

DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO

Nelson Veissid – veissid@las.inpe.br

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

Célio Costa Vaz – orbital@bighost.com.br

Orbital Engenharia Ltda, Divisão de Sistemas de Iluminação

4.4 Outros instrumentos de medição

Resumo. Este trabalho descreve as principais etapas para o desenvolvimento de um simulador solar de baixo custo expansível na área de iluminação. A caracterização de sistemas de conversão de energia solar (fotovoltaica e térmica) necessita de sistemas de iluminação com padrões de emissão AM0 (radiação solar extraterrestre) ou AM1,5G ou AM1 (superfície terrestre). No entanto, estes sistemas são de alto custo e, isto, inviabiliza o seu uso para laboratórios e empresas de pequeno e médio porte. A proposta do desenvolvimento baseia-se em um conjunto de diferentes lâmpadas comerciais, cujos espectros somados formem um dos padrões citados acima. O trabalho mostra o algoritmo usado na distribuição das lâmpadas para se obter uma homogeneidade melhor do que 5% dentro da área de iluminação (10cm^2 até vários metros quadrados). Desta forma, o simulador solar poderá ser produzido com um custo bem inferior do que os encontrados no exterior e, também, será estabelecido a nacionalização de um equipamento importante na área de energia solar.

Palavras-chave: Simulador Solar, Célula Solar, Coletor Solar, Caracterização, Energia Solar

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas chamados de “Simulador Solar” permitem produzir em laboratório as condições de iluminação da luz solar. 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 $135,3\text{mW/cm}^2$ 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 100mW/cm^2 . A uniformidade da iluminação solar natural é muito melhor do que 1% devido à distância Terra-Sol e a estabilidade temporal, também, é melhor do que 1% para céu aberto com condições climáticas adequadas.

A Norma da ABNT (1991) estabelece requisitos de desempenho para os simuladores solares, em termos dos parâmetros comentados acima. A tabela 1, desta norma, 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	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
-Estabilidade temporal	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
-Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	$\leq \pm 40\%$	$\leq +100\%$ e -60%

O casamento espectral corresponde à razão entre as porcentagens (valor medido pelo valor padrão) especificada na tabela 2 para cada intervalo de comprimentos de onda. Os valores para AM1,5G são os indicados pela norma ABNT (1991) e os valores para o espectro AM0 foram calculados pelo padrão NIST, considerando os mesmos intervalos de comprimento de onda. Convém

lembrar que esta norma refere-se a simuladores solares para caracterização de sistemas fotovoltaicos de uso terrestre, por isso não consta nenhuma referência à irradiação extraterrestre. Os intervalos de comprimento da tabela 2 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.

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

Intervalo de comprimento de onda (μm)	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

Um típico simulador solar é o da ORIEL. Ele 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, conforme Fig. 1. O simulador solar de 1000W da ORIEL ilumina uma área de 10cmx10cm e é de classe B.

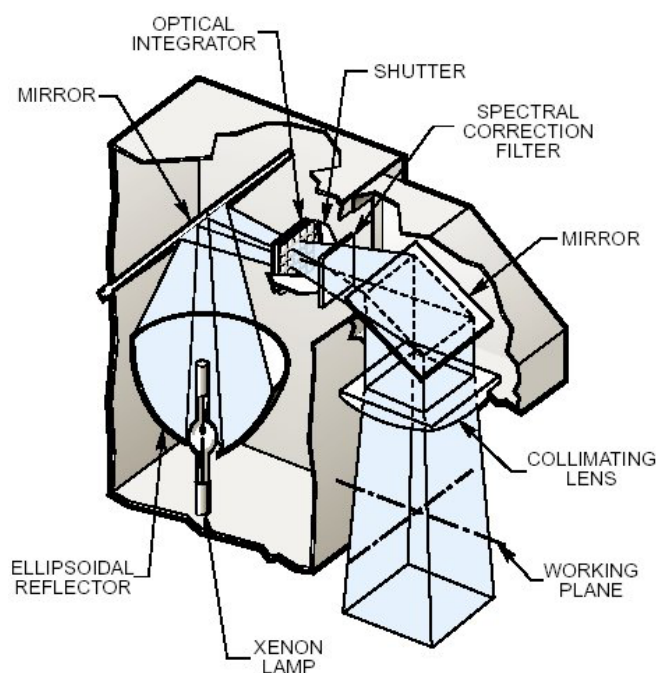


Figura 1 – Esquema típico de um simulador solar de bancada (fonte: light_solar_intro.pdf).

