not be neglected, since it makes up about 13% of the total short-circuit current density. Furthermore, it was shown that the behavioral model can simulate photovoltaic cells with certain accuracy as well and at the time it is much easier to use, since it only uses electrical parameters as input, which are easily obtained.

Key words: Photovoltaic cell, drift current, modeling