

# ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SAÍDA DE UMA CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO

Nelson Veissid – nelson.veissid@inpe.br

Waldeir A. Vilela – waldeir.vilela@inpe.br

Dalmo G. Pasin – dgpasin@gmail.com

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos – GDF/LAS/INPE

**Resumo.** Este trabalho estuda a influência da irradiância espectral nos parâmetros de saída (corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto) de uma célula solar de tripla junção (GaInP/GaAs/Ge). Neste tipo de dispositivo as junções são janelas espectrais sobrepostas que absorvem partes da radiação eletromagnética. As junções estão ligadas em série e, devido a este fato, a menor corrente fotogerada domina o valor da corrente de curto-circuito do dispositivo. Foi desenvolvido um programa na linguagem Pascal para calcular os valores teóricos dos parâmetros de saída da curva característica  $I \times V$  da célula solar de tripla junção e é chamado de “PARATRI”. A simulação mostra que incrementos de intensidades monocromáticas em uma determinada irradiância espectral podem não apresentar aumento nos valores de corrente de curto-circuito, mas com certeza apresenta aumento na tensão de circuito aberto. Análises simultâneas da variação dos valores destes parâmetros em função da irradiância, intensidade e espectro, é que permite um estudo do desempenho de células solares de multijunção.

**Palavras-chave:** Célula Solar, Energia Solar, Simulação

## 1. INTRODUÇÃO

Os satélites artificiais são sistemas autônomos elétricos com baterias que se mantém carregadas pela conversão da energia solar em energia elétrica. O dispositivo que converte diretamente estas duas energias é conhecido como célula solar. Atualmente, célula solar de tripla junção está sendo cada vez mais usada para compor os painéis solares de satélites, decorrente de sua eficiência muito maior do que as células de silício de monojunção e, também, da sua resistência à radiação por partículas ionizantes encontradas no espaço (Cotal *et al.*, 2000; King *et al.*, 2000). Células solares de monojunção (silício e arseneto de gálio) atingem eficiência máxima de 26,7% e 28,8%, respectivamente (Green *et al.*, 2018; Green e Bremner, 2016) e, portanto, nova tecnologia foi necessária para que se possa ultrapassar esta marca limite. Esta nova tecnologia foi desenvolvida e corresponde aos chamados dispositivos de multijunção. Segundo Green e Bremner (2016) teoricamente um dispositivo com dezenas de junções poderá ter uma eficiência de 68% na conversão de energia solar em energia elétrica. Um painel solar com área de um metro quadrado feito com este dispositivo poderá gerar 680 W de energia elétrica pela conversão da energia solar recebido no padrão AM1,5G. Este mesmo dispositivo poderá ter uma eficiência de conversão em torno de 80% com luz solar concentrada maior do que 200X.

Aproveitamento melhor do espectro da radiação solar é possível, usando um dispositivo que tenha várias janelas espectrais que absorvem partes seletivas do espectro. Célula solar de multijunção corresponde a esta nova tecnologia onde cada janela é uma junção semicondutora. Atualmente células solares de tripla junção alcançam eficiências de conversão de 30% no espectro AM0, que é o espectro solar encontrado acima da atmosfera. Este dispositivo apresenta um grande potencial tecnológico e, através da escolha de ligas semicondutoras adequadas, a eficiência de conversão poderá em breve alcançar valores superiores a 40%.

O processo físico de conversão de energia solar em energia elétrica envolve a promoção de um elétron da banda de valência para a banda de condução no material semicondutor. Esta promoção acontece quando o elétron absorve um fóton de radiação eletromagnética. Pela relação de Planck-Einstein a energia do fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda e, em função disto, o gráfico da direita da Fig. 1 mostra de maneira relativa uma altura maior nos altos comprimentos de onda do que o gráfico do lado esquerdo. Também, o comprimento de onda de corte para acontecer esta promoção é definido por esta relação. Fótons com comprimento de onda maior do que o comprimento de onda de corte, que corresponde a energias menores do que a energia da banda proibida, não produzem o efeito fotovoltaico. Para o semicondutor Silício que tem uma largura da banda proibida de 1,10 eV, o comprimento de onda de corte é de 1127 nm. Portanto, os fótons a direita deste comprimento de onda não colaboram para a energia gerada pela célula solar de silício. Na Fig. 2 gráfico da esquerda vemos que a potência possível de ser usada para geração fotovoltaica é a área sob a curva azul, que corresponde a 44,9% da área total disponível ou da potência total disponível. Se a célula solar for do material arseneto de gálio, que tem uma largura da banda proibida de 1,43 eV e um comprimento de onda de corte de 867 nm, a energia possível de ser aproveitada por uma célula solar deste material será

de 41,1 %. A eficiência de conversão de uma célula solar de GaAs é maior do que a de Si por causa da energia do gap que é maior, 1,43 eV contra 1,10 eV. Nas células solares de tripla junção este mecanismo limitante da corrente fotogerada, portanto também, da eficiência da célula solar, é superado ou driblado pelas janelas espectrais das junções que estão em série, conforme pode ser visto na Fig. 2 gráfico lado direito. As áreas vermelha, azul e preta correspondem à absorção das junções de topo (32,7%), meio (15,8%) e base (20,4%) e, desta forma, as áreas somadas perfazem uma porcentagem de 68,9%, que é melhor do que as áreas de 44,9% para o Silício e de 41,1% para o GaAs.

