

# SIMULADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO (SOLSIM): SIMULAÇÃO DA CORRENTE FOTOGERADA EM DIFERENTES CÉLULAS SOLARES

Nelson Veissid – veissid@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais

Célio Costa Vaz – orbital@big-host.com.br

Orbital Eng. Ltda, Divisão de Iluminação Especial

**Resumo.** O simulador solar de baixo custo (SOLSIM) desenvolvido pelo INPE em parceria com a empresa Orbital Eng. Ltda é composto por um conjunto de dois tipos diferentes de lâmpadas. O espectro AM1,5G, obtido pela superposição dos espectros individuais de cada tipo de lâmpada, é de classe A. Neste trabalho compara-se os valores de corrente fotogerada do SOLSIM com a de outros simuladores solares na irradiação padrão AM1,5G ( 1000 W/m<sup>2</sup> ) das normas ABNT NBR 11879, IEC 904-9 e ASTM E 927-85. A simulação é feita considerando-se curvas de irradiância espectral de diferentes simuladores solares e de resposta espectral de diferentes células solares. Os resultados indicam que o mesmo dispositivo pode ter variações de até 40% no valor da corrente fotogerada quando caracterizado com simuladores de diferentes classes. O SOLSIM e o X25 foram os equipamentos que apresentaram o menor desvio padrão médio, em torno de 1 %, em relação aos valores de corrente fotogerada calculadas para o padrão AM1,5G. Somado a este fato, o SOLSIM é o equipamento que mostra o menor custo por benefício pois seu preço (quinze mil dolares) é da ordem de um terço dos equipamentos importados.

**Palavras-chave:** Simulador Solar, Corrente Fotogerada, Energia Solar, Padrão AM1,5G

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas chamados de “Simulador Solar” permitem produzir em laboratório as condições de iluminação da luz solar natural. Basicamente, estas condições são intensidade, espectro, uniformidade e estabilidade temporal. No espectro solar extraterrestre encontrado em órbita em torno do planeta Terra, conhecido como AM0 (air mass null), a intensidade é de 1367 W/m<sup>2</sup> e o espectro terrestre encontrado na superfície, após o AM0 ter atravessado a camada de atmosfera, é conhecido como AM1,5G e tem uma intensidade 1000 W/m<sup>2</sup>. A uniformidade da iluminação solar natural é muito melhor do que 1 % devido à distância Terra-Sol. A estabilidade temporal, também, é melhor do que 1 % para céu aberto com condições climáticas adequadas durante um curto período de tempo de alguns minutos.

A Norma da ABNT (1991) estabelece requisitos de desempenho para os simuladores solares, em termos dos parâmetros comentados acima. A Tab. 1 mostra as exigências necessárias para classificação de um simulador solar.

Tabela 1. Classificação de um simulador solar quanto as suas características.

Característica	Classe A	Classe B	Classe C
-Uniformidade da radiação	≤ ± 2%	≤ ± 5%	≤ ± 10%
-Estabilidade temporal	≤ ± 2%	≤ ± 5%	≤ ± 10%
-Casamento espectral	≤ ± 25%	≤ ± 40%	≤ +100% e -60%

O casamento espectral corresponde à razão entre porcentagem (valor medido pelo valor padrão), especificado na Tab. 2, para cada intervalo de comprimentos de onda. Os intervalos de comprimentos de onda desta tabela são adequados para caracterização de células solares de silício. Portanto, simuladores solares para uso com células de outros materiais precisam de normas atuais que cobrem uma gama maior de comprimentos de onda.

Um típico simulador solar é composto por uma lâmpada de descarga em gás de Xenônio de alta pressão, 100 atmosferas quando acesa, fonte de alimentação, refletor elipsoidal, espelhos a 45°, integrador óptico, obturador, suporte para filtros e lente colimadora. Normalmente, com uma lâmpada de 1000 W, ele ilumina uma área de 10cmx10cm. O preço de um equipamento, com esta descrição, é da ordem de US\$ 50.000.

Existem, também, simuladores solares de luz pulsada usado para iluminar grandes áreas. Por exemplo, o LAPSS (Large Area Pulsed Solar Simulator) da Spectrolab custa ao redor de US\$ 300.000 e ilumina uma área de dois metros de diâmetro durante o pulso de luz de 10 ms de duração. Este tipo de equipamento permite obter a característica corrente por tensão de um painel solar sem alterar a sua temperatura (Rauschenbach, 1980).