A Fig. 2 mostra as curvas de irradiância espectral do simulador solar da Fig. 1, para o sistema sem filtro (emissão da lâmpada de Xenônio), com filtro AM0, com filtro AM1 e com filtro AM1,5G. Nesta figura podemos observar que o filtro AM0 atenua os picos de emissão próprios do Xenônio e os outros filtros ajustam o espectro para ficar próximo ao desejado.

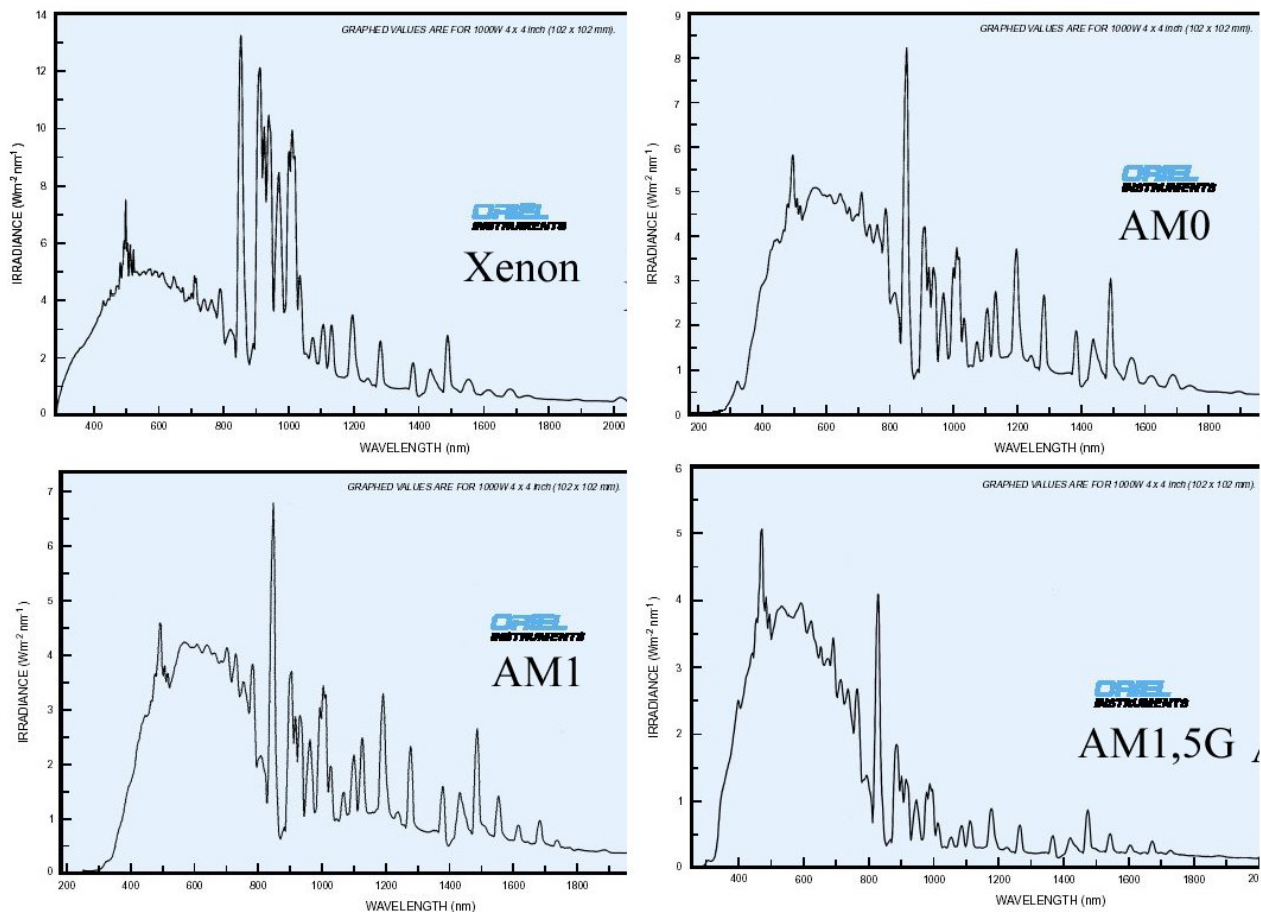


Figura 2 – Curvas do espectro de irradiância de um simulador solar baseado em uma lâmpada de descarga em gás de Xenônio (fonte light_solar_data.pdf).

Existem outros tipos de simuladores solares de luz contínua e, também, existem os de luz pulsada que são usados para iluminar grandes áreas. Por exemplo, o LAPSS (Large Area Pulsed Solar Simulator) da Spectrolab que custa ao redor de US\$300.000, ilumina uma área de 2m de diâmetro durante o pulso de luz de 10ms de duração. Este tipo de sistema permite obter a característica corrente por tensão de um painel solar sem alterar a sua temperatura (Rauschenbach, 1980).

