



## Modelo para Análise de Células Solares

Cássio Prado Guimarães<sup>1</sup>, Waldeir Amaral Vilela<sup>2</sup>, Luiz Angelo Berni<sup>2</sup>,  
Ricardo Toshiyuki Irita<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LABAS

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Laboratório Associado de Plasmas - LAP

cassio.guimaraes@inpe.br

---

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o modelamento matemático para o cálculo de corrente e tensão de junções de materiais semicondutores que compõe as células solares e o aplica em uma codificação em ambiente computacional para simular unidimensionalmente uma célula monojunção de silício. Na metodologia são descritos os procedimentos e a teoria adotada para obter as equações necessárias, assim como, o fluxograma da simulação computacional desenvolvida. O resultado da simulação computacional é avaliado através de comparação de resultados de simuladores conhecidos na literatura, o PCID e o ADEPT, e assim é verificado a sua aplicabilidade como ferramenta de auxílio de análise de células já existentes e também de colaboração no desenvolvimento de novas células solares, seja modificando as composições e a sua geometria ou aumentando o número de junções.*

---

**Palavras-chave:** Modelagem e simulação de células solares; curva corrente-tensão; caracterização de células solares.

### 1. Introdução

A conversão de energia solar em energia elétrica tem um papel crucial na autonomia de qualquer missão espacial, qualquer pequena melhoria no sistema de conversão pode representar um aumento na longevidade da missão. As células solares são um dos primeiros elementos deste processo de conversão e ao longo do tempo vem evoluindo drasticamente.

Atualmente, nas aplicações espaciais, elas se encontram na forma de células de multijunção, células formadas por uma associação de semicondutores ou ligas semicondutoras [Yamaguchi 2002], podendo ser do tipo GaInP/GaInAs e Ge [Takamoto et al. 2005].

De forma simplificada cada um desses materiais corresponde a uma junção, e cada junção é formada por uma combinação do tipo p-n de semicondutores.

Antes das células serem produzidas, elas são simuladas à partir de um modelo matemático, alguns artigos publicados como [Huang et al. 2011, Gray 2011], trabalham com análise e otimização de células em uma dimensão. Os programas computacionais existentes nessa área



fazem tanto a análise como são usados para o desenvolvimento e otimização de células solares, como o PC1D [Clugston and Basore 1997]. A simulação é desenvolvida com base no cálculo da solução das equações de transporte de cargas [Van Roosbroeck 1950] para os portadores minoritários de cargas, elétrons no lado p e lacunas no lado n, a solução descreve às características elétricas das células através de uma função matemática que associa pares de tensão e corrente, construindo a curva de corrente por tensão do dispositivo.

A proposta deste trabalho é apresentar o modelo matemático para o cálculo de corrente e tensão de junções de materiais semicondutores que compõe as células solares e aplica-lo em uma codificação em ambiente computacional para simular unidimensionalmente uma célula monojunção de silício e verificar a sua aplicabilidade, comparando-o com outras ferramentas já existentes, seja como de auxílio de análise de células e também de desenvolvimento de novas células solares, modificando as composições de materiais, geometria ou aumentando o número de junções.

O modelo proposto foi desenvolvido visando futuramente projetar e analisar células de multijunção. Neste trabalho ele foi aplicado na resolução das equações de transporte para o caso de uma célula de monojunção feita de silício. A célula é formada por uma camada dopada do tipo n, sobre uma camada com dopagem do tipo p. O diagrama da célula pode ser consultado na Figura 1. As soluções das equações de transporte fornecem as características elétricas da célula quando submetidas a três tipos de espectros eletromagnéticos com irradiâncias distintas, o AM0 com  $1,3kW/m^2$ , o AMG1,5G com  $1,0kW/m^2$  e o AM1,5D com  $900W/m^2$ . A variação dos espectros fornece uma forma de verificar a influência deles sob os parâmetros de saída, informações fornecidas pelos fabricantes de células que caracterizam o desempenho do dispositivo. Os parâmetros são tensão de circuito aberto  $V_{OC}(I = 0)$ , corrente de curto circuito  $I_{SC}(V=0)$  e corrente e tensão do ponto de potência máxima ( $P_{MP}$ ), definidos como  $I_{MP}$  e  $V_{MP}$  respectivamente.