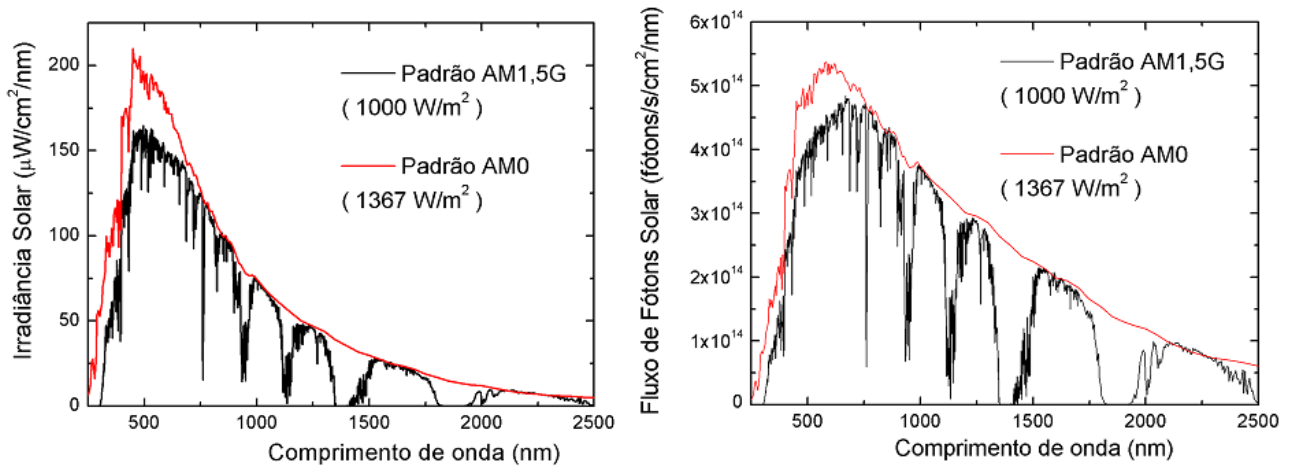


Figura 1- Curvas do espectro de irradiância espectral nos padrões AM1,5G e AM0, lado esquerdo da figura. Curvas do fluxo de fótons em função do comprimento de onda. Fonte: Curso Veissid, 2016.

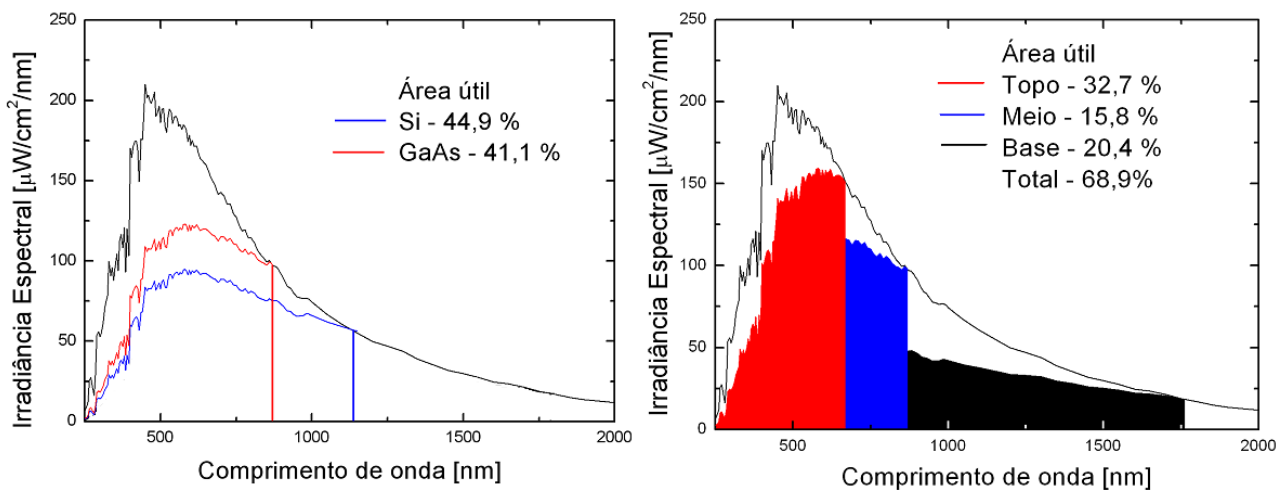


Figura 2- Curvas da irradiância espectral padrão AM0 e parte útil aproveitada pelas células solares de silício, arseneto de gálio e junções do topo, meio e de base de uma célula de tripla junção. Fonte: Curso Veissid, 2016.

A física do dispositivo célula solar de tripla junção mostra que a tensão de circuito aberto é a soma das tensões de cada junção individualmente. As três junções são conhecidas como junção de topo, junção do meio e junção da base (ver Fig. 3). No entanto, a corrente de curto-circuito, pelo fato que as junções estão ligadas em série, tem o valor da menor corrente de curto circuito gerada nas três junções. Este fato, menor valor das três correntes fotogeradas, implica em dificuldades experimentais para medir a curva de resposta espectral do dispositivo e a simulação apresentada neste trabalho mostra isto.