O desenvolvimento do simulador solar de baixo custo (SOLSIM) é um projeto do INPE (Grupo de Células Solares do LAS) e contou com apoio financeiro da FINEP. Trabalho apresentado no I Congresso Brasileiro de Energia Solar mostrou as etapas do seu desenvolvimento (Veissid e Vaz, 2007). No ano de 2008, a tecnologia foi repassada para

empresa Orbital Eng. Ltda e, esta empresa, melhorou o SOLSIM com a inclusão de itens de segurança e, também, transformou o protótipo de laboratório em um produto com bom aspecto e funcionalidade para ser comercializado, conforme pode ser visto na Fig. 1.

Tabela 2. Distribuição espectral da radiação de referência, onde a porcentagem é relativa a parcela em potência da radiação total.

Intervalo de comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Porcentagem da radiação total no AM1,5G (%)	Porcentagem da radiação total no AM0 (%)
0,4 a 0,5	18,5	20,5
0,5 a 0,6	20,1	20,5
0,6 a 0,7	18,3	17,5
0,7 a 0,8	14,8	14,0
0,8 a 0,9	12,2	11,2
0,9 a 1,1	16,1	16,3



Figura 1- Protótipo de laboratório do simulador solar SOLSIM versus equipamento comercializável.

O simulador solar SOLSIM mostra os valores de descasamento espectral por faixa de comprimento de onda, conforme dado na Tab. 3. Os valores desta tabela classificam o SOLSIM como sendo de Classe A em termos de espectro.

Tabela 3. Valores de descasamento espectral por faixa de comprimento de onda no simulador solar SOLSIM.

Faixa de comprimento de onda (nm)	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
Descasamento Espectral (%)	-6,4	-1,8	+4,2	+11,3	-1,5	-7,5	-16,9

Outra característica importante de um simulador solar SOLSIM é a uniformidade no plano alvo, pois conforme consta na Tab. 1 deve ser melhor do que 10 % para que o equipamento possa ser chamado de “SIMULADOR SOLAR”. A Fig. 2 mostra que o SOLSIM tem uniformidade melhor do que 10 % para uma área de 20 cm de diâmetro e melhor do que 5 % para uma área menor (10 cm de diâmetro). A estabilidade temporal é mantida dentro de uma variação de  $\pm 5\%$  através da regulagem manual da alimentação no VARIAC. O sistema possui indicador digital da tensão de alimentação e, para garantir, a estabilidade temporal o valor desta tensão pode variar  $\pm 2\text{ V}$  em torno da tensão de calibração.

Portanto, conforme Tab. 1, o SOLSIM pode ser classificado como sendo de Classe B para a área de iluminação de 10 cm de diâmetro ou Classe C para 20 cm de diâmetro.

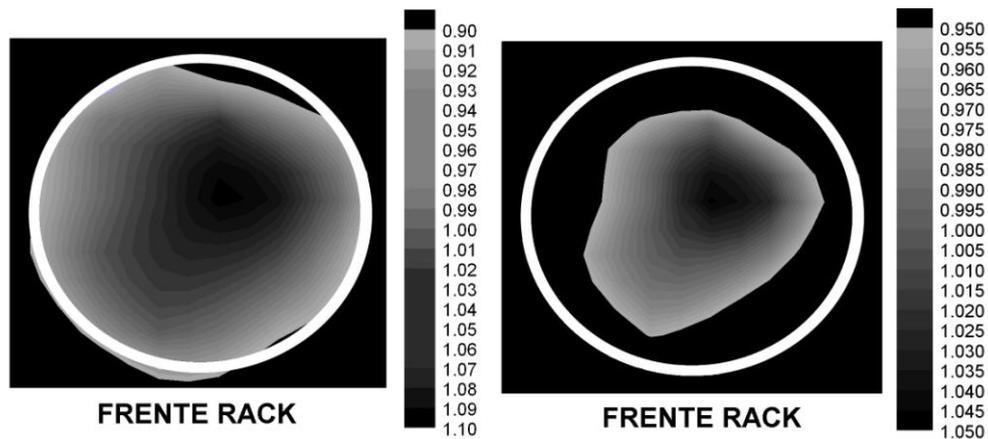


Figura 2- Imagens da uniformidade de iluminação no plano alvo do SOLSIM. A imagem do lado esquerdo mostra a uniformidade ( $\pm 10\%$ ) numa área de 20 cm de diâmetro e no lado direito é de  $\pm 5\%$  numa área menor.