Na última parte o modelo proposto é analisado em relação à outras ferramentas disponíveis como o PC1D e com o ADEPT. A comparação com o PC1D foi feita de forma gráfica e com o ADEPT foi por meio de dados publicados em um artigo sobre simulação de células, o *The Physics of The Solar Cell* [Gray 2011].

## 2. Metodologia

São descritos a seguir os procedimentos e a teoria adotada para obter as equações necessárias, assim como o fluxograma da simulação computacional desenvolvida e a comparação com os simuladores PC1D e ADEPT.

### 2.1. Equacionamento

O equacionamento leva em consideração um modelo que tem como base obter uma função que associa a concentração de cargas em relação a posição nas coordenadas da célula. Essa função é descrita pela difusão e deriva dos portadores de carga, nas regiões n e p, Figura 1

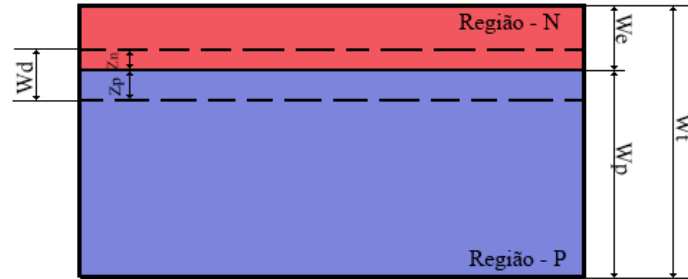


Figura 1. Diagrama de uma Célula Solar utilizada na simulação.

Ao absorver a energia dos fótons os portadores de cargas deslocam-se de uma região para outra, gerando corrente elétrica.

As características elétricas dos dispositivos fotovoltaicos descritas pelo modelo proposto são dadas pela equação que associa a densidade corrente gerada com a tensão, de forma matemática:

$$J = J_{ph} - J_{01} \left( e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right) - J_{02} \left( e^{\left(\frac{qV}{2kT}\right)} - 1 \right) \quad (1)$$

O parâmetro  $J$  representa a densidade de corrente gerada pelo dispositivo em  $(mA/cm^2)$ ,  $J_{ph}$  é a densidade de corrente gerada pela incidência de radiação eletromagnética,  $J_{01}$  representa a corrente de saturação no escuro devido aos portadores de carga minoritários nas regiões quase neutras e  $J_{02}$  denota a corrente de saturação gerada pela região de depleção do dispositivo. Cada termo é calculado separadamente pelas equações de transporte descritas à seguir.

Em uma célula solar os portadores de cargas estão sujeitos a incidência de um fluxo de fótons  $G_L(\lambda)$ , dependente do comprimento de onda  $\lambda$ .

As equações que definem o transporte de portadores usadas nesse trabalho foram publicadas originalmente no trabalho *Theory of the flow of electrons and holes in germanium and other semiconductors*, [Van Roosbroeck 1950], constituem basicamente na combinação das equações de difusão e deriva dos portadores de cargas, da equação da continuidade e da equação de Poisson. A equação de Poisson relaciona o potencial eletrostático  $\Phi$  gerado por uma distribuição de cargas  $\rho$  em um material com constante dielétrica  $\epsilon$ . A distribuição de cargas será devido a densidade de lacunas  $p$  e elétrons  $n$  presentes no semiconductor, e da concentração de dopagem, na forma de impurezas doadoras e receptoras de elétrons,  $N_d$  e  $N_a$  respectivamente. Para os cálculos, toda impureza depositada nos lados  $n$  e  $p$  da célula foi ionizada pelo respectivo portador de carga.

As equações de difusão-deriva e da continuidade foram combinadas para descrever o comportamento dos portadores de cargas ao longo do material. Considerando que todo esse processo ocorre em um regime permanente, a dependência temporal é nula. A incidência de fótons é dada em relação ao eixo  $z$ .