A curva característica da célula solar de tripla junção é resultado da soma em tensão das características individuais. Células solares de tripla junção (TJ) utilizam uma combinação de materiais semicondutores para capturar mais eficientemente os fótons na faixa de 300 nm a 1800 nm do espectro solar. A eficiência mínima de conversão AM0 para uma célula de TJ de primeira geração para uso espacial é de 26%. O GaInP, GaAs e Ge foram escolhidos devido aos valores da largura da banda de energia que se ajustam seletivamente ao espectro solar. GaInP, com energia de 1,85 eV absorve os fótons nas partes ultravioleta e visível do espectro solar. GaAs, com energia de 1,42 eV absorve luz vermelha e o infravermelho próximo e Ge absorve os fótons do infravermelho com energia superior a 0,67 eV. A Fig. 4 mostra as várias camadas epitaxiais com sua composição química da célula solar de tripla junção.

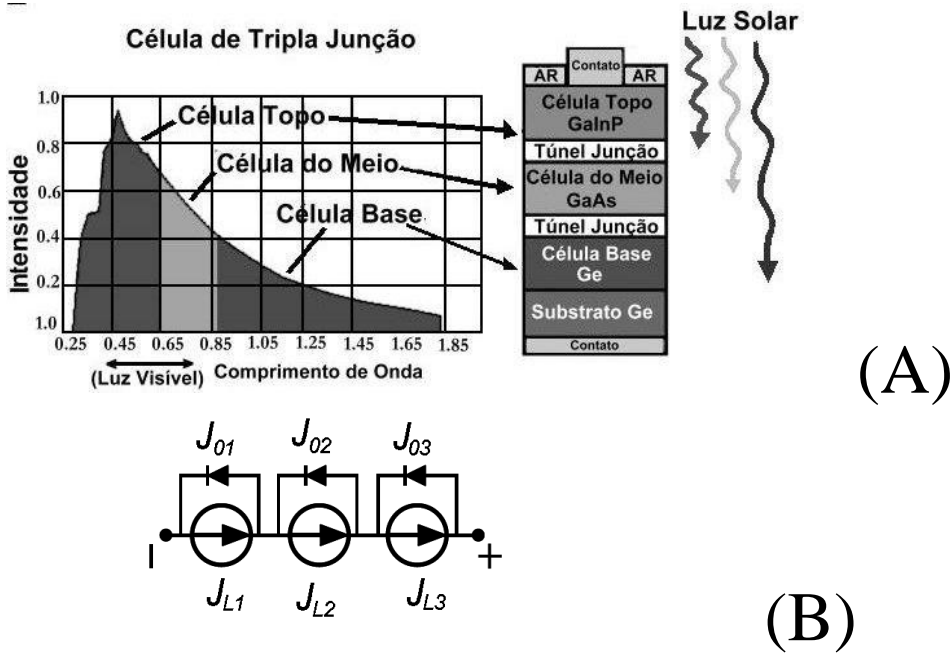


Figura 3- Esquemas ilustrativos (A e B) da física de operação de uma célula solar de tripla junção (adaptado de Abreu, 2006).

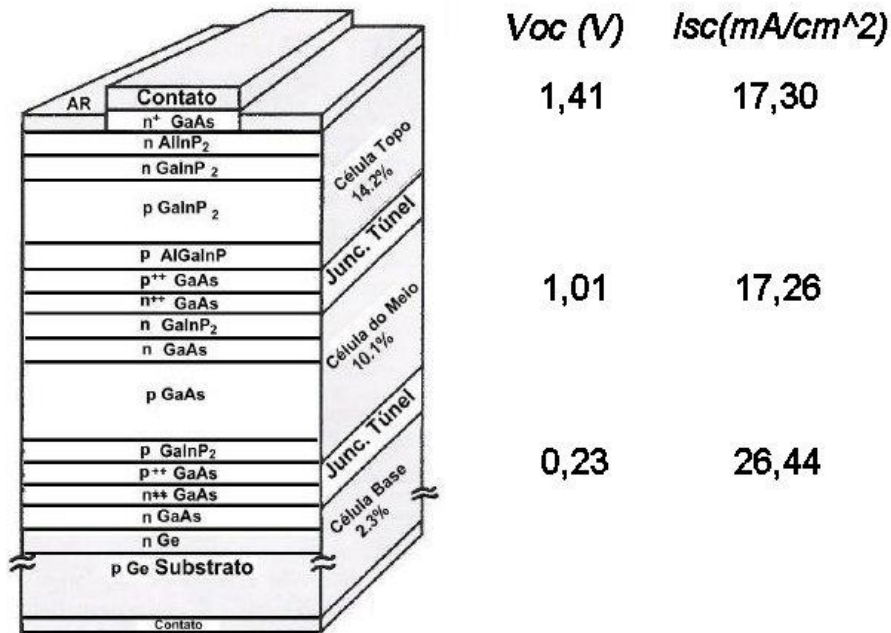


Figura 4- Esquema das camadas epitaxiais de materiais semicondutores que compõem a célula solar de tripla junção (Abreu, 2006) e os valores  $I_{SC}$  e de  $V_{OC}$  de cada junção em um espectro AM0 (Walker et al., 2016).