## 2. MÉTODO

O trabalho considera quatro diferentes espectros de simuladores solares (X25 da Spectrolab, lâmpada de Xenon com filtros, SOLSIM e caseiro feito com lâmpadas dicróicas) e compara a resposta das correntes fotogeradas com o espectro padrão AM1,5G. A Fig. 3 mostra as curvas de resposta espectral das células solares de homojunção (CdTe, InP, GaAs, CIGS, Si-poli, Si-mono e nano célula solar) consideradas neste trabalho, que foram adaptadas da apresentação de H. Field no 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1997). A Fig. 4 mostra os espectros de vários simuladores solares considerados no estudo deste trabalho. O cálculo da corrente fotogerada ( $I_L$ ) é feito pela integral (Eq. 1) do produto da resposta espectral do dispositivo com os valores das curvas de irradiância espectral mostradas nesta figura.

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

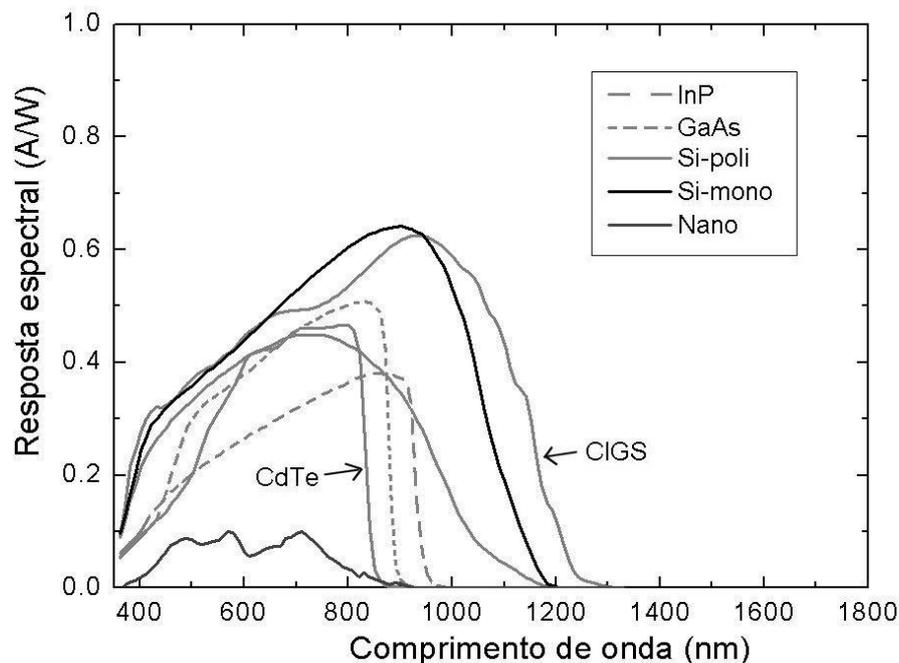


Figura 3- Curvas de resposta espectral das células solares consideradas neste trabalho.