A presença do campo elétrico foi desconsiderada, devido a hipótese inicial de dopagem totalmente ionizada. O termo de recombinação utilizado é dado por  $U_{SRH}$ , conhecido por recombinação de Shockley-Read-Hall [Neamen 2012], devido a presença de defeitos ao longo da estrutura do material, de forma simplificada, a recombinação será dada pela diferença de concentração, final  $n(z)$  menos a de equilíbrio  $n_0$ , representada por um  $\Delta n(z)$ , tanto para



elétrons  $n$  quanto para o lacunas  $p$ . Essa recombinação ocorre em relação a um tempo de vida médio,  $\tau$ , referente à probabilidade de colisões das cargas com a estrutura cristalina.

A incidência de fótons segue uma dependência exponencial com o caminho percorrido, dada por  $G_L = \int_{\lambda_0}^{\lambda_{Eg}} \alpha(\lambda) \phi_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} d\lambda$ . A fração de fótons absorvida depende do coeficiente de absorção  $\alpha(\lambda)$  do material.  $\lambda_0$  é o primeiro comprimento de onda absorvido, e,  $\lambda_{Eg}$  é em função do comprimento de onda do *bandgap*.

As equações são resolvidas para os lados  $n$  e  $p$ .

Deve-se considerar a contribuição da região de depleção pois até agora foram considerados apenas as contribuições das cargas nas regiões  $p$  e  $n$  separadamente, assumindo um campo elétrico desprezível. Essa hipótese não pode ser aplicada no interior da região de depleção, cargas estão sendo difundidas de um lado para outro e as cargas geradas dentro do limite,  $z_n < z < z_p$  são aceleradas pelo campo elétrico para direções contrárias a região, tornando-a livre de cargas. A largura da região de depleção é obtida resolvendo a Equação Poisson para cada região da célula, de forma direta [Neamen 2012]:

$$W_d = z_p + z_n = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0}{q} \left( \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right)} \quad (2)$$

O termo  $V_0$  é a tensão interna, referente a concentração de dopagem:

$$V_0 = V_T \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (3)$$

$V_T$  é a tensão térmica dada por  $kT/q$ ,  $q$  a carga eletrônica,  $k$ , constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura. Os valores de  $z_n$  e  $z_p$  podem ser calculados através das expressões [Neamen 2012]:

$$z_n = W_d \left( \frac{N_a}{N_d + N_a} \right) \quad e \quad z_p = W_d \left( \frac{N_d}{N_d + N_a} \right) \quad (4)$$

A densidade de corrente devido as cargas nessa região é obtida integrando as equações diferenciais referentes a densidade de corrente, descritas na seção anterior, de forma simplificada, [Hu and White 2012]:

$$J_{02} = \frac{qn_i W_d}{2\tau_m} \quad (5)$$

Com:

$$\tau_m = \frac{\tau_n + \tau_p}{2} \quad (6)$$

E a densidade de corrente devido a incidência de um fluxo de fótons será [Hu and White 2012]:

$$J_{phd} = q \int_{\lambda_0}^{\lambda_{Eg}} \alpha(\lambda) \phi_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z_n} (1 - e^{-W_d \alpha(\lambda)}) d\lambda \quad (7)$$



## 2.2. Simulação

O equacionamento descrito no item anterior foi utilizado para realizar a simulação computacional. O processo de funcionamento do programa pode ser visto na Figura 2. O programa descreve às características elétricas de uma célula solar resolvendo a equação dos portadores minoritários de carga de forma analítica para todas as regiões da célula. A solução analítica é utilizada devido a facilidade de manuseio, a equação é resolvida uma única vez gerando uma função aplicável para qualquer variação de parâmetro desejável.

A curva corrente por tensão (curva IxV) da célula é elaborada à partir da solução analítica. Para que a curva seja construída é necessária que as propriedades elétricas do material sejam fornecidas junto com sua geometria. Com esses parâmetros as densidades de corrente de saturação existentes nas regiões  $p$ ,  $n$  e de depleção do material são calculadas. O passo seguinte é calcular a densidade de corrente gerada pela célula nessas mesmas regiões, para isso, uma fonte de radiação eletromagnética é utilizada, seus valores de irradiância fornecem os dados necessários. A partir do espectro eletromagnético e das propriedades ópticas da célula a densidade de corrente gerada pela célula  $J_{ph}$  é calculada. Os valores de densidades de corrente são multiplicados pela área da célula e o programa exibe a curva IxV da mesma. No final do processo é exibida uma mensagem ao usuário perguntando se ele deseja saber os parâmetros de saída da célula, os pontos de tensão e corrente de potência máxima, tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito.