2. DESCRIÇÃO

O desenvolvimento do simulador solar de baixo custo (SOLSIMU) é um projeto do INPE (Grupo de Células Solares do LAS) e conta com apoio financeiro da FINEP.

Atualmente existe uma variedade de diferentes tipos de lâmpadas (descarga em gás, tungstênio-halogênio, dicróicas e outras), onde cada uma delas tem o seu próprio espectro de emissão. A escolha adequada das lâmpadas permite fazer um bom casamento com o espectro de irradiação solar. A Fig. 3 mostra exemplos de emissão de diferentes lâmpadas. Nesta figura pode ser observado os picos de emissão típicos das lâmpadas de descarga em gás (HQL, Master e NDL) e o espectro das lâmpadas de tungstênio-halogênio com e sem filtro. As curvas desta figura foram medidas com um espectro-radiômetro da Ocean-Optics model USB2000. A ideia do simulador solar de baixo custo (SOLSIMU) é somar os espectros de uma combinação de lâmpadas e ajustar a intensidade para se chegar na intensidade da condição desejada (AM0 ou AM1,5G).

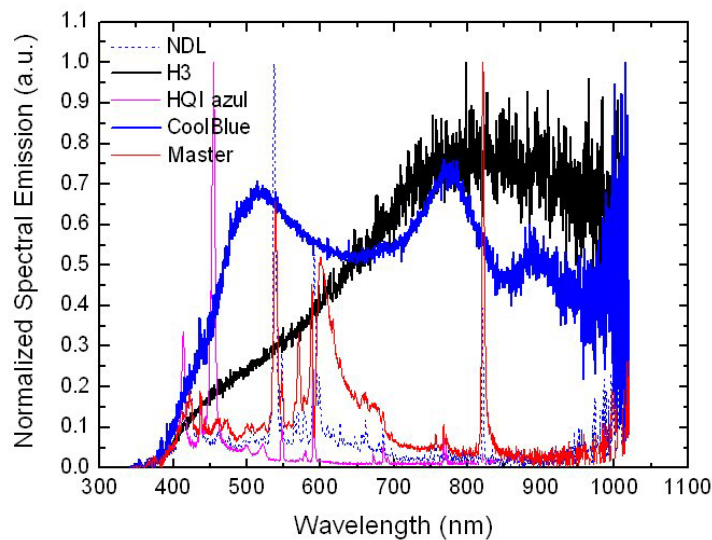


Figura 3 – Curvas de emissão de diferentes tipos de lâmpadas.

Além do espectro, um simulador solar deve ter boa uniformidade (melhor do que 10% para ser no mínimo de classe C). A uniformidade corresponde à variação da intensidade luminosa dentro da área de iluminação e deve ser calculada conforme a Eq. 1.

$$Uniformidade(\%) = 100 \cdot \frac{MáximaRadiação - MínimaRadiação}{MáximaRadiação + MínimaRadiação} \quad (1)$$

Para obter uma boa uniformidade é necessário montar um arranjo matematicamente bem simulado de refletores, pois os refletores parabólicos permitem colimar o fluxo de luz de uma fonte de colocada em seu foco. Entretanto, a intensidade luminosa em relação ao eixo do parabolóide não é constante e isto acarreta problemas para se garantir a uniformidade do sistema de iluminação. Por exemplo, a Fig. 4 mostra a intensidade luminosa de refletor parabólico sobre uma superfície de 40cm por 40cm e, desta forma, podemos entender o problema da uniformidade quando é usado apenas um refletor. A barra de cores mostra o valor da intensidade luminosa em unidades arbitrárias.