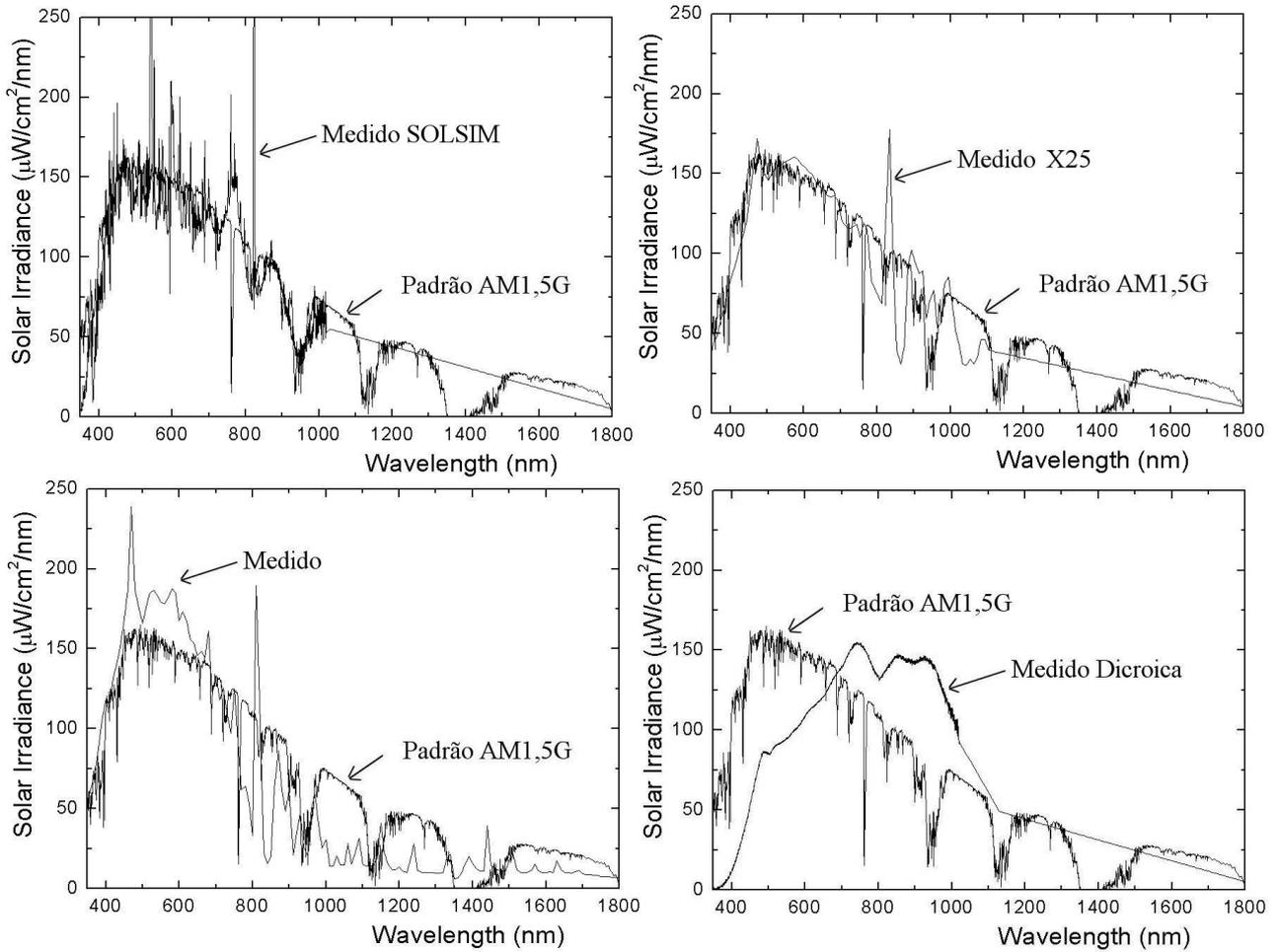


Figura 4- Curvas de irradiância espectral dos simuladores solares considerados neste trabalho.

Também, foi considerado para estudo da corrente fotogerada uma célula solar de tripla junção. A Fig. 5 mostra as curvas de resposta espectral das junções topo, meio e base, tomada do trabalho de Nishioka et al. (2006).

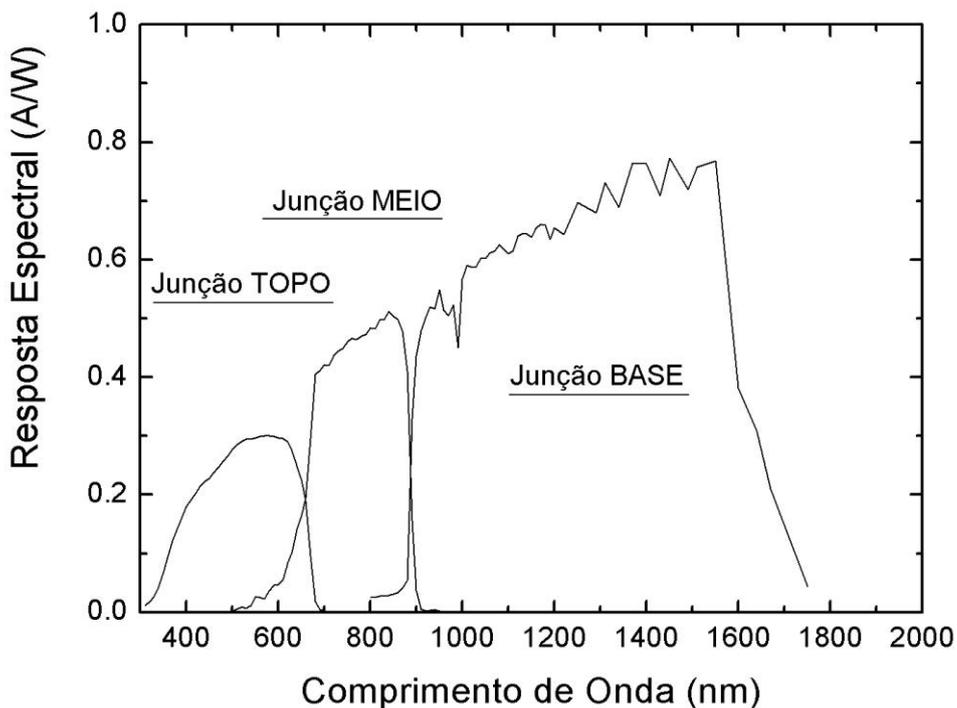


Figura 5- Curvas de resposta espectral das junções de uma célula solar de tripla junção.