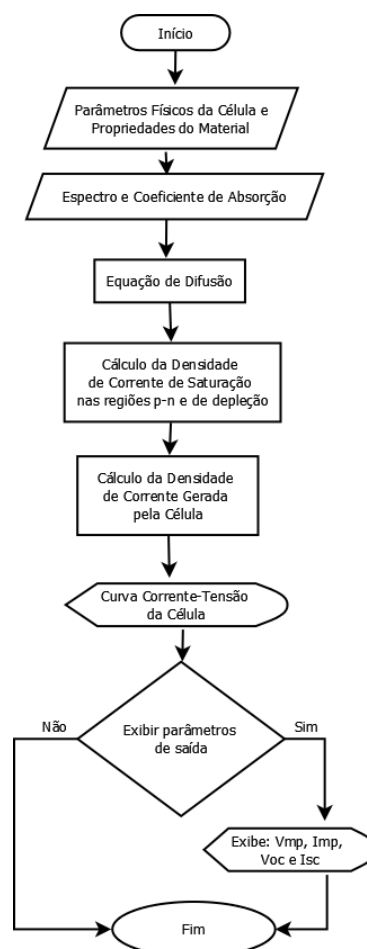


Figura 2. Fluxograma de funcionamento do programa.



### 2.3. Comparação com os simuladores PC1D e ADEPT

O resultado da simulação do modelo proposto foi comparado com os resultados de outras ferramentas de simulação, conhecidas por PC1D e ADEPT. O PC1D é um programa computacional utilizado no desenvolvimento de dispositivos semicondutores, com o foco em dispositivos fotovoltaicos [Clugston and Basore 1997]. O programa foi desenvolvido pela Universidade de Nova Gales do Sul (UNSW Austrália), ele resolve as equações de transporte de cargas de forma acoplada, através de métodos numéricos [Clugston and Basore 1997]. A versão do programa utilizada foi a 5,9 disponível no site da Universidade. Uma célula de silício foi usada para a comparação. O silício foi escolhido por ter suas características definidas em um arquivo específico no PC1D.

O programa ADEPT foi desenvolvido por Jeffrey Gray na Universidade de Purdue (EUA), o programa resolve as equações de transporte de forma numérica para uma, duas ou três dimensões. As equações são discretizadas no domínio das condições de contorno e resolvidas pelo método de Newton. Além da elaboração da curva corrente por tensão da célula, o programa fornece informações sobre a relação entre capacitância-tensão e decaimento da tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito em relação ao tempo de vida dos portadores de cargas. Tanto o ADEPT quanto o PC1D calculam o coeficiente de absorção de forma teórica para alguns materiais encontrados em sua base de dados.

A célula simulada para comparação é composta de silício, com  $100\text{cm}^2$  de área, a camada doadora de elétrons, o lado  $n$ , tem espessura de  $0,35\ \mu\text{m}$ , com concentração de impurezas no valor de  $10^{20}\text{cm}^{-3}$ . A espessura da camada receptora, lado  $p$ , é de  $300\ \mu\text{m}$ , com concentração de impurezas no valor de  $10^{15}\text{cm}^{-3}$ . A temperatura da célula é uniforme e mantida constante no valor de  $25^\circ\text{C}$ . Os dados foram consultados do trabalho *The Physics of The Solar Cell* [Gray 2011], utilizado como uma fonte de referência e como forma de validação do modelo proposto.

Os parâmetros utilizados na simulação estão resumidos na Tabela 1

Tabela 1: Parâmetros da Célula Utilizados na Simulação.