Os valores do lado direito da Fig. 4 correspondem a tensão de circuito aberto e a corrente fotogerada de cada junção. A tensão de circuito aberto do dispositivo é a soma das tensões individuais, que é  $V_{OC} = 2,65$  V. A corrente fotogerada do dispositivo é a fração de 95% do menor valor (17,26 mA/cm<sup>2</sup>) entre as junções, que é  $J_{SC} = 16,4$  mA/cm<sup>2</sup> (Walker et al., 2016).

O objetivo deste trabalho é relatar o desenvolvimento de um software de fácil uso para ser usado em conjunto com medidas experimentais de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto. Os valores obtidos na simulação servem de embasamento para interpretação correta dos valores obtidos experimentalmente. A ferramenta desenvolvida está sendo útil na dissertação de mestrado de um dos autores (D. G. P.) e faz parte da biblioteca pública referente à literatura pertinente.

## 2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalhos prévios de simulação computacional da curva I-V de uma célula solar de tripla junção (GaInP/GaInAs/Ge) mostram a importância deste estudo (Hussain *et al.*, 2016; Anaty *et al.*, 2016). Os dois trabalhos foram desenvolvidos independentemente usando plataforma MATLAB.

O dispositivo célula solar de tripla junção apresenta em sua característica de corrente por tensão os seguintes parâmetros de saída: tensões de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e de máxima potência ( $V_{MP}$ ), correntes de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) e de máxima potência ( $I_{MP}$ ). As seções abaixo mostram os algoritmos usados para determinação de  $I_{SC}$  e de  $V_{OC}$ .

### 2.1 Corrente fotogerada

Desprezando os efeitos da resistência em paralelo e da resistência em série, a corrente de curto-circuito é definido pela Eq. 1. Esta equação mostra que  $I_{SC}$  é o resultado da integral em comprimento de onda do produto da irradiância espectral ( $P$ ) pela resposta espectral ( $RE$ ). A Fig. 5 mostra de maneira didática o resultado desta integral, onde uma irradiância espectral constante de  $150 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$  iluminando um dispositivo com uma curva triangular de resposta espectral, produz uma corrente fotogerada de  $36 \text{ mA}/\text{cm}^2$ . A eficiência quântica de um dispositivo fotovoltaico é dado pela Eq. 2.

$$I_L = \int_0^{\infty} P(\lambda).RE(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$EQE = \frac{J_{sc}/e}{P \left| \frac{hc}{\lambda \times 10^{-9}} \right|} = \frac{1240 \times J_{sc}}{P \lambda} \quad (2)$$

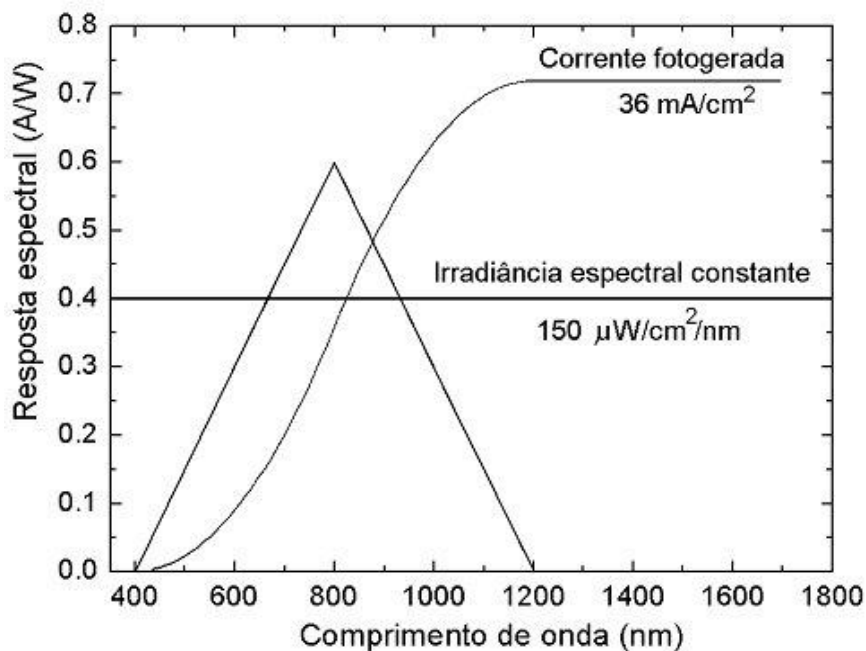


Figura 5- Curvas de corrente fotogerada em função do comprimento de onda de uma hipotética célula solar com curva de resposta espectral triangular. Fonte: Curso Veissid, 2017.