### 3. RESULTADOS

O espectro AM1,5G é tomado como base dos valores de corrente fotogerada e os simuladores solares devem reproduzir os valores nesta condição. A Fig. 6 mostra a simulação numérica, usando a Eq. 1, feita para as sete células solares de homojunção da Fig. 3.

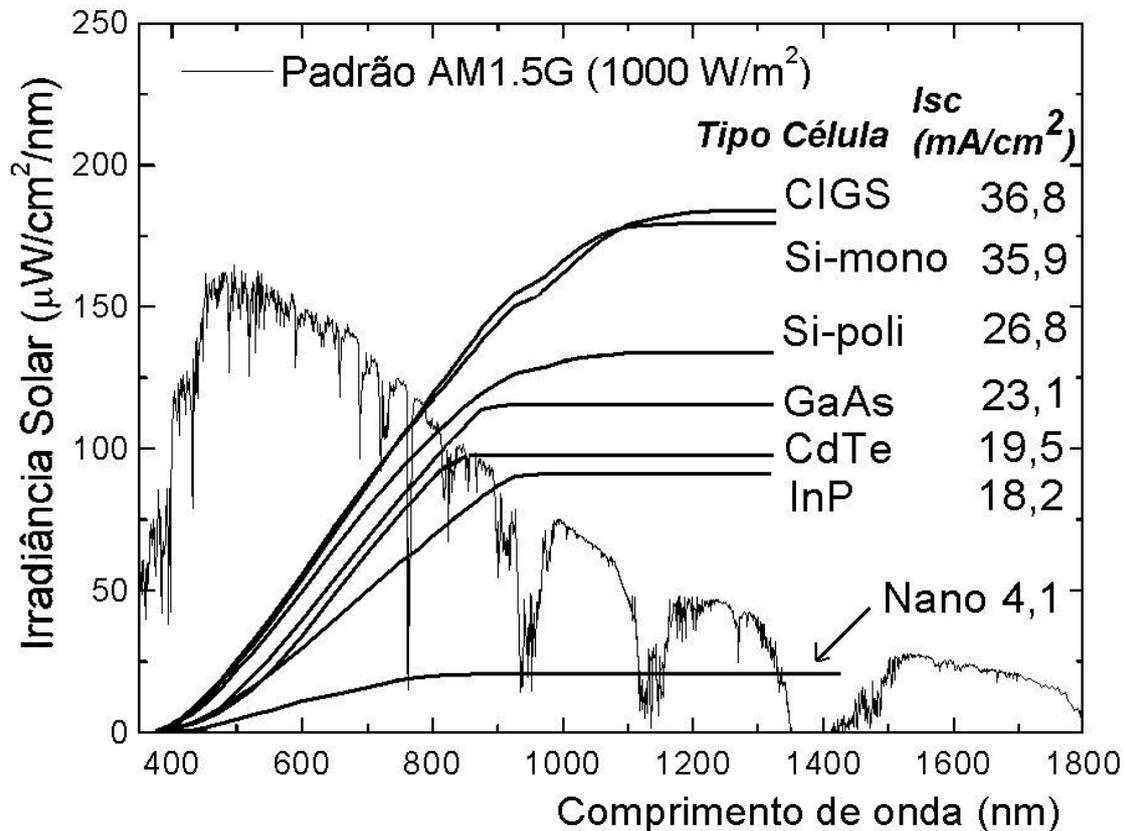


Figura 6- Simulação numérica da corrente fotogerada sob espectro AM1,5G para sete tipos de células solares.

A célula solar de homojunção CIGS (Copper Indium Gallium Diselenide) apresenta a maior corrente fotogerada (36,8 mA/cm<sup>2</sup>). Este valor está bem coerente com os valores encontrados em artigos pertinentes (Zabierowski, 2006).

Células solares de tripla junção são dispositivos de alto custo (por exemplo, uma célula de 26,6 cm<sup>2</sup> de área custa US\$ 300 cada) devido ao seu processo de fabricação e, também, devido ao controle de qualidade neste processo. O uso desta célula solar em satélite está se tornando cada vez mais corriqueiro em função da alta eficiência de conversão de energia solar para elétrica deste dispositivo. Estudo, pesquisa e caracterização experimental em célula solar de tripla junção foi realizado pela primeira vez no Brasil no Grupo de Energia Solar do LAS/INPE em São José dos Campos-SP. Este trabalho resultou em uma dissertação de mestrado de Santos de Abreu (2006). A Fig. 7 mostra a simulação numérica da corrente fotogerada feita para a célula solar de tripla junção no espectro padrão AM1,5G.