Silício		
	Tipo - n	Tipo -p
Espessura ( $\mu\text{m}$ )	$W_n = 0,35$	$W_p = 300$
Concentração de Dopagem ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_d = 10^{20}$	$N_a = 10^{15}$
Coefficiente de Difusão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$D_N = 36$	$D_p = 12$
Tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\mu\text{s}$ )	$\tau_p = 1$	$\tau_n = 350$
Comprimento de Difusão ( $\mu\text{m}$ )	$L_n = 1100$	$L_p = 350$
Concentração intrínseca de cargas ( $\text{cm}^{-3}$ )	$n_i = 1,5^{10}$	
Concentração em equilíbrio dos portadores ( $\text{cm}^{-3}$ )	$n_o = n_i^2/N_a$	$p_o = n_i^2/N_d$

Os espectros utilizados podem ser consultados na Figura 3, eles foram retirados da tabela de referência espectral [Standard ], desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL, EUA)

O espectro AM0 (ASTM E-490), é voltado para aplicações espaciais, é definido pela irradiação incidente na termosfera, com  $1300\text{W}/\text{m}^2$  de potência total, o AM1,5G com  $1000\text{W}/\text{m}^2$  de potência total, utilizado como referência para aplicações terrestres, e por fim o espectro AM1,5D é formado pela irradiação direta do sol com o acréscimo de uma componente circunsolar, irradiação devido à dispersão dos raios solares na atmosfera devido a presença de aerossóis (partículas de poeira), a potência total dessa irradiação é de  $900\text{W}/\text{m}^2$ .

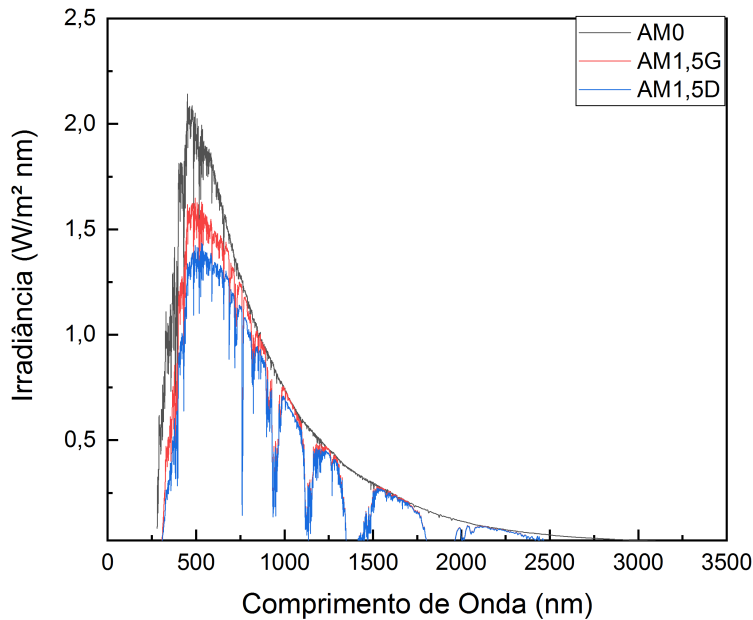


Figura 3. Espectros Solares Utilizados na Simulação.

### 3. Resultados e Discussão

As curvas simuladas estão na Figura 4, os parâmetros de interesse são os pontos de potência máxima ( $I_{MP}$ ,  $V_{MP}$ ), ponto de circuito aberto ( $0$ ,  $V_{OC}$ ) e de curto circuito ( $I_{SC}$ ,  $0$ ), eles estão resumidos na Tabela 3. Os pontos descritos são usados para relacionar a capacidade de produção efetiva máxima da célula dado por  $I_{MP}$ ,  $V_{MP}$  com os valores máximos possíveis de corrente  $I_{SC}$  e de tensão  $V_{OC}$  [Hu and White 2012]. Essa relação fornece o Fator de Forma (FF) da célula.