## 2.2 Tensão de circuito aberto

Uma célula solar multijunção corresponde à combinação em série de diferentes junções. A corrente que passa por cada junção é dada pela Eq. 3, onde o índice  $i$  corresponde aos valores de 1, 2 e 3 e são as junções 1, 2 e 3 conforme mostrado na Fig. 3. A Eq. 3 corresponde a situação de uma célula solar real de ótima qualidade onde foi desprezado o efeito da resistência em paralelo (Veissid, 1995). As tensões individuais de circuito aberto são dadas pela Eq. 4, onde considera-se que a corrente fotogerada é igual a corrente de curto-circuito do dispositivo e a corrente  $I$  é nula. Portanto, as tensões de circuito aberto individuais se somam e produzem a tensão de circuito aberto do dispositivo dado pela Eq. 5 (Rauschenbach, 1980).

$$I = I_{Li} - I_{Si} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_i + IR_{Si})}{A_i kT} \right] - 1 \right\} \quad (3)$$

$$V_{OCi} = \frac{A_i kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{Li}}{I_{0i}} \right) \quad (4)$$

onde:  $I_{Li}$  é a corrente fotogerada,  $R_{Si}$  é a resistência em série,  $A_i$  fator de qualidade do diodo e  $I_{Si}$  é a corrente de saturação. A constante  $q$  é o módulo da carga do elétron ( $q=e$ ),  $K=8,617 \times 10^{-5}$  eV/K é a constante de Boltzman e  $T$  é a temperatura em K.

$$V_{OC} = V_{OC1} + V_{OC2} + V_{OC3} \quad (5)$$

Os valores dos parâmetros das Eq. 3 e 4, que foram usados durante os cálculos deste trabalho, são encontrados no trabalho de Walker et al. (2016) e mostrados na Tab. 1.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros físicos do dispositivo tripla junção. Valores de antes e depois da irradiação com elétrons de 1 MeV na fluência de  $10^{15}$  elétrons de 1 MeV/cm<sup>2</sup> (Walker et al., 2017).

1 MeV e <sup>-</sup>	Cell	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	ff	P <sub>max</sub> (W)	V <sub>oc</sub> (volts)	V <sub>loss</sub> (%)	J <sub>o</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	n
0	Full	16.42	0.84	0.147	2.65			
	J <sub>1</sub>	17.30	0.88	0.086	1.41		3.75E-19	1.20
	J <sub>2</sub>	17.26	0.83	0.058	1.01		1.50E-10	1.52
	J <sub>3</sub>	26.44	0.64	0.016	0.23		8.88E-03	1.11
1 x 10 <sup>15</sup>	Full	15.78	0.83	0.124	2.39			
	J <sub>1</sub>	17.16	0.87	0.080	1.34	26.45	2.11E-17	1.26
	J <sub>2</sub>	16.34	0.85	0.046	0.83	67.06	4.44E-11	1.21
	J <sub>3</sub>	26.35	0.65	0.015	0.21	6.49	6.85E-03	1.00

## 2.3 Programa computacional

Foi desenvolvido programa computacional em linguagem Pascal para calcular os valores de corrente de curto-circuito e de tensão de circuito aberto na célula solar de tripla junção. O programa desenvolvido é chamado de programa “PARATRI” e é apresentado pela primeira vez na literatura neste trabalho. Figura 6 mostra a primeira tela do programa de simulação. Primeira linha pede o nome da lista de arquivos e, em seguida, o programa mostra as linhas desta lista. Primeira linha é o arquivo das curvas de resposta espectral da junção do topo, meio e base. As outras linhas são curvas de irradiância espectral.

```

Este programa calcula as correntes fotogeradas da célula tripla junção.

Entrar nome lista de arquivos (.txt)? simula
tripla
d350
d400
d450
d500
d550
d600
d650
d700
d750
d800
d900
d1000
Lido LISTA com 13 linhas no arquivo .txt.
    
```

Figura 6- Primeira tela do programa computacional PARATRI de simulação.

Fig. 7 mostra a tela de entrada com as opções do programa PARATRI. O procedimento correto é primeiro calcular as correntes fotogeradas e depois gravar arquivo com terminação “.isc”. Fig. 8 mostra a tela com os valores calculados no programa.

```

PROGRAM Multijunction
Author: Dr N. Veissid
Original Version: 2017 March
Current Revision: 2017 March
Version: 1.00
Copyright: 2017. All Rights Reserved
Este programa calcula os valores das correntes fotogeradas da
celula solar de tripla juncao e grava no arquivo *.isc.

Este programa executa as seguintes tarefas :

Gravar arquivo ISC (.ISC): <G>

Calcular as correntes fotogeradas: <C>

Sair do programa: <S>

Entre com a opcao desejada :_
    
```

Figura 7- Segunda tela do programa computacional PARATRI de simulação.

d350.dir	164.44	552.67	488.39
d400.dir	398.05	552.67	488.39
d450.dir	458.46	552.67	488.39
d500.dir	497.84	555.23	488.39
d550.dir	487.99	590.23	488.39
d600.dir	448.66	624.40	488.39
d650.dir	319.82	774.86	488.39
d700.dir	401.04	541.43	488.39
d750.dir	398.05	552.67	488.39
d800.dir	398.05	543.72	510.01
d900.dir	398.05	617.69	414.13
d1000.dir	398.05	552.67	488.39

```

PROGRAM Multijunction
Author: Dr N. Veissid
Original Version: 2017 March
Current Revision: 2017 March
Version: 1.00
Copyright: 2017. All Rights Reserved
Este programa calcula os valores das correntes fotogeradas da
celula solar de tripla juncao e grava no arquivo *.isc.
    
```

Figura 8- Tela final do programa computacional de simulação com os valores de corrente fotogerada na unidade de  $\mu\text{A}$ .