A Tab. 4 mostra os resultados da simulação numérica da corrente fotogerada em células solares de homojunção nos espectros dos outros simuladores solares.

Tabela 4. Valores das correntes fotogeradas das células solares de homojunção em cinco diferentes condições de irradiância 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula 25 °C e espectro AM 1,5G.

Tipo de Célula	AM1,5G	X25	XENON	Homemade	SOLSIM
Silício - mono	35,90 mA/cm <sup>2</sup>	35,39 mA/cm <sup>2</sup>	32,71 mA/cm <sup>2</sup>	40,45 mA/cm <sup>2</sup>	35,76 mA/cm <sup>2</sup>
Silício - poli	26,77 mA/cm <sup>2</sup>	26,56 mA/cm <sup>2</sup>	26,39 mA/cm <sup>2</sup>	26,95 mA/cm <sup>2</sup>	26,80 mA/cm <sup>2</sup>
CIGS	36,81 mA/cm <sup>2</sup>	36,11 mA/cm <sup>2</sup>	32,93 mA/cm <sup>2</sup>	41,36 mA/cm <sup>2</sup>	36,73 mA/cm <sup>2</sup>
GaAs	23,07 mA/cm <sup>2</sup>	22,49 mA/cm <sup>2</sup>	23,09 mA/cm <sup>2</sup>	22,27 mA/cm <sup>2</sup>	23,39 mA/cm <sup>2</sup>
CdTe	19,51 mA/cm <sup>2</sup>	19,49 mA/cm <sup>2</sup>	20,45 mA/cm <sup>2</sup>	18,02 mA/cm <sup>2</sup>	19,90 mA/cm <sup>2</sup>
InP	18,20 mA/cm <sup>2</sup>	17,98 mA/cm <sup>2</sup>	17,64 mA/cm <sup>2</sup>	18,83 mA/cm <sup>2</sup>	18,39 mA/cm <sup>2</sup>
Nano	4,11 mA/cm <sup>2</sup>	4,11 mA/cm <sup>2</sup>	4,51 mA/cm <sup>2</sup>	3,33 mA/cm <sup>2</sup>	4,11 mA/cm <sup>2</sup>

A Tab. 5 mostra o resultado da simulação numérica do cálculo da corrente fotogerada nas junções topo, meio e base de uma célula solar de tripla junção. A tabela mostra que a junção topo é a limitante no espectro padrão AM1,5G, pois numa célula solar de tripla junção é sempre a menor corrente que determina o valor da corrente de curto circuito

por que as três junções estão em série. Os outros simuladores solares, também, tiveram a junção topo como limitante com exceção do simulador solar com lâmpada de Xenon. Neste simulador, a junção limitante foi a junção da base.