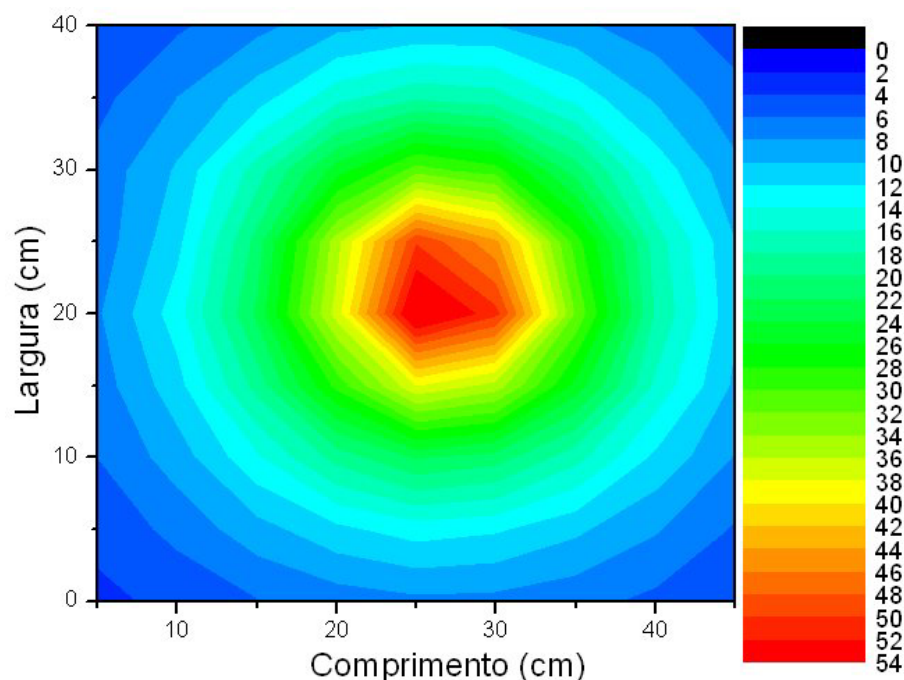


Figura 4 – Intensidade luminosa sobre um plano alvo produzida por um refletor parabólico.

3. MÉTODO

3.1 Intensidade e espectro de irradiação solar

A Fig. 5 mostra o espectro conseguido na mistura de dois tipos diferentes de lâmpadas, as quais por motivo de direitos autorais serão mantidas em sigilo. O casamento com o espectro AM0 foi conseguido com valores de tensão elétrica na alimentação das lâmpadas diferente da do espectro AM1,5G. O conjunto de lâmpadas é o mesmo. A Tab. 3 mostra os valores das razões do casamento espectral em função da faixa do comprimento de onda.

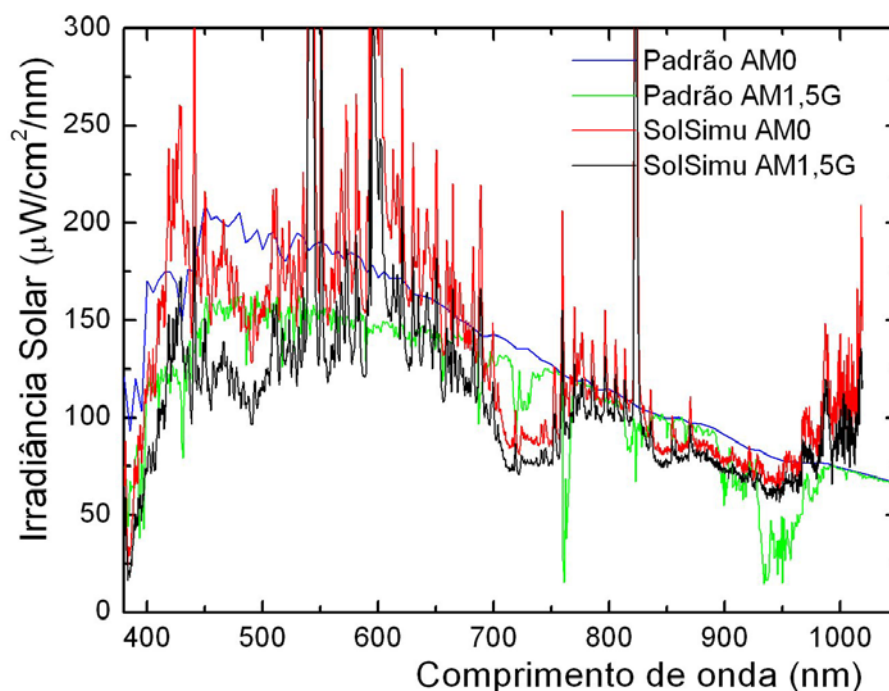


Figura 5 – Curvas de irradiância espectral padrões e obtidas no simulador solar de baixo custo.

Tabela 3. Distribuição espectral da irradiância, onde as porcentagens (esperada e medida) são relativas as parcelas em potência da radiação total. A razão é o quociente entre os valores medidos e esperados. Desvio é o acréscimo ou decréscimo que falta para completar a razão unitária.