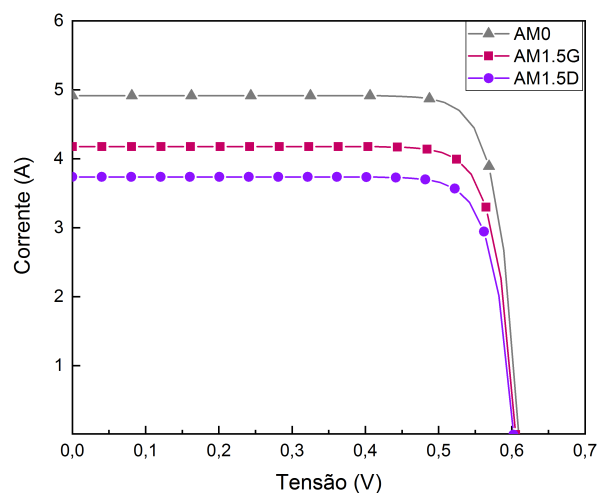


Figura 4. Curvas Corrente por Tensão Simuladas.

É possível notar que uma maior incidência de fótons gera uma produção maior de corrente e isso se reflete na potência produzida pela célula, como pode ser observado na Figura 5. O programa proposto também constrói as curvas de potência gerada em função da tensão, uma relação útil



para verificar o quanto de fato da conversão de radiação eletromagnética esta disponível para utilização. Os resultados estão resumidos na Tabela 2

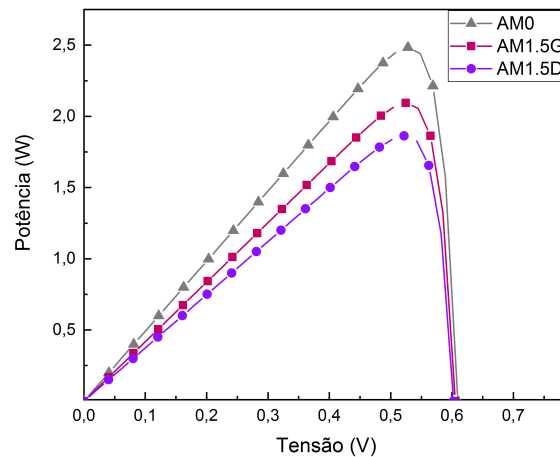


Figura 5. Potência em Função da Tensão para a Célula Simulada.

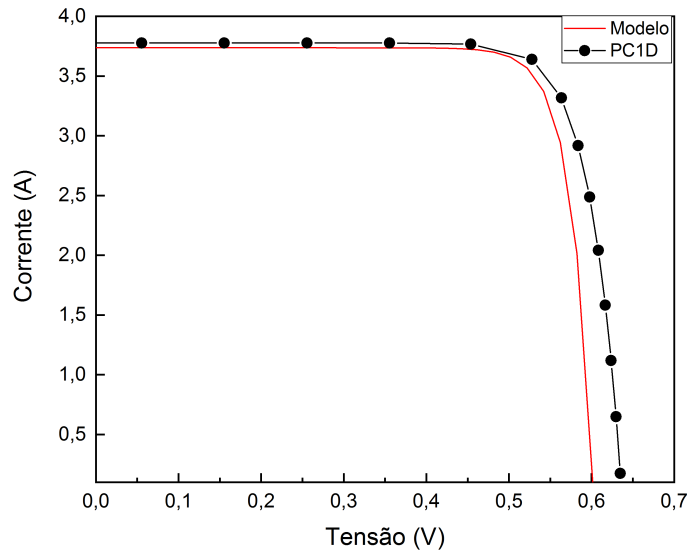
Tabela 2: Características elétricas da célula simulada sob ação de diferentes espectros eletromagnéticos.

Espectro	Voc (V)	Isc (V)	Vmp (A)	Imp (A)
AM0	0,609	4,91	0,528	4,70
AM1,5G	0,605	4,17	0,524	4,00
AM1,5D	0,602	3,73	0,522	3,56

### 3.1. Comparação Gráfica do modelo proposto com o PC1D

O modelo proposto foi comparado com duas ferramentas o PC1D e o ADEPT. Com o PC1D foi possível elaborar uma comparação gráfica, já que o acesso ao programa é de forma fácil, devido a sua disponibilidade gratuita no site da Universidade de Nova Gales do Sul. A célula usada para a comparação foi feita de silício com  $100\text{cm}^2$  de área. O espectro incidente sobre ela é o AM1,5D, a diferença gráfica entre os dois modelos pode ser consultada na Figura 6.