### 3. RESULTADOS

O programa de simulação PARATRI permite várias possibilidades de simulação e entre elas podemos destacar que:

-Escolhe-se um espectro de irradiância espectral e, em conjunto, incrementos de intensidade luminosa monocromática para verificar o efeito do incremento nos parâmetro de saída  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ . Nesta opção temos um espectro base e os outros espectros é o espectro base com os incrementos. Desta forma, é fácil verificar o efeito dos incrementos nos valores da corrente fotogerada e nos valores da tensão de circuito aberto.

-Vários espectros monocromáticos de radiação luminosa para verificar a variação dos parâmetros de saída do dispositivo em função do comprimento de onda. Este trabalho usa este algoritmo na simulação.

Fig. 9 mostra simulação feita neste trabalho para cálculo de corrente fotogerada e tensão de circuito aberto. Quinze picos monocromáticos de luz foram escolhidos. Os comprimentos de onda destes picos, mostrados na Fig. 8, são 350 nm, 400 nm, 450 nm, 500 nm, 550 nm, 600 nm, 650 nm, 700 nm, 750 nm, 800 nm, 900 nm, 1000 nm, 1100 nm, 1200 nm e 1300nm. Todos os picos com a mesma intensidade com valor máximo de  $55 \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$  e largura a meia altura de 10 nm. Na Fig. 9 os picos coloridos de azul (350 nm e 400 nm), vermelho (750 nm) e verde (1100 nm e 1200 nm) são os picos de polarização. Estes valores foram escolhidos porque estão contidos somente nas curvas de eficiência quântica de topo, meio e base. Fig. 9 mostra que os picos azuis não excitam a junção do meio, curva vermelha, e nem a junção de base, curva verde. O pico vermelho está localizado em comprimento de onda na faixa estreita que não influencia a junção de topo e nem a junção da base. Adicionalmente, os picos verdes excitam somente a junção da base. Conforme explicado na introdução deste trabalho, a característica da célula solar de tripla junção apresenta sempre o menor valor de corrente fotogerada entre as três junções. Desta forma, quando se estuda a junção do topo é necessário polarizar as junções do meio e da base com uma intensidade suficiente para que as correntes fotogeradas destas duas junções sejam maiores do a junção que esta sendo estudada. O mesmo acontece para as junções do meio e da base. Os picos de cores azul, vermelho e verde são os picos de polarização das junções do topo, meio e base, respectivamente. A junção de topo precisou de dois picos de polarização para ter uma maior corrente fotogerada do que as junções do meio e da base. De maneira análoga a junção da base também precisou de dois picos de polarização. Fig. 9 mostra em detalhes os picos de polarização.

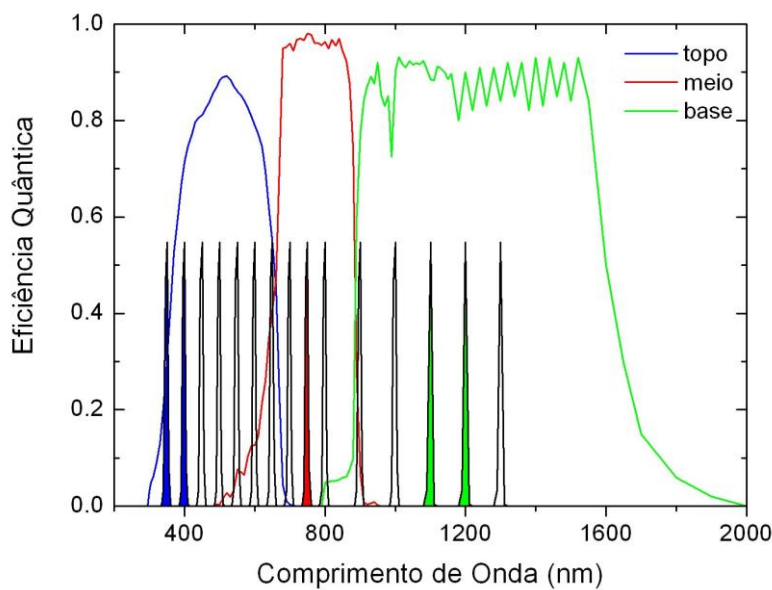


Figura 9- Segunda tela do programa computacional de simulação.

Tab. 2 mostra o resultado dos cálculos do programa PARATRI conforme simulação mostrada esquematicamente na Fig. 9. As colunas  $I_{SCtopo}$ ,  $I_{SCmeio}$  e  $I_{SCbase}$  foram calculadas usando a Eq. 1 e as colunas  $V_{OCtopo}$ ,  $V_{OCmeio}$  e  $V_{OCbase}$  foram calculadas usando Eq. 2. A coluna  $I_{SCesp}$  corresponde a corrente de curto-circuito esperada para o dispositivo, que é de 95% da menor corrente entre os valores colunas de  $I_{SCtopo}$ ,  $I_{SCmeio}$  ou  $I_{SCbase}$  (Walker, 2017). A última coluna mostra a tensão de circuito aberto do dispositivo que é a soma das tensões de circuito aberto das junções individuais.