Intervalo de comprimento de onda (μm)	Porcentagem esperada da radiação total no AM1,5G (%)	Porcentagem medida da radiação total no AM1,5G (%), razão e desvio (%)	Porcentagem esperada da radiação total no AM0 (%)	Porcentagem medida da radiação total no AM0 (%), razão e desvio (%)
0,4 a 0,5	18,5	15,7 / 0,85 / -15	20,5	19,0 / 0,93 / -7
0,5 a 0,6	20,1	21,7 / 1,08 / +8	20,5	24,2 / 1,18 / +18
0,6 a 0,7	18,3	18,4 / 1,01 / +1	17,5	19,6 / 1,12 / +12
0,7 a 0,8	14,8	12,0 / 0,81 / -19	14,0	11,6 / 0,83 / -17
0,8 a 0,9	12,2	12,2 / 1,00 / 0	11,2	11,6 / 1,04 / +4
0,9 a 1,1	16,1	20,8 / 1,29 / +29	16,3	18,6 / 1,14 / +14

Pelos valores calculados de desvio da tabela acima, podemos verificar que para o espectro AM0 o simulador solar de baixo custo pode ser classificado como sendo de CLASSE A, pois o maior desvio encontrado foi de 18% e a Tab. 1 define que o sistema classe A deve ter um casamento melhor do que $\pm 25\%$. No caso do espectro AM1,5G, o sistema é CLASSE B.

3.2 Uniformidade

Para obter boa uniformidade é necessário modelar matematicamente a intensidade luminosa de cada refletor individualmente. Por exemplo, o refletor mostrado na Fig. 4, apresenta o perfil de intensidade luminosa radial dado na Fig. 6 e corresponde ao valor da Eq. 2, o qual foi obtido pelo ajuste (fitting) de duas Lorentzianas. Os valores 24500, 3,1 e 15,5 foram os valores ótimos encontrados no fitting.

$$Intensidade = \frac{24500}{\pi} \left[\frac{1}{4(x-3,1)^2 + 15,5^2} + \frac{1}{4(x+3,1)^2 + 15,5^2} \right] \quad (2)$$

O ajuste de duas Lorentzianas, para o caso do refletor estudado neste trabalho (ver Fig. 6), foi obtido na tentativa de varias funções. Pois, nenhuma formulação teórica foi encontrada na literatura pertinente a este trabalho.

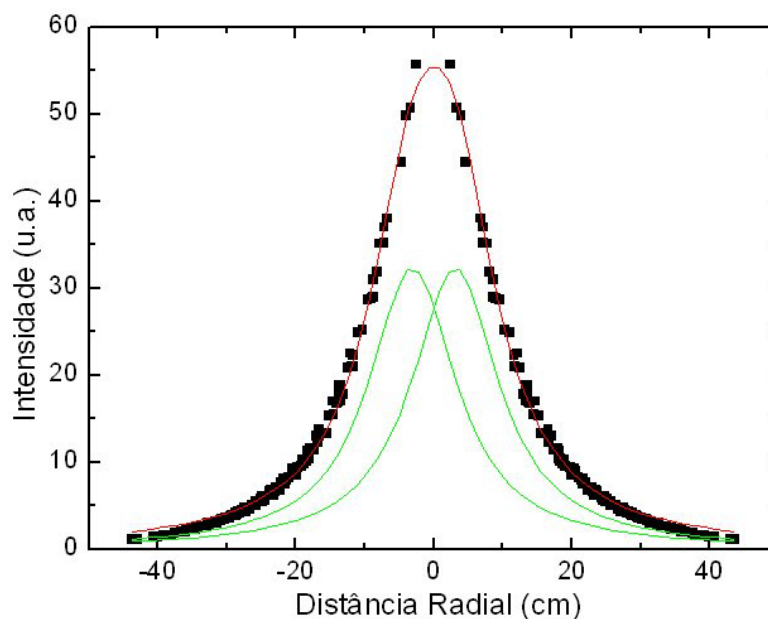


Figura 6 – Medida experimental e curva ajustada da intensidade luminosa do refletor parabólico mostrado na Fig. 4.

O posicionamento adequado de quatro refletores (L1, L2, L3 e L4) espaçado de 20 cm entre eles, permite obter uma área de 20cmx20cm iluminada com uma uniformidade melhor do que 10%. A Fig. 7 mostra a intensidade (barra de cores em unidades arbitrárias) individual dos quatro refletores e a intensidade obtida, quando os refletores estão ligados simultaneamente, na soma destas intensidades (ver figura da direita).

Tabela 4. Valores de Uniformidade experimental do SOLSIMU no espectro AM0, calculado pela Eq. 1, para diferentes áreas. Os valores de intensidade estão na unidade de W/m².