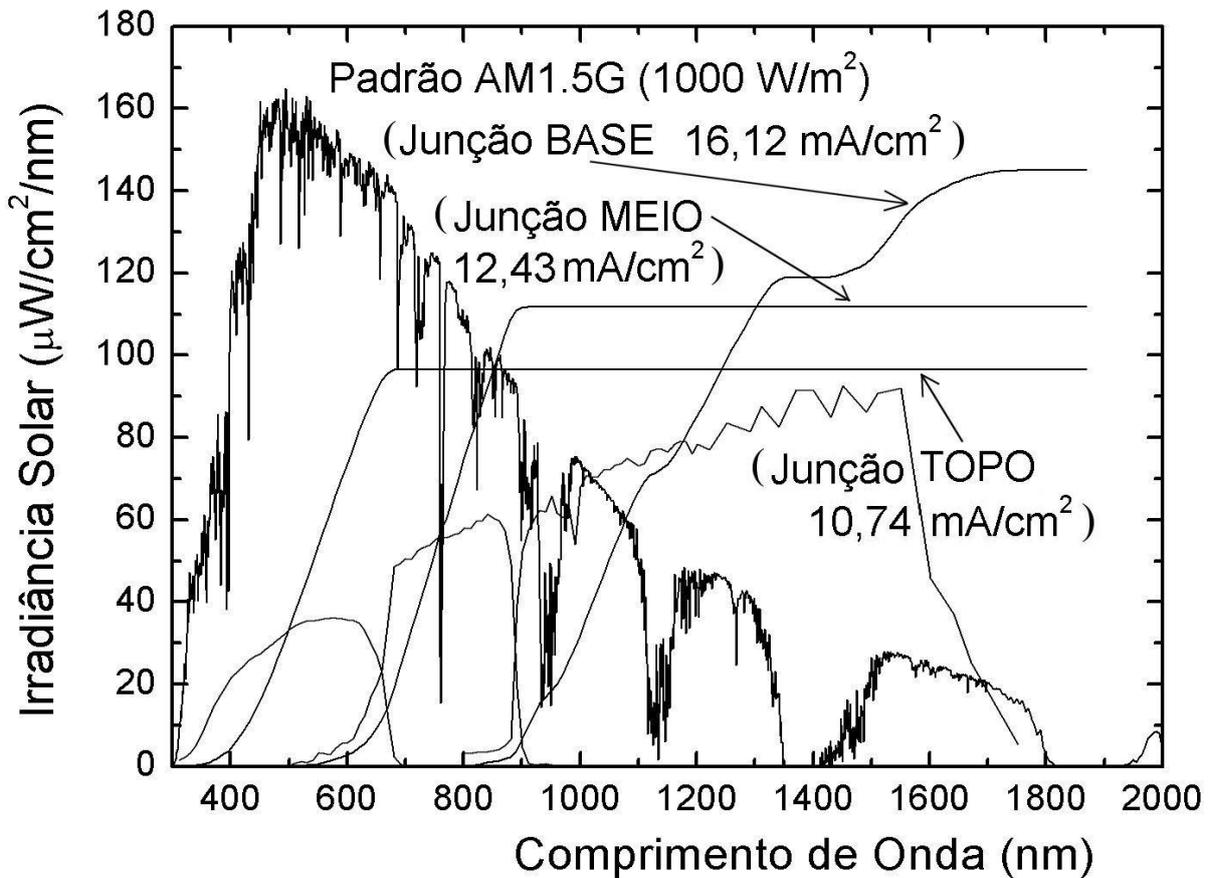


Figura 7- Simulação numérica da corrente fotogerada sob espectro AM1,5G para as junções da célula solar TJ.

Tabela 5. Valores das correntes fotogeradas da célula solar de tripla junção em cinco diferentes condições de irradiância espectral com 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula 25 °C e espectro AM 1,5G.

Tipo de Junção	AM1,5G	X25	XENON	Homemade	SOLSIM
Tripla – TOPO	10,74 mA/cm <sup>2</sup>	10,65 mA/cm <sup>2</sup>	12,61 mA/cm <sup>2</sup>	6,24 mA/cm <sup>2</sup>	10,27 mA/cm <sup>2</sup>
Tripla – MEIO	12,43 mA/cm <sup>2</sup>	11,76 mA/cm <sup>2</sup>	10,55 mA/cm <sup>2</sup>	15,67 mA/cm <sup>2</sup>	13,00 mA/cm <sup>2</sup>
Tripla – BASE	16,12 mA/cm <sup>2</sup>	16,70 mA/cm <sup>2</sup>	8,81 mA/cm <sup>2</sup>	25,36 mA/cm <sup>2</sup>	18,92 mA/cm <sup>2</sup>
LIMITANTE	10,74 mA/cm <sup>2</sup>	10,65 mA/cm <sup>2</sup>	8,81 mA/cm <sup>2</sup>	6,24 mA/cm <sup>2</sup>	10,27 mA/cm <sup>2</sup>

A Tab. 6 mostra os valores dos desvios das correntes fotogeradas das células solares de homojunção, tomados da Tab. 4, e da célula solar de tripla junção, tomados da Tab. 5. A última linha mostra o desvio médio para todas as medidas e podemos observar que o SOLSIM e o X25 foram os simuladores solares com os menores desvios.

Tabela 6. Valores dos desvios das correntes fotogeradas das células solares de homojunção e de tripla junção.