Tabela 2 – Resultado do programa “PARATRI” para simulação de iluminação mostrada na Fig. 9.

tripla_dsr condição	$I_{SCtopo}$	$I_{SCmeio}$	$I_{SCbase}$	$V_{OCtopo}$	$V_{OCmeio}$	$V_{OCbase}$	$I_{SCesp}$	$V_{OCesp}$
d350.dir	164	553	1044	1.26498	0.86885	0.13731	156	2.27114
d400.dir	398	553	1044	1.29251	0.86885	0.13731	378	2.29867
d450.dir	458	553	1044	1.29691	0.86885	0.13731	436	2.30307
d500.dir	498	555	1044	1.29947	0.86903	0.13731	473	2.30582
d550.dir	488	590	1044	1.29885	0.87145	0.13731	464	2.30761
d600.dir	449	624	1044	1.29623	0.87366	0.13731	426	2.30721
d650.dir	320	775	1044	1.28569	0.88218	0.13731	304	2.30519
d700.dir	565	541	1044	1.30344	0.86804	0.13731	514	2.30879
d750.dir	562	553	1044	1.30328	0.86885	0.13731	525	2.30944
d800.dir	562	544	1066	1.30328	0.86821	0.13790	517	2.30939
d900.dir	562	65	1458	1.30328	0.78444	0.14694	62	2.23465
d1000.dir	562	553	488	1.30328	0.86885	0.11543	464	2.28756
d1100.dir	562	553	519	1.30328	0.86885	0.11717	493	2.28930
d1200.dir	562	553	525	1.30328	0.86885	0.11752	499	2.28965
d1300.dir	562	553	493	1.30328	0.86885	0.11571	469	2.28784

Os valores da Tab. 2 estão mostrados em forma gráfica na Fig. 10. Os valores mostram que o resultado esperado foi alcançado. Nos comprimentos de onda de 350 nm até 650 nm foi predominante a junção de topo, que apresentou os menores valores de corrente fotogerada. Nos comprimentos de onda entre 700 nm e 900 nm aconteceu da junção do

meio produzir a menor corrente. Nos comprimentos de onda de 1000 nm, 1100 nm, 1200 nm e 1300 nm a menor corrente fotogerada foi produzida na base. Este resultado foi conseguido porque as junções do topo e da base tiveram dois picos de polarização cada uma. A Fig. 10 mostra dois vales na curva da corrente de curto-circuito em 650 nm e 900 nm. A radiação monocromática em 650 nm é dividida nas junções do topo e na junção do meio e, este fato, é confirmado pelo aumento na corrente fotogerada da junção do meio (ver ponto vermelho no gráfico da esquerda em 650 nm). O mesmo fenômeno acontece em 900 nm, onde a radiação monocromática é dividida nas junções do meio e da base (ver ponto verde com valor aumentado em 900 nm). A região da base mostrou valores de corrente fotogerada muito próximos para as três junções. O resultado das tensões de circuito aberto obtido nesta simulação não foi tão pronunciado como intuitivamente estava se esperando. Explicando melhor, a Fig. 10 lado direito mostra que a variação da tensão de circuito aberto, com o comprimento de onda da luz monocromática incidente no dispositivo, não apresenta variações significativas. A corrente fotogerada teve de modo arredondado oscilação entre 100 a 500  $\mu\text{A}$ , variou por um fator de cinco, e a tensão de circuito aberto oscilou entre 2,24 e 2,31 V, variação de 2% em torno do valor médio. Em um experimento esta pequena variação pode ser confundida com oscilação de temperatura.

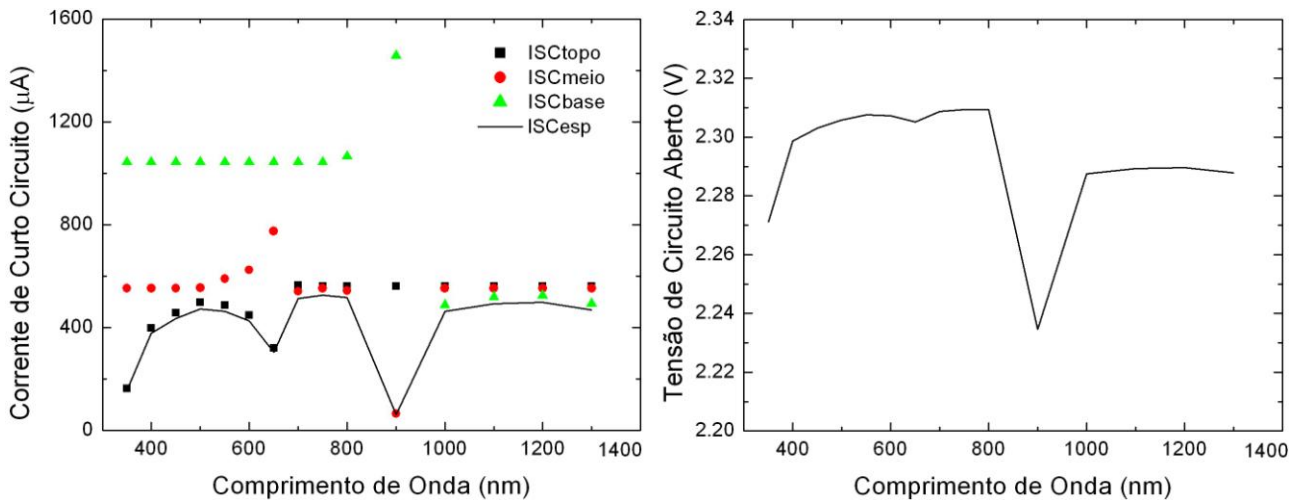


Figura 10 – Resultados na forma gráfica da simulação mostrada na Fig. 9 usando programa “PARATRI”.