Área	Máxima Intensidade	Mínima intensidade	Uniformidade (%)
30cm x 30cm	1280	829	21
25cm x 25cm	1280	950	15
20cm x 20cm	1280	1067	9
15cm x 15cm	1280	1166	5
10cm x 10cm	1280	1225	2

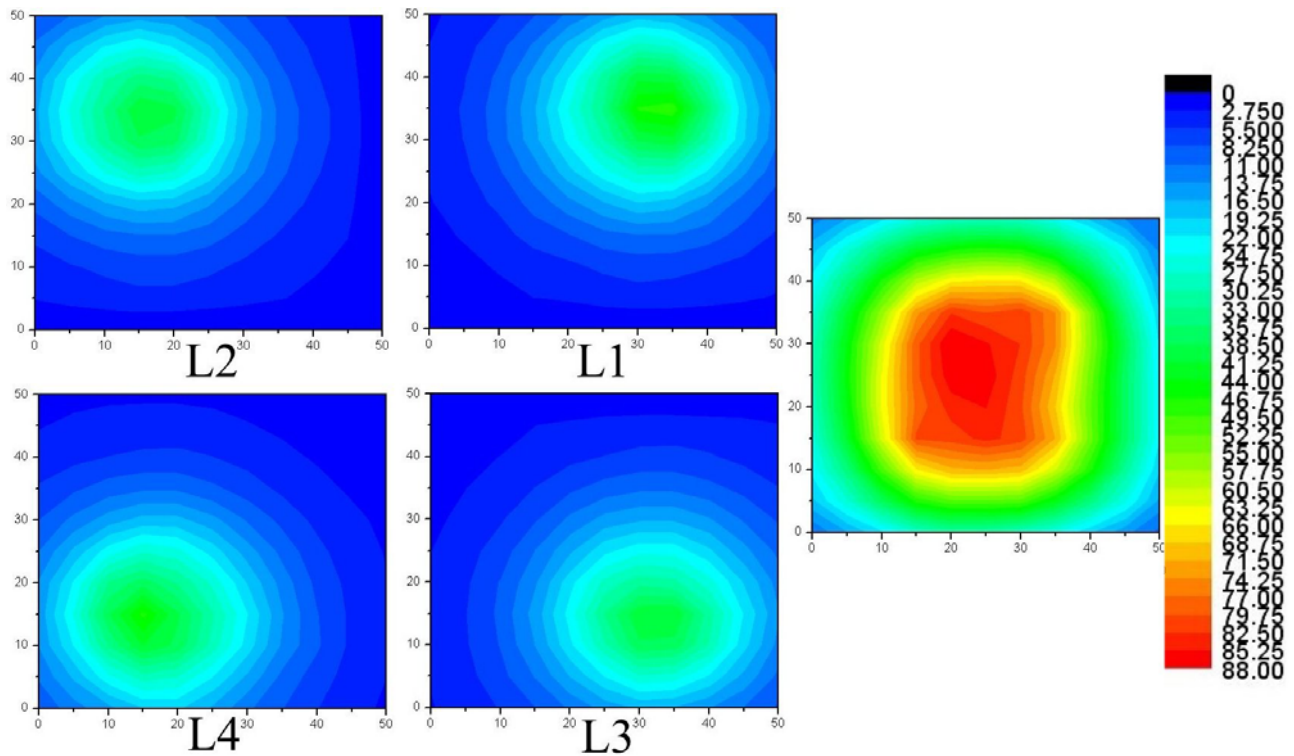


Figura 7 – Medida experimental individual da intensidade luminosa dos refletores L1, L2, L3 e L4 e medida experimental da intensidade dos refletores ligados simultaneamente. As dimensões X e Y estão em cm e a barra de cores mostra o valor da intensidade luminosa em unidades arbitrárias.

4. TESTE FUNCIONAL

A Fig. 8 mostra um dos autores (N.V.) fazendo a medida da uniformidade do sistema.



Figura 8 – Medida experimental da uniformidade do simulador solar de baixo custo produzido no Laboratório Associado de Sensores e Materiais do INPE de São José dos Campos.

Usando sistema automático de aquisição de dados para obter a curva característica IxV (Veissid et al, 1995), foi feita medidas em células solares de silício convencionais e em uma célula sem camada antirefletora (SCAR 4). Também, foi feita medida em uma célula solar de tripla junção de área de 27 cm² e eficiência de 26,6%. Todas estas medidas foram obtidas na condição de iluminação AM0. As Fig. 9 e 10 mostram as curvas IxV obtidas nestas medidas e a Tab. 5 mostra os valores dos parâmetros de saída das curvas IxV. As células de silício tiveram os seus valores comparados com os valores obtidos na medida tirada em um simulador solar de 1000W da ORIEL, calibrado com célula de referência. As células solares de tripla junção tiveram os seus valores comparados com os valores fornecidos pelo fabricante deste tipo de célula (ver primeira coluna da Tab. 5).