**Figura 6. Modelo proposto comparado ao PC1D.**

A simulação foi comparada com um terceiro programa, o ADEPT, de forma qualitativa nos parâmetros de saída. Os valores foram consultados no trabalho listado nas referências. Ambos os simuladores foram usados para verificar a confiabilidade dos valores fornecidos pelo modelo proposto e observar se haveria uma diferença nos resultados e como ela poderia ser apresentada. O objetivo era verificar se diferença poderia ser dada por uma questão cálculo das soluções, questão de arredondamento de algarismos ou se a haveria uma diferença na metodologia. Os resultados de pontos específicos da célula estão na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação dos Valores Obtidos da Simulação com Outros Simuladores.

	Modelo Proposto	PC1D	Gray, 2011
Voc (V)	0,602	0,634	0,604
Isc (A)	3,73	3,77	3,67
Imp (A)	3,56	3,64	3,50
Vmp (V)	0,522	0,528	0,525

#### 4. Conclusão

Neste artigo foi apresentada uma ferramenta de análise de desempenho de células solares com base nas suas características físicas. O programa proposto desenvolve a curva de corrente por tensão de uma célula solar sob ação de uma fonte de radiação eletromagnética. No trabalho o programa foi aplicado em uma célula de silício, sob ação de espectros eletromagnéticos de intensidades diferentes. Uma diferença de 0,62W de potência foi constatada, entre o espectro de potência maior, AM0, em relação ao espectro com menor valor, AM1,5D. O espectro AM1,5D tem sua intensidade atenuada pela absorção atmosférica.

A verificação do modelo foi feita em relação à referências disponíveis sobre o assunto, como o programa PC1D e um artigo sobre simulação de células do autor de outra ferramenta de simulação, o ADEPT. Os parâmetros usados foram os mesmos do artigo publicado, a diferença entre os resultados simulados pode ter sido causada por simplificações feitas nas equações, o PC1D utiliza as expressões em sua forma mais completa, como na expressão para



a recombinação. No PC1D o autor leva em consideração fatores intrínsecos do material como o nível de energia de Fermi, dentro dos limites do *bandgap*, no modelo proposto e no artigo a recombinação teve sua dependência simplificada, sendo uma variação de concentração de portadores de cargas.

A comparação com o ADEPT foi feita de maneira quantitativa apenas nos parâmetros de saída fornecidos pelo artigo publicado. Nesses pontos o resultado foi próximo, a diferença pode ser atribuída ao coeficiente de absorção, no ADEPT ele é calculado de forma teórica, do ajuste de uma curva experimental. No modelo proposto o coeficiente de absorção é obtido do espectro de refletância do material, através do coeficiente de extinção.

**Agradecimentos:** *O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.*

## Referências

- Clugston, D. A. and Basore, P. A. (1997). Pc1d version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. In *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997*, pages 207–210. IEEE.
- Gray, J. L. (2011). The physics of the solar cell. *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2:82–128.
- Hu, C. C. and White, R. M. (2012). Solar cells: From basics to advanced systems.
- Huang, P.-H., Wang, H. W., Tsai, M.-A., Lai, F.-I., Kuo, S.-Y., Kuo, H.-C., and Chi, S. (2011). Optimum design of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells with sub-wavelength surface texture structure. In *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pages 002071–002073. IEEE.
- Neamen, D. A. (2012). *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles*. New York, NY: McGraw-Hill,.
- Standard, A. G159-98. *Standard Tables for References Solar Spectral Irradiance at Air Mass*, 1.
- Takamoto, T., Kaneiwa, M., Imaizumi, M., and Yamaguchi, M. (2005). InGaP, GaAs Based multijunction solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(6):495–511.
- Van Roosbroeck, W. (1950). Theory of the flow of electrons and holes in germanium and other semiconductors. *The Bell System Technical Journal*, 29(4):560–607.
- Yamaguchi, M. (2002). Multi-junction solar cells and novel structures for solar cell applications. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2):84–90.