#### 4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta os resultados de um programa de simulação chamado “PARATRI”, que foi desenvolvido no INPE em São Jose dos Campos. O programa foi usado para calcular a resposta de uma célula solar de tripla junção (GaInP/GaAs/Ge) em função de picos de radiação eletromagnética monocromática. Os valores dos parâmetros de saída são mostrados em tabela e em modo gráfico. A variação da corrente de curto-circuito é fortemente dependente da resposta espectral das três junções do dispositivo e do espectro da radiação incidente e, segundo a simulação, ela pode variar até cinco ordens de grandeza. A variação da tensão de circuito aberto é pouco dependente das condições de iluminação do dispositivo e seu valor oscila de mais ou menos 2% em torno da média, na simulação feita neste trabalho.

O programa “PARATRI” é um ponto de partida para trabalhos futuros em células solares de tripla junção ou multijunção. Os satélites modernos e os futuros satélites a serem montados no INPE irão fazer cada vez mais uso de células solares deste tipo e, desta forma, em harmonia com as linhas de trabalho do INPE, agora o grupo de dispositivos fotovoltaicos (GDF/INPE) conta com uma ferramenta computacional para estudar o comportamento destas células solares para uso em satélite. A evolução deste programa será dada no sentido de simular ou calcular os parâmetros de saída em temperaturas diferentes da temperatura ambiente. Também, conforme pode ser visto na Tab. 1, o programa pode ser melhorado no sentido de simular a variação dos parâmetros de saída com a vida do satélite.

#### REFERÊNCIAS

- Abreu, R. A. S., 2006. Caracterização elétrica de células solares de tripla junção – GaInP/GaAs/Ge, Dissertação de Mestrado, LAS/CTE, INPE, São José dos Campos - SP.
- Anaty, M. K., Belkasmí, M., Bouziane, K., Aggour, M., Ouahabi, M., 2016. Modeling and simulation of a C3MJ+ triple junction solar cell using Matlab/Simulink. International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech - Marrocos, p. 840 nos Anais da Conferência.



- Cotal, H. L., King, R. R., Haddad, M., Ermer, J. H., Karam, N. H., Krut, D. D., Joslin, D. R., Takahashi, M., Cavicchi, B. T., 2000. The effects of electron irradiation on triple-junction Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>P/GaAs/Ge Solar Cells, Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage.
- Green, M. A., Bremner, S. P., 2016, Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics, Nature Materials, p. 23.
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Ho-Baillie, A. W. Y., 2018. Solar cell efficiency tables (version 51). Prog. Photovoltaics Res. Appl. 26, p. 3-12. <https://doi.org/10.1002/pip.2978>.
- Hussain, A.B., Abdalla, A. S., Mukhtar, A. S., Elamin, M., Alammari, R., Iqbal, A., 2017. Modelling and simulation of single- and triple-junction solar cells using MATLAB/SIMULINK, International Journal of Ambient Energy, Vol. 38, p. 1-9.
- King, R. R., Fetzer, C. M., Law, D. C., Edmondson, K. M., Yoon, H., Kinsey, G. S., Krut, Ermer, J. H., Hebert, P., Cavicchi, B. T., Karam, N. H., 2006. Advanced III-V multijunction cells for space, Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii.
- Rauschenbach, H. S., 1980. Solar Cell Array Design Handbook, edited by Van Nostrand Reinhold Comp., New York.
- Veissid, N., Bonnet, D., Richter, H., 1995. Experimental investigation of the double exponential model of a solar cell under illuminated conditions: considering the instrumental uncertainties in the current, voltage and temperature values, Solid-State Electronics 38(11), p. 1937.
- Veissid, N., 2016. Curso de Pós-Graduação na Engenharia do INPE “Curva de Corrente por Tensão (IxV) de Célula Solar e Módulo Solar”.
- Walker, D., Nocerino, J., Yue, Y., Mann, C. J., Liu, S. H., 2016. Subcell light current-voltage characterization of irradiated multijunction solar cell, Proceedings of 11th European Space Power Conference-Greece, ESPC 2016, p. 54.

### TRIPLE JUNCTION SOLAR CELL OUTPUT PARAMETERS STUDY

**Abstract.** *This article studies the influence of spectral irradiance on the output parameters (short circuit current and open circuit voltage) of a triple junction solar cell. In this kind of device, the junctions are overlapped spectral windows that absorb parts of the electromagnetic radiation. The junctions are connected in series and, due to this fact, the smallest photocurrent leads to the short circuit current of the device. A program in the Pascal language was developed to calculate the theoretical values of the output parameters of the IxV characteristic curve of the triple junction solar cell and it is called "PARATRI". The simulation shows that increments of the monochromatic intensities in a given spectral irradiance may not show an increase in the short-circuit current values, but it certainly increases the open-circuit voltage value. The simultaneous analysis of the variation of the short-circuit current and the open-circuit voltage variation as a function of the irradiance, intensity and spectrum that allows a study of the performance of multi-junction solar cells.*

**Key words:** *Solar Cell, Solar Energy, Simulation*