Neste ponto, convém esclarecer que a medida de uma célula solar de tripla junção, feita num sistema de iluminação calibrado com uma célula solar de referência de silício, normalmente não fornece resultados coerentes (Santos de Abreu, 2006 e Veissid et al, 2006). Por isso, os valores mostrados na Tab. 5 fortalece a idéia de que o SOLSIMU tem um bom casamento na emissão espectral, como mostrado na ultima linha da tabela.

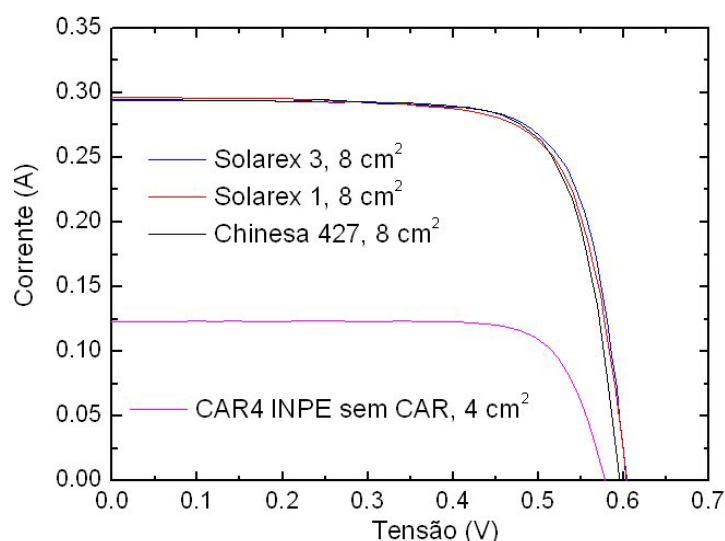


Figura 9 – Medida experimental da curva característica de corrente por tensão de células solares de silício, feita no simulador solar de baixo custo com espectro AM0.

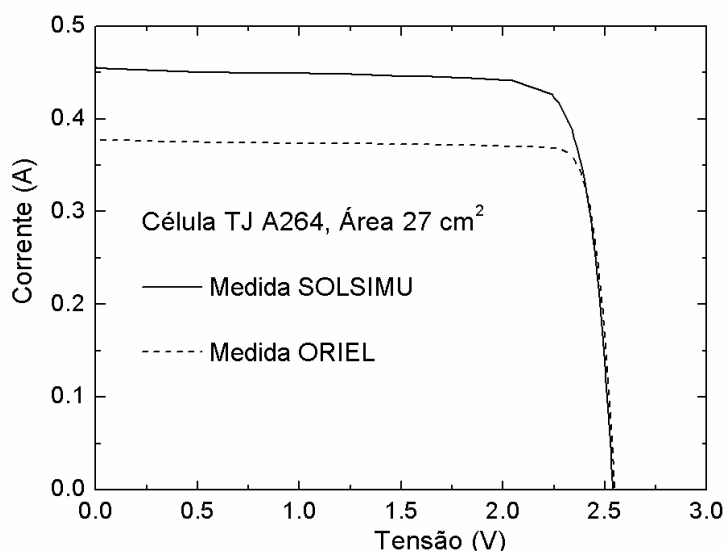


Figura 10 – Medida experimental da curva característica de corrente por tensão de células solares de tripla junção, feita no simulador solar de baixo custo com espectro AM0.

Tabela 5. Valores dos parâmetros de saída da curva característica de corrente por tensão das células solares medidas no simulador solar de baixo custo.

Situação	Tipo	Número	V _{OC} (mV)	I _{SC} (mA)	V _{MP} (mV)	I _{MP} (mA)	FF	Ef.(%)
ORIEL	Silício Con-	C427	597	289	498	267	0,77	12,3
MEDIDO	vencional	C427	596	295	499	266	0,76	12,3
ORIEL	Silício Con-	Solar3	608	286	504	259	0,75	12,1
MEDIDO	vencional	Solar3	604	294	501	269	0,76	12,5
ORIEL	Silício Con-	Solar1	609	286	503	260	0,75	12,1
MEDIDO	vencional	Solar1	604	296	499	264	0,74	12,2
ORIEL	Silício Con-	SCAR4	583	123	489	118	0,81	10,7
MEDIDO	vencional	SCAR4	580	123	482	117	0,79	10,4
FABRIC.	Tripla	A264	2543	453	2258	439	0,86	26,4
MEDIDO	Junção	A264	2540	455	2245	424	0,82	26,1
ORIEL		A264	2549	378	2319	363	0,87	23,0