Tipo de Célula	XL-25	XENON	Homemade	SOLSIM
Silício - mono	-1,4 %	-8,9 %	+12,7 %	-0,4 %
Silício - poli	-0,8 %	-1,4 %	+0,7 %	+0,1 %
CIGS	-1,9 %	-10,5 %	+12,4 %	-0,2 %
GaAs	-2,4 %	+0,1 %	-3,5 %	+1,4 %
CdTe	-0,1 %	+4,8 %	-7,6 %	+2,0 %
InP	-1,2 %	-3,1 %	+3,5 %	+1,0 %
Nano	0 %	+9,7 %	-19,0 %	0 %
Tripla junção	-0,8 %	-18,0 %	-41,9 %	-4,4 %
DESVIO MÉDIO	1,1 %	7,1 %	12,7 %	1,2 %

#### 4. CONCLUSÃO

O trabalho mostra a importância do espectro de um simulador solar na caracterização de uma célula solar. A medida da corrente por tensão é afetada em termos da corrente de curto circuito devido a descasamento espectral entre o simulador solar e o padrão de irradiância espectral conhecido como AM1,5G. O simulador solar X25, classe A da Spectrolab, foi o que apresentou melhores resultados (0,8%) para células solares de tripla junção seguido pelo SOLSIM da empresa nacional Orbital Eng. Ltda (4,4%). Na análise geral, considerando inclusive as sete células solares de homojunção, o SOLSIM e o X25 apresentaram ótimos resultados com desvio médio em torno de 1 %.

O SOLSIM fabricado com dois tipos de lâmpadas acompanha uma tendência internacional para os modernos simuladores solares. Atualmente, os novos simuladores solares classe A, AA e AAA usam diferentes tipos de lâmpadas e regulam partes do espectro para ter um bom casamento espectral. Em contra partida, o preço reflete a classe destes novos simuladores, pois seu custo ao redor de cem mil dólares ilumina áreas pequenas (10cmx10cm). De maneira geral, o SOLSIM pode ser classificado como sendo de Classe B para a área de iluminação de 10 cm de diâmetro ou Classe C para 20 cm de diâmetro.

O SOLSIM é um sistema de fácil manutenção porque os componentes, apesar de importados, são encontrados em lojas de lâmpadas especiais. O SOLSIM não necessita de bancadas especiais para sua montagem, pois o sistema (iluminação, alimentação e regulação) está condicionado em um gabinete (rack 19”) com altura de 1,80 m. Desta forma, as empresas e os centros de pesquisas contam agora com equipamento nacional de preço acessível para realizar ensaios de iluminação solar (1000 W/m<sup>2</sup> e espectro AM1,5G).

#### REFERÊNCIAS

- Norma NBR 11879 da ABNT 1991. Dispositivos Fotovoltaicos – Simulador Solar – Requisitos de Desempenho, p. 1-3.
- Rauschenbach, H. S., 1980, Solar Cell Array Design Handbook. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Santos de Abreu, R. A. 2006. Caracterização Elétrica de Células Solares de Tripla Junção – GaInP/GaAs/Ge, Dissertação de Mestrado, Engenharia e Tecnologia Espaciais / Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, INPE, São José dos Campos-SP.
- Veissid, N. e Costa Vaz, C., 2007. Desenvolvimento de Simulador de Baixo Custo. Anais do I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza-CE.
- Zabierowski, P.; Platzer-Björkman, C.; Cwil, M., 2006. Electrical Characterization of CIGSe-based photovoltaic devices with Zn(O,S) and (Zn,Mg)O buffers. Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden-Ge.
- Field, H., 1997. Solar Cell Spectral Response Measurement Errors Related to Spectral Band Width and Chopped Light Waveform, 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California-USA.
- Nishioka, K., Tatsuya, T., Takaaki, A., Minoru, K., Yukiharu, U., Takashi, F., 2006. Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell's structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems, Solar Energy Materials & Solar Cells 90, p. 1308-1321.

#### LOW PRICE SOLAR SIMULATOR (SOLSIM): PHOTOGENERATED CURRENT SIMULATED AT SEVERAL KIND OF SOLAR CELLS

**Abstract.** *The low price solar simulator (SOLSIM) was developed at INPE together the company Orbital Eng. Ltda. The SOLSIM is composed by set of two different types of lamps. The AM1.5G spectrum, obtained by superposition of individual spectrum from each lamp, is A class. This work shows photogenerated current values obtained with SOLSIM solar simulator and compare these values obtained with other equipments and with the standard solar irradiance curve (1000 W/m<sup>2</sup>, ABNT NBR 11879, IEC 904-9 and ASTM E 927-85). The simulated values are calculated using the spectral irradiance curve of several solar simulators and spectral response of several solar cells. The results indicate that a device has since 40 % variation in the photogenerated current when it is characterized with different class of solar simulators. The SOLSIM and X25 solar simulator are the equipments with lower medium standard deviation, around 1 %, when compared with the standard AM1.5G. Additionally with this fact, the SOLSIM is the equipment that shows the better relation cost by beneficial because its price (US\$ 15.000) is around one third of imported equipments.*