5. CONCLUSÃO

Este trabalho está tendo apoio financeiro da FINEP no Fundo Setorial de Energia do Ministério de Ciência e Tecnologia e envolve parceria com a empresa Orbital Eng. Ltda sediada em São José dos Campos. Esta empresa irá futuramente produzir simuladores solares de baixo custo para uso em diferentes áreas: Energia Solar Fotovoltaica, Energia Solar Térmica, Testes Automotivos de Arrefecimento e Ar Condicionado, Ensaios Agronômicos, Testes Biomédicos e outros.

Uma das principais atividades da empresa Orbital Eng. Ltda é o fornecimento de painéis solares de uso espacial para abastecer os projetos de satélite do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Recentemente, em um destes projetos foi necessário fazer-se a caracterização elétrica de dezesseis mil células solares chinesas para o satélite Chinês-Brasileiro CBERS2B e a Orbital optou por construir um simulador solar nos moldes deste projeto para este serviço. Os testes nos painéis completos feitos usando o simulador solar pulsado LAPPS do Laboratório de Integração e Testes de Satélite do INPE mostraram total casamento na classificação por classe de corrente das células solares. Este ensaio prova a confiabilidade do simulador solar de baixo custo.

A particularidade mais interessante no simulador desenvolvido neste trabalho, além do seu baixo custo, reside na configuração tipo multispots que permite iluminar qualquer dimensão de área simplesmente incrementando mais refletores, conforme pode ser visto na Fig. 8.

Quanto à estabilidade temporal, testes mostraram que a oscilação na intensidade luminosa é melhor do que 5% para uma rede que oscila em torno de 2% ao redor dos 220V, entre 215V e 225V. Este fato é reflexo da boa escolha dos reatores que alimentam as lâmpadas.

Concluindo, este trabalho mostra a possibilidade de se construir simulador solar de baixo custo (preço inferior à metade dos equipamentos disponíveis no mercado) usando lâmpadas normalmente encontradas no comércio de lâmpadas especiais. Deve-se, também, acrescentar o fato que o sistema é de fácil manutenção porque ele permite a substituição de lâmpadas e reatores que estão com mau funcionamento. O equipamento mostrou ser de classe A no espectro AM0 para uma área de iluminação de 10cmx10cm e de classe B para uma área de 15cmx15cm. No espectro AM1,5G para uma

área de iluminação de 15cmx15cm o SOLSIMU é de classe B e para uma área de iluminação de 20cmx20cm é de classe C.

Agradecimentos

Os autores desejam agradecer à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e ao MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia), que através do FNDCT do Setor de Energia fez o apoio financeiro do projeto SOLSIMU.

REFERÊNCIAS

- Norma NBR 11879 da ABNT 1991. Dispositivos Fotovoltaicos – Simulador Solar – Requisitos de Desempenho, pp. 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 – Ga-InP/GaAs/Ge, Dissertação de Mestrado, Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, INPE, São José dos Campos.
- Veissid, N. and Santos de Abreu, R. A. 2006. An Experimental Method to Directly Obtain a Photo-generated Current at Each Junction Within Triple Junction Solar Cell, Solar Energy Materials and Solar Cells, aceito para publicação.
- Veissid, N.; Bonnet, D. and Richter, H. 1995. Experimental Investigation of Double Exponential Model of a Solar Cell Under Illuminated Conditions: Considering the Instrumental Uncertainties in the Current, Voltage and Temperature Values. Solid-State Electronics, v. 38, n. 11, p. 1937.

DEVELOPMENT OF A LOW COST SOLAR SIMULATOR

Abstract. *This work describes main steps to obtain a low cost solar simulator. To characterize a solar energy conversion system (photovoltaic and thermal) is necessary to have illumination systems with AM0 (extraterrestrial solar radiation) or AM1.5G or AM1 (terrestrial surface) pattern emission. However, these kind of systems are very expensive and, because this, they are not so used at small laboratories or companies. This work is based upon a system with a set of different commercial lamps, which spectral emissions together produces one of the conditions above. Also, this work shows the algorithm used in the array of lamps to obtain a uniformity better than 5% inside a illumination area (10cm² or several square meters). In this way, the solar simulator can be manufactured with a cost very lower than the similar equipments found in the world. This important characterization system in the solar energy area will be nationalized.*

Key words: *Solar Simulator, Solar Cell, Solar Panel, Electrical Characterization, Solar Energy*